

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Хакасский государственный университет
имени Н. Ф. Катанова»

На правах рукописи

Карандеев Денис Юрьевич

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ И ВЫБОРА СТРУКТУРЫ
ВЫСОКОНАДЕЖНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(космические и информационные технологии)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Дулесов Александр Сергеевич

Абакан – 2021

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Общесистемные признаки построения структур распределительных сетей.....	12
1.1 Современные подходы к анализу структурного содержания распределительных сетей	12
1.2 Анализ инструментальной среды в задаче обеспечения высокого уровня надежности распределительных сетей.....	21
1.3 Область и особенности применения инструментов теории информации	33
1.4 Краткая характеристика задачи оценки состояния и выбора структуры распределительной сети	42
Выводы по первой главе.....	44
2 Разработка методики оценки состояния и выбора структуры высоконадежной распределительной сети	46
2.1 Формализация задачи поиска оптимальной структуры распределительной сети	46
2.2 Выбор метода решения задачи построения структур распределительных сетей.....	57
2.3 Решение задачи построения оптимальной структуры с учетом соблюдения требуемого уровня надежности	64
2.4 Особенности применения меры неопределенности информации в задаче оценки состояния распределительной сети.....	71
2.5 Разработка методики оценки состояния и выбора структуры высоконадежной распределительной сети	90
Выводы по второй главе.....	97
3 Разработка вычислительных процедур выбора эффективных структур распределительной сети	100

3.1 Вычислительная процедура анализа надежности распределительной сети электроснабжения	100
3.2 Построение структуры распределительной сети с оптимальным резервированием	116
3.3 Расчет количества резервных элементов распределительной сети	129
3.4 Выбор оптимальной структуры сети с соблюдением требуемого уровня надежности.....	135
Выводы по третьей главе.....	157
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	158
СПИСОК БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ.....	161
Приложение А. Акт об использовании результатов диссертационного исследования.....	188
Приложение Б. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	189

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Распределительные сети относятся к сложным техническим системам, требующим системного подхода к получению и преобразованию информации в целях обоснованных проектных решений и эффективного управления при эксплуатации. Одним из важных свойств сети является её надёжность, связанная с необходимостью сохранять в установленных пределах значения параметров, характеризующих способность выполнять функции в условиях эксплуатации и технического обслуживания. Выполнение задачи обеспечения высокого уровня надёжности сети направлено на поиск современных инструментов, к которым следует отнести информационные технологии. Потребность в их разработке связана со своевременной обработкой данных, получением достоверных оценок и выработкой эффективных управленческих решений.

При рассмотрении структуры распределительной сети, при известных значениях показателей надёжности, внимание уделяется состоянию всех входящих в неё элементов. При этом процесс смены состояний является стохастическим, а природа данных – вероятностной, что требует участия в разработке современных методик, методов и алгоритмов расчёта показателей структурной надёжности. Среди них следует выделить аналитические методы, исследующие случайные события и случайные процессы, протекающие в сети и влияющие на изменчивость её структуры.

Системный анализ надёжности структуры распределительной сети востребован при рассмотрении взаимодействия и взаимного влияния элементов. При известной схеме соединения элементов и параметрах надёжности её значения учитываются как постоянные в пределах рассматриваемого состояния. Однако при переходе к другому состоянию востребован учет изменения значений параметров как для одного элемента сети, так и для многих. Данные, как зарегистрированная информация о смене состояний элементов сети, подлежат измерению. Среди существующих

систем измерения параметров надежности востребована мера неопределенности источника сообщений от диспетчера о состоянии элементов структуры. В качестве количественной характеристики данной меры принимается энтропия, применяемая для решения задачи оценки состояния и выбора структуры распределительной сети. При использовании энтропии решение данной задачи должно предусматривать учет фактора неопределенности состояния элементов, так как последствия отказов в сети могут значительно различаться. Определение количества энтропии позволяет установить: 1) степень неопределенности состояния для каждого из элементов; 2) состояния групп элементов (связанных между собой на принципах физической передачи энергии); 3) границы допустимой надежности между потребителем и связью «источник – потребитель» для выбора высоконадежной распределительной сети.

Процесс вычисления количества энтропии предполагает: 1) использование теоретических основ информации (системный анализ информационных процессов, протекающих в технических системах, модели и задачи определения энтропии и др.); 2) применение теории надежности (математическое моделирование надежности систем, методы анализа отказов и причин их возникновения, методы расчета структурной надежности и др.).

Диссертационная работа направлена на решение задачи оценки неопределенности информации о состоянии элементов и групп элементов, с последующим выбором оптимальной структуры распределительной сети, эффективной с точки зрения обеспечения требуемого уровня надежности.

Степень разработанности проблемы

Одним из подходов к построению методики является теория информации. Решением задач, касающихся развития теории информации, занимались такие зарубежные и отечественные ученые, как Р. Хартли, К. Шеннон, А. Я. Хинчин, У. Р. Эшби, А. Н. Колмогоров, Д. С. Чернавский, А. Н. Панченков, А. Д. Урсул, Е. А. Седов, А. Реньи, Н. А. Кузнецов, М. А.

Басин, А. Л. Гельгор, И. В. Прангишвили, В. А. Леус, А. М. Хазен, В. А. Котельников, А. А. Харкевич, Р. Л. Стратонович, Р. Л. Добродушин, А. Файнштейн, Р. Фано, В. И. Корогодин, В. Гагин, А. В. Мурыгин, Т. М. Cover, В. Widrow, K. Parthasarathy, В. Hogg, D. Nguyen, Q. Wu, G. Irwin. Вопросы развития и применимости теории надежности распределительной сети занимались: Б. И. Кудрин, Б. И. Макоклюев, А. Н. Митрофанов, В. З. Манусов, Е. В. Сугак, В. И. Гнатюк, И. И. Надтока, J. Taylor и др. Работы упомянутых ученых позволили обобщить, систематизировать и логически увязать исследование о возможности использования меры неопределенности информации, количественная характеристика которой послужила универсальным инструментом решения задач оптимального построения структуры сети.

Целью работы является повышение эффективности анализа надежности распределительных сетей за счет использования методики вычисления информационной энтропии.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Аналитический обзор существующих методов и моделей анализа для последующего поиска наиболее эффективной архитектуры системы, соответствующей требованиям надежности (технико-экономической целесообразности).

2. Разработка и апробация методики расчета, позволяющего выполнять оценку состояния и выбор структуры высоконадежной распределительной сети.

3. Формулировка задач и разработка вычислительных процедур, подтверждающих эффективность разработанной методики.

Методология и методы исследования. При выполнении работы нашли применение элементы системного анализа, модели и методы теории информации, методы математического и компьютерного моделирования, модели и методы теорий вероятностей, надежности и математической

статистики, методы оптимизации и численные методы. К базовой технологии можно отнести основополагающие научные изыскания в области развития системных принципов и связей в системах. Анализ современного состояния исследований позволил выявить возможности применения меры неопределенности информации в задачах сохранения структурной целостности и надежности при проектировании и эксплуатации распределительных сетей.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложена новая методика описания состояния структуры распределительной сети, в отличие от аналогичной методики, учитывающей показатели безотказности, позволяет решать задачи качественного анализа надежности через количественную характеристику информации.

2. Предложены вычислительные процессы, подтверждающие эффективность предлагаемой методики:

- процедура оценки состояний сети и поиска «слабого» звена, которая, в отличие методов анализа характеристик основных событий, позволяет использовать меру неопределенности информации для выявления неблагоприятных событий всех связей структуры;

- процедура расчета оптимального количества однотипных резервных элементов, который, помимо имеющихся методов поиска эффективной структуры, соответствующей требованиям надежности, позволяет учесть технико-экономическую целесообразность функционирования сети;

- процедура выбора структуры замкнутой распределительной сети, отличительной особенностью которой, в сравнении с методами проектирования архитектур систем, является возможность дополнительного учета неопределенности информации, относящегося к статистическим данным и соблюдению условия обеспечения заданного уровня надежности.

Теоретическая значимость работы заключается в исследовании и развитии общего подхода к оценке состояния и выбору структур высоконадежных распределительных сетей на основе разработанной и апробированной новой методики, включающей в себя расчеты меры неопределенности информации.

Практическая значимость заключается в применении разработанной методики, сформулированных задачах исследования и методах, когда в исходных данных показателей надежности отражена вероятностная природа поведения распределительных сетей, что позволяет рассчитывать энтропию, величина которой является характеристикой состояния группы элементов и результатом выбора структуры высоконадежной распределительной сети. Эффекты обусловлены повышением качества анализа надежности сетей, уровня выработки и принятия решений в процессе их проектировании и эксплуатации, что в свою очередь снизит издержки в случае перерывов в энергоснабжении. Отдельные результаты работы приняты в деятельность в отдел проектирования филиала ПАО "МРСК Сибири" - "Хакасэнерго". Работа проводилась в рамках проекта Фонда содействия инновациям по программе «У.М.Н.И.К.», договор № 13138ГУ/2018; гранта РФФИ № 15-08-01473а «Оценка содержания информации в структуре технической системы».

Положения, выносимые на защиту:

1. Задача обработки данных и оптимизации, решение которой позволяет на основе анализа стохастических состояний и статистических данных сети использовать разработанную методику. (*п. 2 паспорта специальности 05.13.01*)

2. Методика описания математических выражений расчета вероятностей и энтропии, применение которой связано с задачами оценки состояния и выбора эффективных структур распределительной сети. (*п. 3 паспорта специальности 05.13.01*)

3. Вычислительная процедура построения оптимальной структуры распределительной сети, в основу которой положен метод минимальных путей расчета вероятностей связей «источник–потребитель» с последующим поиском оптимального варианта на основе метода ветвей и границ. (*п. 3 паспорта специальности 05.13.01*)

4. Вычислительные процедуры, в основу которых положена разработанная методика (*п. 3 паспорта специальности 05.13.01*):

- оценка состояния сети и поиска «слабого» звена. Решение задачи основано на расчете энтропии при соблюдении условия обеспечения заданного уровня структурной надежности;
- расчет оптимального количества однотипных резервных элементов. Результат расчета отвечает требованиям соблюдения уровня надежности звеньев сети, выраженного через величину энтропии;
- выбор структуры замкнутой распределительной сети с выполнением условия технико-экономической целесообразности. Включает в себя метод минимальных путей и сечений построения системы ограничений задачи оптимизации, с последующим её решением методом Лагранжа и получением целочисленного решения.

Достоверность полученных научных результатов, прежде всего модели, обеспечена корректным использованием методов теории вероятности, теории информации, системного анализа и обработки данных, структурной надежности, численных решений, строгим математическим обоснованием рассуждений, а также соответствием теоретических значений и экспериментальных данных, полученных при внедрении разработанных решений.

Апробация работы. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались:

- Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering (г. Красноярск, 2019–2020 гг.).

- Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH (г. Красноярск, 2019 г.).
- Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering (г. Красноярск, 2018 г.).
- Международная научная конференция «Far East Con» (г. Владивосток, 2018 г.);
- 3rd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (г. Санкт-Петербург, 2017 г.).
- International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering (г. Санкт-Петербург, 2017 г.).
- International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE), (г. Севастополь 2017–2018 гг.).
- Международная научная конференция «Перспектив Свободный», секция: «Электроэнергетика» (г. Красноярск, 2017–2018 гг.).
- Международная научно-практическая конференция «На пути к информационному обществу» (г. Москва, 2017 г.).
- IV Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы» (г. Томск, 2016 г.).
- IV научно-практическая международная конференция молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук» (г. Тольятти, 2018 г.).
- I–IV Межрегиональная научно-практическая конференция «Инженерное и технологическое образование: проблемы и решения» (г. Абакан, 2015–2018 гг.).

С результатами научных исследований соискателем было принято участие в ряде научных конкурсов, по результатам которых были присуждены награды различного уровня: диплом I степени в 2018 г. и II в 2015–2016 гг. в номинации «Энергоснабжение, энергосбережение, энергоэффективность» на Республиканском конкурсе научно-

исследовательских работ «Научный потенциал Хакасии»; дипломы I (2018 г.) и II (2017 г.) степеней в номинации «Технические науки» на международной конференции «Перспектив Свободный», Красноярск; дипломы I, II степеней в 2015–2018 годах в секции «Информационные технологии в профессиональной деятельности» Межрегиональной научно-практической конференции «Инженерное образование: проблемы и решения»; 7 дипломов I и II степеней в секциях региональной конференции «Катановские чтения», посвященной республиканским Дням науки за период 2015–2018 гг. Основные положения диссертационной работы также докладывались на заседаниях и методических семинарах кафедры информационных технологий и систем Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова.

За заслуги в научной деятельности в разные годы соискателю были присуждены стипендии Президента РФ, Правительства РФ, а также премия Правительства Республики Хакасия «Молодой исследователь».

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 27 научных статьях, среди которых 5 в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных действующим перечнем ВАК; 7 – в научных изданиях, индексируемых в базах Web of Science / Scopus; 7 – в журналах, включенных в базу данных РИНЦ и 8 статей в сборниках конференций всех уровней. Имеется свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610366.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 193 наименований. Текст диссертации изложен на 189 страницах, включая 18 рисунков, 8 таблиц и 2 приложения.

1 Общесистемные признаки построения структур распределительных сетей

В данной главе рассматривается проблематика построения распределительных сетей, относящихся к сложным техническим системам. При этом делается акцент на присутствии и необходимом учёте неопределенности информации, обусловленной воздействием возмущений извне стохастического характера. Представлен анализ распределительной сети, включающий в себя её декомпозицию на элементы, выявление условий взаимного влияния отказов элементов на работоспособность сети, анализ возможностей применения мер вероятности и неопределенности информации, необходимых для оценки состояния и выбора эффективных структур. Результат анализа – фактор разработки методики, конечная реализация которой направлена на снятие неопределенности информации о случайном поведении распределительной сети. В конце главы представлена формальная постановка задачи исследования.

1.1 Современные подходы к анализу структурного содержания распределительных сетей

В последние годы в Российской Федерации стали уделять большее внимание вопросам энергосбережения в связи с тем, что удельные затраты электроэнергии на единицу стоимости значительно выше, чем в прочих странах, а также с тем, что согласно концепции энергетической стратегии России, на период до 2035 года данное направление разработок является одним из приоритетных [122, 124]. Решением задач по повышению энергоэффективности и надежности распределительных сетей занимались такие ученые, как Б.И. Кудрин [99], Б.И. Макоклюев [105], А.Н. Митрофанов, В.З. Манусов, В.И. Гнатюк [23], И.И. Надтока, Е.В. Сугак [131], J. Taylor и др.

Стоит отметить, что одним из возможных путей технического прогресса в сфере разработки распределительных сетей, в том числе и электроэнергетических, является разработка новых и самое главное эффективных конструкторских решений, нацеленных на повышение качества проектирования оптимальных распределительных сетей различного рода. К таким сетям можно отнести электрические сети, системы городского тепло- и водоснабжения, транспортные сети и многие другие.

Одним из важных этапов при строительстве различного рода распределительных сетей является этап проектирования, в частности, выбор оптимальной структуры из всех возможных вариантов, при изначально заданных координатах будущих потребителей электроэнергии. Сложность данного этапа обосновывается необходимостью выбора одной единственной структуры из большого перечня возможных. Ошибка в выборе может привести в дальнейшем к значительным издержкам.

Задача проектирования структур данных сетей является на сегодняшний день актуальной в связи с тем, что в ходе эксплуатации построенных по спроектированным планам недостаточно эффективных структур сетей впоследствии возникают издержки, вызванные простоями данной сети в случае выхода из строя её элементов, обладающих низким уровнем надежности, который не был учтён при расчетах.

Для детального исследования проблематики проектирования такой технической системы, как распределительная сеть, предварительно необходимо разобраться в сущности того, что она собой представляет, и с учетом этого выделить возможные пути решения данной задачи. Определений понятия «система» в общем виде в различных источниках приводится достаточно много, к примеру, в работе В.А. Воробьёва система – это совокупность взаимосвязанных устройств, выполняющих заданные функции [14]. В настоящей работе будем придерживаться такого определения: система – это обладающая целостностью совокупность

элементов, объединенных друг с другом определенной связью. При этом в качестве одного из подходов к анализу можно выделить характеристику содержания структуры системы и её изменчивости под воздействием как внешних, так и внутренних факторов. Практически все системы в общем виде обладают рядом свойств, например, такими как целенаправленность, связанность, целостность, иерархичность, многоаспектность и прочими. Также многообразна и классификация систем по различным характеристикам, в частности, они делятся на простые/сложные, открытые/замкнутые, естественные/искусственные (с управлением и без управления), статические/динамические, абстрактные/физические, стохастические/детерминированные, непрерывные/дискретные [132].

Если же говорить о делении систем на сложные и простые, то стоит отметить, что создаваемые и проектируемые системы характеризуются определенной сложностью в силу того, что состоят из большого количества элементов, высокой степени связности данных элементов и большого объема перерабатываемой информации. При этом сложность делят на функциональную и структурную. В «Общей теории систем» утверждается, что система, состоящая из большого числа разнородных элементов, соединенных нелинейными связями, приобретает новые, иногда очень неожиданные свойства, которые невозможно вывести из самого тщательного исследования отдельных элементов и связей [133]. Учитывая вышеизложенное, на наш взгляд, наиболее точное определение понятия «сложная система» дано в работе Ю.П. Сурмина: «Сложной системой называется система, в модели которой недостаточно информации для эффективного управления» [132]. Простая система может находиться лишь в исправном (полной работоспособности) и неисправном состояниях (полном отказе). В сложной же системе в этих двух состояниях могут находиться отдельные элементы системы, но в целом система может оставаться в работоспособном состоянии. Общепризнанного разграничения между

простыми и сложными системами нет, однако, говоря о сложной системе, нужно отметить, что такая система, в отличие от простой системы, должна обладать рядом свойств: робастностью, наличием неоднородных связей и эмерджентностью.

1. Робастность системы характеризует её способность сохранять частичную работоспособность в случае отказа отдельно взятых элементов или подсистем системы.

2. Наличие неоднородных связей в сложных системах обусловлено существенным количеством входящих в нее элементов, которые соединены между собой связями разных типов. Классификация данных типов включает в себя такие связи, как причинно-следственные (казуальные), пространственно-временные, структурные, информационные и функциональные.

3. Эмерджентность затрагивает вопросы наличия свойств, которые не присущи отдельным элементам системы и не являются суммой свойств этих элементов.

В данной работе рассматриваются системы, которые могут быть представлены в виде закрытых с точки зрения неопределенности систем. К ним можно отнести технические, информационные, экономические, медицинские, психологические и другие системы. При этом объектом исследования в настоящей диссертации выступает распределительная сеть, состоящая из функционально самостоятельных и взаимодействующих между собой подсистем, предназначенных для достижения конкретной цели. При этом распределительные сети бывают различных типов: тепловые, нефтепроводные, электрические, теплофикационные, водоснабжающие и т.д. В качестве рассматриваемого типа распределительной сети примем распределительные электрические сети в силу описанной ранее концепции по развитию энергосберегающих технологий в нашей стране. Распределительная электрическая сеть – это электрическая сеть,

осуществляющая передачу электроэнергии от центра питания (источника электроэнергии) к токоприёмникам (потребителям электроэнергии).

Далее стоит отметить, что любую систему можно поделить на следующие составляющие: сама система, ее подсистемы, надсистема и внешняя среда. В свою очередь система состоит из отдельных составляющих – элементов, которые могут самостоятельно осуществлять выполнение определенных заданных функций, в частности, для распределительных сетей такими элементами могут быть линии электропередач (ЛЭП), трансформаторные подстанции, генераторы и прочие. Важно отметить, что система делится на элементы условно и данное деление проводится лишь на удобном для рассмотрения в определенной конкретной ситуации уровне, то есть при делении учитывают решение конкретно заданной задачи. Другими словами, такие элементы, как трансформаторы и генераторы в одной ситуации могут быть рассмотрены как отдельные элементы системы, но в другой более удобно их объединить в один элемент, особенно в задачах проектирования. При этом отдельные элементы также могут представлять собой отдельные системы, которые в свою очередь тоже можно поделить на элементы. К примеру, линию электропередач, являющуюся элементом такой системы, как распределительная сеть, можно представить в виде отдельной системы, состоящей из следующих элементов: опор, проводов, изоляторов и прочих. Соответственно, можно сделать вывод, что, говоря о каких-либо свойствах системы или ее отдельных элементов, для простоты их можно называть объектами, если речь идет о каких-либо свойствах, не относящихся непосредственно к системам и элементам по отдельности. В качестве объектов рассматриваются сама система, подсистема или какой-либо элемент данной системы.

Говоря же о составе распределительной сети, необходимо отметить, что она представляет собой совокупность взаимосвязанных электрических сетей, узлов нагрузок, объединенных процессами производства,

преобразования, передачи и распределения электроэнергии для снабжения ею потребителей. Неотъемлемой частью системы, подлежащей анализу, следует считать структуру. Под структурой какой-либо системы подразумевается определенная организация данной системы из отдельных ее элементов, связанных между какого-либо типа связями.

Далее необходимо перейти непосредственно к основным положениям, связанным с анализом систем. Задача анализа системы подразумевает определение основных характеристик системы для рассматриваемой структуры. Рассмотрим некоторые аспекты решения задачи анализа систем с учетом системного подхода. Выделяют следующие принципы системного анализа: принцип единства, принцип связности и принцип развития. Первый принцип говорит о рассмотрении системы как целого, так и совокупности частей, из которых она состоит. Второй принцип учитывает внешние факторы при рассмотрении ее отдельных частей. Третий же принцип говорит об изменчивости и открытости системы, ее способности к расширению или, другими словами, развитию и накапливанию информации. Последний принцип имеет, на наш взгляд, весьма важное значение при анализе проектируемой системы, об этом будет более подробно написано в следующих главах работы.

Помимо основных принципов, существуют принципы, определяющие рациональный подход к рассмотрению как функционирования, так и структуры системы, это принципы: неопределенности, иерархии, измерения, децентрализации, функциональности, эквифинальности, конечной цели и прочие. Из этого перечня стоит сделать акцент на принципе эквифинальности. Он подразумевает способность системы достигать нужного итогового состояния, которое при этом не зависит от временных рамок, а зависит лишь от характеристик рассматриваемой системы. Отдельно стоит выделить принцип неопределенности, заключающийся в учете случайностей и неопределенностей в системе [121]. Данный принцип имеет

важное значение с учетом того, что неопределенность проявляется в тех случаях, когда в качестве результата определенных действий выступает набор всевозможных альтернатив и при этом неизвестна вероятность их получения. Обоснованием важности данного параметра является то, что распределительные сети являются достаточно сложными техническими объектами, которые работают круглый год на открытом воздухе и подвергаются воздействию нежелательных факторов случайного характера, таких как атмосферные осадки и прочие, что говорит о наличии неопределенности в его дальнейшем поведении. Воздействие данных факторов способствует появлению событий, которые способствуют изменению режима работы электрооборудования (элемента сети), переводя его из работоспособного в неработоспособное состояние. Всё это способствует изменению структуры сети, что в свою очередь приводит к производственным ущербам и денежным тратам, вызванным простоем оборудования.

Кроме того, стоит заострить внимание на таком понятии, как «работоспособное состояние системы». Как следует из ГОСТа [24] – это состояние объекта (например, ЛЭП, трансформаторы, подстанции и т.д.), в котором он способен выполнять требуемые функции. Здесь стоит вспомнить об известном в теории систем Законе избыточности частей системы [132], суть которого сводится к тому, что лишь около 20 % всех элементов и связей рассматриваемой системы суммарно выполняют 80 % всей работы. Это говорит о том, что для того, чтобы создать работоспособную систему, нужно включить в ее работу, помимо основных элементов и связей, составляющих лишь 20 % общего количества, также 80 % дополнительных связей и элементов, которые будут выполнять оставшиеся 20 % работы. В силу этого принципа необходимо в процессе проектирования предусматривать расход излишков энергии, вещества и, что не менее важно, информации. В целом же на работоспособность всей системы оказывает влияние не только её

структура, но и прочие взаимосвязи данной системы с внешней средой. Здесь также важно иметь представление о наличии количества информации в данной структуре, что свидетельствует о возможностях эффективного управления системой. Более подробно данный вопрос будет рассмотрен в последующем.

Основные аспекты этапов проектирования структур распределительных сетей. Подробно рассмотрев все тонкости структурного содержания распределительных сетей, перейдем к анализу современной проблематики их проектирования. Одной из важных и актуальных задач является разработка методик, позволяющих повысить качество проектирования данных систем и тем самым способствующих построению оптимальных сетевых структур. При этом важной задачей, которую решают на самих ранних этапах проектирования системы является выбор ее структуры, которая бы удовлетворяла определенным требованиям. Применительно к этапам проектирования распределительных сетей можно выделить определенную последовательность шагов, описанных в [9; 38; 56; 176].

Одним из начальных этапов проектирования распределительных сетей выступает этап структурно-параметрического синтеза, где закладываются функциональные возможности рассматриваемой системы. Он включает в себя применение математических моделей и вычислительных методов. Этот синтез состоит из таких этапов, как структурный синтез, направленный на выбор самого оптимального варианта структурной организации указанной системы, после же чего осуществляется параметрический синтез – выбор оптимальных параметров элементов рассматриваемой системы. Однако данное разделение может осложнить выбор итогового решения, т.к. решения об оптимальности принимаются сначала по структуре, а уже потом по параметрам элементов данной структуры. Более подробно данный вопрос рассмотрен в работе Д. В. Киселева [91].

В силу того, что настоящая работа не предусматривает выбора оптимальных параметров элементов структуры распределительной сети, а направлена на выявление оптимальной структуры определенных элементов с заданными параметрами, то в данном исследовании будет проводиться лишь структурный синтез с определением оптимальной структуры данной сети.

Задача выбора структуры сети, состоящей из элементов (например, в электроэнергетике в качестве данных элементов могут выступать ЛЭП), с учетом ряда показателей эффективности по своей сути чаще всего является нетривиальной задачей, первым шагом в решении которой выступает определение целевой функции. При этом решение данной задачи является частью этапов структурного синтеза распределительной сети и представляет собой довольно трудоемкий, сложно автоматизируемый и времязатратный процесс. Если говорить о проектировании распределительных сетей, то в данном случае, имея определенный план с отмеченными на нем потребителями, задача синтеза сводится к поиску оптимального набора связей между данными элементами, в том числе с учетом возможного резервирования потребителей.

Другими словами, задача выбора удовлетворяющей всем заданным требованиям структуры сети – это одна из первых и важных задач, которую решают на начальных этапах проектирования данных систем. Решение данной задачи принимается в условиях повышенного риска (вызванного человеческим и прочими факторами), в силу того, что неверное решение, то есть выбор структуры менее эффективной по какому-либо из показателей, может привести в дальнейшем к существенным издержкам, вызванным тем, что спроектированная система окажется недостаточно адекватной реальной системе.

Говоря же не столько о начальных этапах проектирования, сколько о построенной и функционирующей распределительной сети, стоит отметить

актуальность разработки методик, анализирующих качество работы данной распределительной сети с учетом процессов «старения».

Одним из возможных путей поиска оптимального набора объектов выступает ее решение как задачи классификации. В данной задаче все классы представляют собой совокупности свойств объектов, которым должны соответствовать рассматриваемые объекты, в итоге задача сводится к сравнению требуемых и рассматриваемых объектов и распределению их по классам. Вторым возможным путем для решения данного рода задачи можно назвать прямое сведение этой задачи к оптимизационной. В таком случае требуется определить граничные значения для оценки качественных характеристик указанных объектов. Для этой цели важным является путем оценки качества подмножеств в итоге осуществить выбор того подмножества, для которого будет рассчитано наибольшее значение качества. Рассмотрим в следующей главе более подробно данные способы оценки качества (или, другими словами, показатели эффективности), которые бы поспособствовали решению задачи посредством методов оптимизации.

1.2 Анализ инструментальной среды в задаче обеспечения высокого уровня надежности распределительных сетей

1.2.1 Анализ показателей эффективности в задачах построения структур распределительных сетей

При проектировании распределительной сети одной из первых задач выступает выбор её оптимальной структуры, то есть самой качественной по ряду показателей структуры. Иначе говоря, указанная структура должна обладать рядом признаков и свойств, которые бы удовлетворяли заданным потребностям с учетом назначения данной сети. Под качеством подразумеваются так называемые показатели эффективности, в частности, на сегодняшний день учитывают ряд показателей, характеризующих эффективность распределительных сетей, однако потребность в учете при

проектировании структур распределительных сетей определенных показателей более значительна в силу того, что ценность отдельных показателей не равнозначна. Это приводит к возникновению ситуаций, способствующих снижению эффективности последующей эксплуатации системы, построенной с учетом акцента на определенных показателях эффективности, сделанного на этапе проектирования.

В настоящее время при проектировании структур распределительных сетей учитывают ряд показателей эффективности, к числу которых можно отнести: безопасность, надежность, экономичность, живучесть и т.д., однако не все они равнозначны для разных видов распределительных сетей. Стоит отметить, что на практике при проектировании распределительных сетей в основном учитывают следующие показатели эффективности: надежность, экономичность и безопасность [27; 65].

Если же говорить о показателях эффективности, которые учитываются при проектировании распределительных сетей, то в данном случае учетом такого показателя, как безопасность можно пренебречь, поэтому в данном исследовании он не будет учитываться. Таким образом, будут учитываться лишь показатели надежности и минимизации затрат. Рассмотрим их более подробно.

Показатель экономичности, выражающий минимум приведенных затрат, отражает показатель использованных средств, которые были вложены в реализацию проекта. К данного рода показателю относят прибыль, себестоимость услуг по передаче единицы электроэнергии, а также рентабельность. В случае же осуществления оценки возможных решений, нацеленных на развитие распределительных сетей, используют индекс доходности, чистый дисконтированный доход, а также внутреннюю норму доходности.

Говоря же о показателе надежности, следует отметить, что данный показатель характеризует способность рассматриваемого объекта (элемента

или системы в целом) соответствовать параметрам в заданных рамках. Данные параметры при этом отражают возможности объекта выполнять заданные функции в установленных режимах и в условиях ремонта, применения, обслуживания [107; 163; 189]. Другими словами, надежность – это свойство объекта, которое сочетает в себе такой набор свойств, как: долговечность, безотказность, ремонтпригодность и прочие. При этом набор данных свойств для конкретного объекта зависит от ряда факторов, в частности, от его назначения, условий эксплуатации, внешних факторов и прочих.

Общим для всех показателей надежности является то, что все они отражают вероятностную величину выполнения установленных требований или же наступления требуемого события [109; 136; 183; 186]. Оценить надежность можно в виде контролируемой случайной величины, которую необходимо дополнить определенными границами. Показатель живучести так же, как и надежности, выражается через вероятностную величину, но их различие в том, что живучесть характеризует риски возникновения чрезвычайных ситуаций. В связи с этим выражение данных показателей в количественной форме чаще всего базируется на вероятностных моделях, учитывающих устойчивость частот возникновения событий (в нашем случае отказов).

Разница между показателем и характеристикой надежности заключается в том, что в первом случае речь идет о признаке, позволяющем оценивать надежность рассматриваемого элемента, во втором же случае имеется в виду значение данного показателя в количественной форме для рассматриваемого элемента. В диссертации Т. И. Балашовой были разработаны методы и алгоритмы, позволяющие повысить структурную надежность сетей передачи данных информационных сетей [4], в настоящем исследовании также учитываются два показателя эффективности, но

применяются несколько другие подходы к расчету количественной формы структурной надежности.

Показатели надежности, согласно зарубежным и отечественным исследованиям в области оценки надежности распределительных сетей, можно условно разделить на три вида. К первому виду относят вероятность наступления какого-либо события (аварий, отказов и т.д.). Ко второму относят математическое ожидание или среднюю продолжительность данного события (для распределительных сетей – это среднее время восстановления после отказа или среднее время между отказами). Третий вид включает число событий (отказов) в определенную единицу времени, то есть интенсивность наступления данного события [26; 139; 166].

При оценке надежности важным является этап задания так называемых нормативных требований, которые характеризуются граничными значениями надежности и зависят от ряда факторов: уровня организации эксплуатации, достигнутого технического прогресса и прочих. Как видно, данные требования с течением времени могут быть изменены с учетом модернизации используемого оборудования и ряда прочих факторов. В нашем случае в качестве нормативных требований выступают граничные значения вероятности работоспособного состояния определенного потребителя электроэнергии, о чем будем более подробно описано в следующих главах диссертационной работы.

Говоря о важности учета структурной надежности, стоит упомянуть, что согласно данным, полученным в кандидатской диссертации [13] С. В. Волкова, аварийность распределительных сетей среднего напряжения (около 10 киловольт) в нашей стране больше, чем в других странах в 5 раз. В количественном виде она составляет около 7 аварий в год на 100 километров линий электропередач для районов с умеренным климатом, а для районов с холодным климатом с соответствующими грунтовыми, в частности для районов северной части России и Сибирского федерального округа

количество аварий значительно возрастает, достигая в среднем 30 аварий год на 100 км линий. Наибольшей протяженностью распределительных сетей среднего напряжения обладают региональные, в частности сельские, энергосистемы, а также нефтегазотранспортные компании. При этом одной из актуальных задач в данном случае является постоянное поддержание работоспособного состояния таких систем с целью постоянного обеспечения электроэнергией потребителей. В случае перехода участков данных систем в неработоспособное состояние (например, из-за отказов) необходимо в кратчайшие сроки восстановить их работоспособность (устранив данные отказы).

Под надежностью понимается вероятность (число от 0 до 1) безотказной работы объекта исследования. В силу того, что речь идет о распределительной сети, которая, как было сказано в предыдущем параграфе, имеет свойство робастности, то нужно говорить не о надежности всей системы в целом, а о надежности каждого в отдельности элемента системы. Таким образом, рассмотренные ранее работоспособное P_i состояния системы, характеризующееся вероятностью того, что элемент системы будет работать безотказно, и неработоспособное Q_i состояния системы, характеризующееся вероятностью того, что элемент системы выйдет из строя, можно выразить через вероятностную величину. К примеру, вероятность безотказной работы подстанции p_i равняется 0.957 в силу того, что вероятности несовместных состояний в сумме для одного элемента системы всегда равны единице, соответственно, вероятность выхода подстанции из строя: $q_i = 1 - 0.957 = 0.043$. Также данную величину можно представить в процентном соотношении: $P_{\%i} = 95.7 \%$, $Q_{\%i} = 4.3 \%$, однако такое представление не совсем удобно при дальнейших расчетах. Кроме того, стоит понимать, что указанные вероятностные величины получаются путем расчетов с учетом анализа статистических данных. При этом основной сложностью в дальнейших расчетах выступает разграничение данных показателей. При

расчетах надежности отдельных элементов сети, к примеру, подстанций и оборудования, можно ограничиться лишь устойчивыми процессами, связанными с отказами в данной сети.

Оценки показателей надёжности и экономичности позволяют дать относительно полную информацию о качестве функционирования распределительных сетей, учитывая те условия, в которых проводится их эксплуатация. При этом в данном случае оценка лишь одного из показателей, к примеру, только лишь показателя экономичности, не может гарантировать соблюдения договорных обязательств по электроснабжению клиентов, так как в должной мере не учитывается показатель надежности.

1.2.2 Проблематика учета структурной надежности при проектировании распределительных сетей

В настоящее время при проектировании распределительных сетей делается акцент на выборе наиболее экономически выгодной структуры, то есть в большей степени учитывается описанный ранее показатель экономичности (минимум приведенных затрат), который включает в данном случае в себя стоимостные затраты на строительство сети и прочие связанные с этим денежные расходы, это обусловлено желанием сэкономить на начальных этапах проектирования. Однако если проанализировать статистику аварий [13; 114], то можно увидеть, что зачастую сэкономленные средства впоследствии приходится тратить на издержки, вызванные простоем оборудования в случае аварий, вызванных выходом из строя недостаточно надежных элементов построенной системы. Другими словами, сэкономив денежные средства на резервировании недостаточно надежных участков сети, впоследствии приходится тратить эти же средства на ремонт и издержки, вызванные простоем оборудования.

Из изложенного можно сделать вывод, что учет в большей степени показателя экономичности и пренебрежительное отношение к учету показателя надежности может привести к существенным издержкам,

вызванным устранением неполадок в случае выхода из строя объектов с недостаточным уровнем надежности, и в итоге сэкономленные средства будут потрачены на устранение данных издержек. По этой причине при проектировании следует акцентировать внимание, прежде всего, на показателе надежности системы, а не на экономичности.

Простейший пример данной задачи выглядит следующим образом: дана топографическая карта с отмеченными на ней географическими местоположениями потребителей и источника питания. Требуется запитать от заданного источника питания всех без исключения потребителей. При этом нам известны все возможные пути прокладки линий электропередач, каждая из которых обладает такими показателями, как стоимость и вероятность работоспособного состояния, рассчитанная на основе статданных. Таким образом, задача сводится к поиску оптимальной структуры по показателям экономичности и надежности.

Решение этой проблемы видится в том, чтобы при проектировании распределительных сетей, помимо экономичности, делать акцент на учете такого показателя эффективности, как структурная надежность сети, поскольку на начальных этапах проектирования учет данного показателя позволит выбрать оптимальную и надежную структуру, тем самым сэкономив на возможных издержках.

Если же говорить об учете уровня надежности уже функционирующей системы, то одним из способов обеспечения требуемого уровня надежности выступает добавление резервных элементов, то есть резервирование. Суть резервирования в электроснабжении заключается в том, что к элементу электрической сети добавляется дублирующий элемент, и в тот момент, когда исходный элемент отказывает в работе, данный резерв включается и продолжает снабжать электроэнергией потребителей, тем самым снизив возможные издержки. Путем проведения анализа и выявления наименее надежных участников структуры функционирующей системы, можно было

бы их снабдить необходимым количеством резервов, тем самым обезопасив работу всей системы в целом, что впоследствии и позволило бы сэкономить на описанных ранее издержках. Данный вопрос более подробно будет рассмотрен в третьей главе настоящей работы.

Кроме того, необходимо помнить об описанном ранее свойстве робастности сложной системы, однако применительно к системам электроснабжения это свойство не столь актуально в силу того, что в системах данного рода весьма важна работоспособность не только всей системы (распределительной сети) в целом, но также и работоспособность отдельно взятых элементов, под которыми подразумеваются потребители, запитанные электроэнергией от источника, и здесь важно упомянуть о том, что надежность энергоснабжения потребителей электроэнергии делится на 3 основные категории [119].

К первой категории потребителей относят электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь любого рода опасность для жизни людей либо значительный материальный ущерб, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства, объектов связи и телевидения, а также создать угрозу для безопасности государства или расстройство сложного технологического процесса. Вторая категория – это электроприемники, перерыв в работе которых может привести к значительному снижению отпуска производимых потребителем товаров, имеющему место в связи с этим незанятостью персонала, простоем производственного оборудования или же может сказаться на нормальной жизнедеятельности большого количества граждан. Третья категория надежности – это электроприемники, не вошедшие в первые две категории. К ней могут быть отнесены различного рода офисные здания, магазины и т.д. Для потребителей данной категории время прекращения энергоснабжения может быть не более 24 часов подряд и не более 72 часов за год суммарно.

И, как видно, важной составляющей работы распределительной сети является поддержание на требуемом уровне надежности электроснабжения данных категорий потребителей электроэнергии, то есть необходимо, анализируя уровень надежности, наблюдать за состоянием системы, а в процессе проектирования структуры распределительной сети следить за тем, чтобы определенные потребители (в особенности, относящиеся к I категории надежности) были снабжены соответствующим количеством резервов и чтобы топология была спроектирована с учетом уровня надежности всех элементов до данного потребителя включительно.

Необходимо отметить, что в задаче учета надежности в настоящее время имеются свои недостатки, один из которых заключается в том, что на данный момент довольно часто её представляют в качественной форме, затрудняющей нахождение решения. Для формализации задачи оптимизации необходимо показатели представить в количественной форме.

Классический способ расчета надежности сети основывается на экспоненциальном законе распределения случайных величин [168] (рис. 1.1):

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \approx e^{-\lambda t} = e^{-\frac{1}{t_{cp}} t} = e^{-\frac{t}{t_{cp}}}; \quad (1.1)$$

где t – общее время в невисокосный год – 8 760 ч, t_{cp} – среднее время безотказной работы.

Допустим, что если в среднем линия электропередач за год находится в неработоспособном состоянии 35 часов, то вероятность работоспособного состояния линии подряд за, к примеру, 100 часов будет следующая:

$$p(t) = e^{-\lambda \cdot t} = e^{-\frac{t}{t_{cp}}} = e^{-\frac{100}{8760-35}} = 0,989.$$

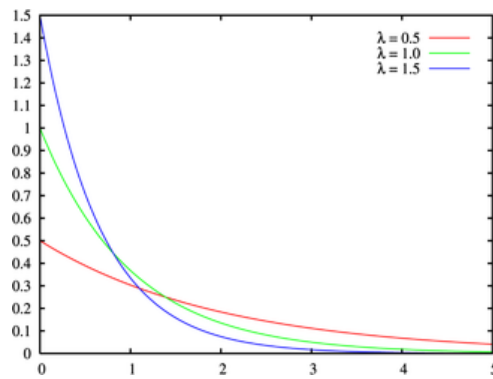


Рисунок 1.1 – Графики экспоненциального распределения

Можно выделить ряд самых применяемых показателей надежности [25; 97, 193], к числу которых относятся: средняя наработка до первого отказа $T_{\text{ср}}$; вероятность безотказной работы в течение определенного времени $P(t)$; наработка на отказ $t_{\text{ср}}$; частота отказов $f(t)$; интенсивность отказов $I(t)$; параметр потока отказов $w(t)$; функция готовности $K_r(t)$.

Но даже такое разнообразие показателей не позволяет на должном уровне «следить» за состоянием структуры распределительной сети. И здесь встает вопрос о том, чтобы анализировать поведение данной распределительной сети, ее развитие и тем самым следить за уровнем надежности, другими словами, за процессом износа или «старения» данной системы. Одним из путей решения данной проблемы может быть использование инструментов, взятых из других областей знаний.

1.2.3 Инструментальные программные средства статистической обработки данных

Как было сказано ранее, в ходе выполнения анализа эффективности работы распределительных сетей необходимо учитывать такой показатель, как структурная надежность. При этом для расчета вероятностей работоспособности элементов данной сети важно проводить исчерпывающий анализ статданных о работе и отказах аналогичных элементов за прошлые годы, тем самым иметь дело с такой областью, как Data Science [167, 185], а конкретно с интеллектуальным анализом данных – Data Mining. Соответственно, существует потребность в выборе оптимального

инструмента для этого анализа. Рассмотрим достоинства и недостатки наиболее известных сегодня инструментов, ориентированных на решение представленной ранее задачи.

В целом все программные инструменты можно поделить на два типа. Первый тип связан с анализом данных путем работы с простым и интуитивным графическим интерфейсом. К программам данного типа относят MS Excel, Statistica, SPSS, Stata и SAS. Второй тип программных инструментов направлен в большей степени на программирование, и данными инструментами могут пользоваться лишь подготовленные и имеющие специальную квалификацию специалисты. К таким инструментам можно отнести Matlab, SciPy и статистический язык программирования R. Excel неприменим в данном случае в силу его ограничений в количестве строк и столбцов.

R — открытый язык программирования для статистической обработки данных [147; 171]. Достоинства языка: открытый исходный код; гибкость; огромная, постоянно пополняющаяся, библиотека пакетов для разных сфер знаний. В качестве единственного недостатка можно выделить сложность обучения. В итоге из всех рассмотренных инструментов можно выделить R и SciPy, при этом они оба являются языками программирования, но постоянная пополняемость и расширяемость библиотеки языка R позволяет назвать данный язык более оптимальным решением. В результате можно констатировать, что сегодня одним из оптимальных средств для осуществления анализа статданных в области Data Science выступает статистическая среда R [85; 88].

1.2.4 Выявление законов распределения случайных величин

При обработке статистических данных вероятностной природы выявляются закономерности, указывающие на то, что эти данные подчиняются законам распределения случайных величин [117]. В работах [20; 103] отражены некоторые результаты применения методов выявления

законов распределения для данной области. В частности, в статье авторов Р.С. Литвиненко, П.П. Павлова и Р.Г. Идиятуллина представлен анализ практического использования основных непрерывных законов распределения случайных величин в теории надежности технических систем.

Применимость инструментов теории информации в задачах разграничения качественных показателей структурной надежности обосновывается подчинением возникновения отказов элементов распределительных сетей законам распределения случайных величин, в зависимости от типа системы, экспоненциальному, гамма, логарифмически-нормальному, нормальному или же, например, распределению Вейбулла [184], представленному на рисунке 1.2.

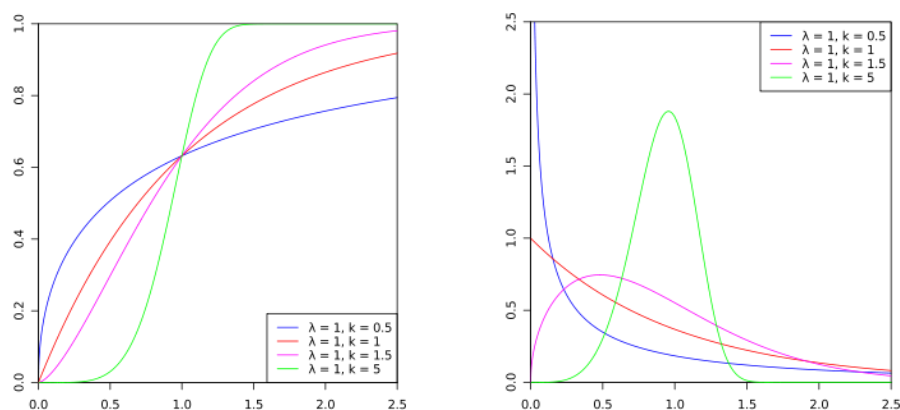


Рисунок 1.2 – Функция и плотность распределения Вейбулла

Плотность данного распределения имеет вид:
$$f(x) = \left\{ \frac{k}{\lambda} \cdot \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda} \right)^k} \right.$$

Говоря про методы выбора структур распределительных сетей, следует отметить, что при осуществлении выбора структуры из всех возможных вариантов в ходе осуществления проектирования распределительных сетей различного рода, в первую очередь учитывают такие параметры, как показатели эффективности, которые были описаны ранее. В качестве же оптимизационной задачи выступает чаще всего целевая функция и накладываемые ограничения, которые в зависимости от задачи представляются либо в виде уравнений, либо неравенств.

К числу известных методов данного анализа относят искусственные нейронные сети [170], деревья решений [179], методы ограниченного перебора, генетические алгоритмы, эволюционное программирование [125], кластерные модели, комбинированные методы и прочие. При этом при решении указанной оптимизационной задачи не исключается применимость инструментов из других сфер знаний, как было упомянуто ранее, в частности, методы определения количества информации.

При этом, как отмечалось выше, задача построения эффективных структур распределительных сетей – это выбор из имеющейся альтернативы вариантов оптимальной структуры, опираясь при этом на анализ показателей эффективности. Среди них на практике выделяют, с одной стороны, экономичность, выраженную в виде стоимостных затрат на строительство и эксплуатацию проектируемой сети. С другой стороны, в поле зрения задачи лежит структурная надежность, характеризующаяся рядом показателей, среди которых выделяют вероятность работоспособного состояния элементов и всей сети в целом. Принимая во внимание упомянутые показатели, решение данной задачи (в её классической постановке) связано с построением методики в зависимости от принятой формы целевой функции и накладываемых ограничений.

1.3 Область и особенности применения инструментов теории информации

1.3.1 Историческая справка применимости понятия информационной энтропии

Как было отмечено ранее, в силу подчинения статистических данных законам распределения случайных величин возможно использование областей для работы с вероятностными данными, в частности, одной из которых является такая область теоретической информатики, как теория

информации, ее развитие в настоящее время является одним из перспективных направлений в области информационных технологий. Это обусловлено применимостью инструментов данной теории к различного рода областям знаний в силу того, что в большинстве этих областей так или иначе сталкиваются с некоторой случайной природой воздействия извне, вызванной стохастическим поведением протекающих процессов [126; 134]. Снятие же возникших в данном случае неопределенностей посредством использования инструментов из теории информации поспособствовало бы решению конкретных задач в зависимости от области применения данных инструментов, например, привело бы к снижению уровня рисков (в областях экономики, аграрном секторе), повышению надежности различного рода систем (нефтепроводных, тепловых), в том числе электрических, потребность в поддержании требуемого уровня надежности которых значима в различного рода сферах, в том числе в аграрном секторе. Основы данной научной области описаны в работах [1; 102; 110; 181; 188].

Для начала кратко проанализируем формирование понятия информационной энтропии, которое в дальнейшем будет одним из ключевых инструментов в решении поставленной задачи.

Впервые понятие энтропии было представлено в работе Рудольфа Клаузиуса в 1865 году. Данное понятие в его работах характеризовало термодинамическую величину и использовалось в теории тепловых машин. Формула по расчету данной энтропии имела следующий вид: $d_i S = d_i Q / T$, где S – энтропия, T – абсолютная температура, $d_i Q$ – скорость изменения тепловой энергии.

В 1872 Людвиг Больцман характеризовал энтропию как меру различных микросостояний термодинамической системы, которые соответствуют макроскопическому состоянию системы. Указанная энтропия рассчитывается по формуле: $H = k \cdot \log|W|$, где H – это энтропия (в

некоторых источниках данную величину обозначают также через S); W – множество микросостояний (в некоторых источниках величину обозначают через Z); k – постоянная Больцмана, равная $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. В данном случае энтропия применима для так называемой теоретической модели идеального газа и описывает хаотичность, меру неопределенности и беспорядка анализируемой системы. В 1902 году Дж. У. Гиббсом была выведена формула расчета энтропии: $H = m_{wr}(x) \log r(x) dx$, где $r(x)$ – распределение плотности вероятности состояний, W – фазовое пространство статфизической системы.

В 1948 году Клодом Элвудом Шенноном была предложена так называемая информационная энтропия, представляющая собой энтропию дискретного распределения вероятности p_i на множестве альтернативных состояний: $H = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i$. К. Шеннон также ввел понятие информации, которая представляет собой разницу между энтропиями до и после получения сообщения: $I = H_1 - H_2$ [191; 192]. Более подробно остановимся на ней далее.

Также важно упомянуть формулу, предложенную в 1953 Александром Яковлевичем Хинчиным $H = -k \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$, где постоянная Больцмана вводится как математическая нормировка основания логарифмов, независимо от термодинамической интерпретации [140]. Модель А. Я. Хинчина более подробно будет рассмотрена в следующей главе. В 1955 году Артуром Робертом Маком была предложена комбинаторная интерпретация энтропии, как меры структурированного множества альтернатив: $n = n_1 + \dots + n_m$:

$$H = -k \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{n} \right) \ln \left(\frac{n_i}{n} \right).$$

В 1965 Андрей Николаевич Колмогоров обобщил понятие энтропии через предельное распределение вероятности, имеющее плотность $f(x)$, на эргодические случайные процессы $u(t)$ [94, 93].

В 1970 Анри Реньи ввел энтропию как b -момент меры разбиения [5; 187]: $S = (1 - b)^{-1} \ln \sum_{i=1}^n (n_i) b$.

Также стоит упомянуть о введенном в 1999 году А.М. Хазеном понятии энтропии-информации, представляющей собой обобщенное действие в механике с функцией энергии L на фазовом пространстве W . Как видно, логарифмическая величина фигурирует практически во всех предыдущих формулах расчета энтропий.

Помимо данных ученых, на становление понятия энтропии, в том числе и информационной, оказали влияние такие ученые, как Эрвин Шредингер [190], Леон Бриллюэн [7; 8], А. Н. Панченков [113; 112], П. Шамбадаль [144], И. В. Прангишвили [120], А. В. Коганов, Джон фон Нейман, А. Л. Гельгор [21], А. В. Мурыгин [110], Г. Найквист и многие другие [123]. В. Б. Вяткиным в работах [16; 17; 18; 19] и у Д. С. Чернавского в работе [142] описывается синергетический подход к определению количества информации.

Самыми применяемыми инструментами теории информации являются количество информации и информационная энтропия, взаимосвязь которых была обоснована, как упоминалось ранее, в 1948 году Клодом Шенноном. Необходимо отметить, что понятию "противоположное количество информации" им было дано наименование «информационная энтропия» лишь по причине наставления со стороны Джона фон Неймана, в последствии же была подтверждена математическая связь его энтропии с классической энтропией. Количество информации, по Шеннону, представляют собой полезные сигналы без шумов и помех, а информационная энтропия – это бесполезные сигналы, шумы и помехи.

Информационная энтропия, по Шеннону, отсутствует, когда выходные сигналы совпадают с входными, то есть по каналу связи передается максимум информации. В целом применимость данного инструмента в поставленной задаче по выражению надежности в количественном виде обосновывается, как было описано ранее, её вероятностной природой.

Взаимосвязь полезной информации и энтропии отражена в следующей формуле:

$$H + I = 1,$$

где I – это количество информации; H – это информационная энтропия (мера неопределенности информации).

Количественное обоснование данной взаимосвязи было предложено Леоном Бриллюэном в работе [8], при этом количество полезной информации в его работах именуется негэнтропией (наличие отрицательной приставки нег- (от англ. negative) свидетельствует о противоположности энтропии). В работах [116; 160; 178] приводится обоснование взаимосвязи энтропии с негэнтропией в случае изменения состояний распределительной сети. Суть этой взаимосвязи заключается в том, что изменение одной составляющей оказывает обратно пропорциональное влияние на изменение второй составляющей. В 1928 году Ральфом Винтоном Лайоном Хартли в работе [169] была представлена формула по расчету логарифмической меры информации: $H = K \log_2(M)$, однако данная формула была применима лишь в случае равновероятных событий. В середине XX века она была доработана Клодом Шенноном в работах [146; 192] и позволила рассчитывать количество информации с учетом разных вероятностей событий. Формула Шеннона имеет следующий вид:

$$I = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \text{ при условии } \sum_{i=1}^n p_i = 1,$$

где p_i – вероятность появления события $i=1, 2, \dots, n$; I – общее количество информации.

При всём этом сам Клод Шеннон считал, что данная формула применима лишь в сфере кодирования и передачи сигналов, впоследствии её применимость для других сфер была многократно доказана, а в 1982 году советским ученым Е. А. Седовым была опубликована книга «Одна формула и весь мир. Книга об энтропии», в которой обосновывается универсальность понятия энтропии [128]. Рассмотрим применимость теории информации в различных областях знаний более подробно.

1.3.2 Оценка возможностей использования теории информации в различных областях знаний

Вначале стоит упомянуть перспективность применимости данной меры в области развития «умных» сетей Smart Grid [62; 81; 165]. Рассуждая о применимости инструментов и понятий теории информации в сфере экономики, стоит упомянуть работы [80; 115; 130; 159]. В работе А. Ю. Попкова предлагается энтропийная модель инвестиционного портфеля [115], в работе К. А. Смирновой предлагаются подходы к оценке неопределенностей в экономических системах [130]. В третьей работе предлагается применение данной меры в сфере реализации сквозных технологий цифровой экономики [80]. В работе [159] предлагается использование информационной модели Винера для осуществления анализа экономических показателей.

Если же говорить об аграрном секторе и возможностях применимости инструментов теории информации в сфере агропромышленного комплекса, то здесь стоит отметить монографию Н. Н. Куницыной, в которой говорится о том, что неопределенность оказывает влияние на такие факторы, как сельскохозяйственное производство, капитал, земли сельхозназначения и труд, а также на состав и объем производимой сельхозпродукции [101]. Основными же причинами возникновения данных неопределенностей, то есть рисков, выступают погодные аномалии, гибель животных, поломки машин и оборудования и т.п. Тем не менее здесь отсутствует упоминание о

теории информации, посредством инструментов которой в перспективе можно было бы обеспечить учет данных неопределенностей (рисков) в силу того, что все вышеперечисленные причины вызваны стохастическими воздействиями извне и, следовательно, их можно выразить через вероятностную величину и в перспективе применить подход Шеннона для снятия неопределенности. Возможность применения указанного подхода к данной сфере описано в работе [155].

В статьях В. П. Малышева и С. Ш. Кажикеновой на примере области цветной металлургии обосновывается целесообразность энтропийно-информационного анализа систем с учетом подхода Шеннона, тем самым в перспективе расширяя применимость инструментов теории информации, в частности, на область аграрного сектора экономики [106; 182].

Применительно к сфере управления развитием крупномасштабных систем следует упомянуть работу О. А. Поповой, в которой предлагается новый подход к представлению неопределенности в данных для крупномасштабных систем [118]. Помимо этого, применимость инструментов теории информации также исследовалась в задачах осуществления сопоставительной оценки плановых и фактических показателей производства [152; 162], в области физики [138], в прогнозировании электропотребления [2; 141], в анализе работы сложного нестационарного динамического объекта (асинхронного двигателя) в условиях неопределенности [79; 84; 164], а также иных областях [83].

Неопределенность присутствует практически в любой отрасли знаний, поскольку, используя уже существующие инструменты по снятию данной неопределенности, можно решать проблемы различного рода.

Всё вышеизложенное говорит в пользу постоянного расширения области применения инструментов теории информации на другие сферы. Это свидетельствует о перспективности применения инструментов из данной области в решении специфических задач, в том числе из области

электроэнергетики и проектирования.

Согласно возможностям применения меры неопределенности информации приемлемы два варианта:

1. Процесс поиска наиболее вероятного макросостояния размещения элементов i в структуре стохастической коммуникационной системе. Его реализация – решение задачи о размещении элементов имеет вид (согласно Вильсону А. Дж. [10]):

$$H(p_i) \rightarrow \max ; \quad (1.2)$$

$$\sum_i p_i f(x_i) = g ; \quad (1.3)$$

$$\sum_i p_i = 1. \quad (1.4)$$

В данном случае в качестве целевой функции выступает максимизация энтропии, что не совсем подходит для решения описанной задачи выбора оптимальной структуры распределительной сети.

2. Процесс выбора совокупности элементов, состояния которых удовлетворяют предъявляемым требованиям к структуре системы. Его реализация – поиск минимума затрат в некоторой области конечномерного векторного пространства, ограниченного набором линейных и/или нелинейных неравенств:

$$\langle c, x \rangle \rightarrow \min ; \quad (1.5)$$

$$\sum_i \sum_j x_{ij} \cdot \prod_j p_{ij} x_{ij} \cdot H(p_{ij}) \leq H_i^0 ; \quad (1.6)$$

$$\sum_j p_j = 1, \quad i = \overline{1, m} \quad (1.7)$$

где $H(p_{ij})$ и p_{ij} – соответственно, энтропия и вероятность события, относящегося к элементу j в выделенной i -й части системы; H_i^0 – заданное граничное значение энтропии для i -й части системы; m – количество выделенных частей системы.

С позиции построения эффективных структур при участии энтропии наиболее перспективной из данных моделей является (1.5)–(1.7), которую предстояло построить. Её выбор обусловлен возможностями представления состояния элементов структур и заданного уровня надежности не в классической форме параметров надежности (что не позволяет их применять в задачах оптимизации), а через энтропию.

Определение величины энтропии потребовало предварительной подготовки и обработки статистики для построения ансамбля данных о состояниях элементов сети при её эксплуатации и при условии $\sum_i p_i = 1$.

Ансамбль включает в себя расчетные значения вероятностей, необходимых для предварительного определения значений энтропии каждого из элементов. При её расчете, исходя из условия безотказности, предусмотрено, что каждый элемент и вся сеть в целом могут находиться в одном из двух состояний: работоспособном или неработоспособном, а отказы элементов независимы друг от друга. Тем самым в ансамбле присутствуют p и $q=1-p$ – вероятности событий, приводящих элемент в работоспособное и неработоспособное состояния. Вероятности являются исходными данными для расчета энтропии элементов сети. В этой связи в качестве важного аспекта рассматривается вопрос выявления на ранних этапах наименее надежных участков сети, возможностей их резервирования и построения с целью повышения и обеспечения требуемого уровня надежности.

Состояние сети (её структуры) определяется сочетанием состояний элементов. Поэтому оценка структурных связей и структуры сети сведена к перебору комбинаций состояний элементов при учете потоковых процессов. В данном случае разрабатываемая методика должна предусматривать получение комбинаций работоспособных и неработоспособных состояний и расчет энтропии этих состояний. Здесь востребованы методы прямого перебора, методы минимальных путей и сечений, что обусловлено структурой сети.

Таким образом, перспективным направлением в области обработки данных и анализа надежности предусматривается применение методов и моделей теории вероятностей и математической статистики, анализа надежности, а также теории информации, составной частью которой является неопределенность информации. Этим обуславливается потребность в разработке методики.

1.4 Краткая характеристика задачи оценки состояния и выбора структуры распределительной сети

Проведенный анализ работ в области проектирования структур распределительных сетей выявил следующее:

1. Распределительные сети являются сложными техническими объектами, подвергаемыми разнообразным внешним воздействиям стохастического характера, что говорит о наличии неопределенности в их поведении. Следствием данных нежелательных воздействий являются события, меняющие режим работы оборудования, переводя его с точки зрения надежности из работоспособного в неработоспособное состояние. Обработка и систематизация информации о состояниях элементов сети пополняет знания и позволяет вырабатывать более эффективные решения по снятию неопределенности при проектировании сетей.

2. Структурная составляющая распределительных сетей обладает некоторой степенью неопределенности, вызванной влиянием возмущений извне, имеющих стохастический характер.

3. Из перечня показателей эффективности распределительных сетей основным, учитываемым при проектировании структур данных систем сегодня, выступает экономичность, направленная на минимизацию затрат при строительстве и эксплуатации данной системы.

4. В качестве одной из оценок степени эффективности проектируемой системы применяется показатель надежности, выражаемый вероятностной величиной и чаще всего представляемый в качественной форме без четкого разграничения показателей надежности на работоспособное и неработоспособное состояния, что в свою очередь не позволяет в должной степени оптимизировать проектируемую структуру с учетом методов оптимизации. Важной составляющей выступает поиск способа учета степени «старения» данной системы путем поиска «слабых звеньев».

5. Выявлено, что для осуществления оценки структурной надежности проектируемой распределительной сети необходимо ввести показатель, позволяющий в количественной форме выразить структурную надежность данной системы. В качестве количественного выражения показателя надежности представляется обоснованным рассмотреть меру неопределенности информации, взятую из теории информации. С целью обоснования применимости данного показателя необходимо разработать методику оценки состояния и выбора структуры высоконадежной распределительной сети.

Оценка существующих методов анализа структурной схемы надежности, прогнозирования интенсивности отказов и обработки статистических данных надежности, показала их применимость в исследовании. Однако, согласно ГОСТ Р 51901.5–2005, они имеют ряд ограничений в применимости, поэтому должны быть адаптированы к новым требованиям анализа надежности сложных объектов, например, таких как системы электроснабжения.

Основными задачами исследования выступают, во-первых, анализ возможности повышения качества выбора структур распределительных сетей посредством разграничения качественных показателей надежности данных систем и выражения их в количественной форме с помощью инструментов теории информации, в частности, меры неопределенности информации.

Во-вторых, разработка методики оценки состояния и выбора структуры высоконадежной распределительной сети, состояние которой характеризуется количественными характеристиками энтропии, в основе которых лежат показатели надежности.

В-третьих, апробация разработанной методики на вычислительных процедурах, в частности, на процедуре для выбора оптимальных структур распределительной сети с учетом ряда показателей эффективности. И на процедуре, позволяющей, учитывая меру неопределенности информации, производить анализ уже функционирующих распределительных сетей с целью выявления в ней «слабых звеньев» с последующим добавлением в сеть необходимого количества резервных элементов.

Для реализации поставленной в работе цели исследования необходимо учитывать, что задача выбора структуры распределительной сети предусматривает создание методики вычисления, а также наличие статистических данных, необходимых для расчета таких показателей, как средняя наработка на отказ, интенсивность отказов, среднее время восстановления и др. К рассчитываемым показателям надежности отнесены вероятность безотказной работы и вероятность отказа. Последние относятся к мере вероятности и приняты для расчета энтропии.

Выводы по первой главе

1. Рассмотрено структурное содержание такой технической системы, как распределительная сеть, выявлена потребность в разработке новых моделей, методик и алгоритмов построения данных сетей, учитывающих стохастическое воздействие на систему извне.

2. Проанализированы основные показатели эффективности распределительных сетей, в результате чего выделены два основных показателя, необходимых при оценке состояний и выборе распределительных сетей. При этом выявлено, что доминантой в силу

важности её значимости при дальнейшей эксплуатации построенных структур выступает структурная надежность системы.

3. Установлено, что в настоящее время в силу важности снижения долгосрочных издержек, вызванных выходом из строя недостаточно надежных элементов структур распределительных сетей, имеется потребность в ходе проектирования данных структур делать акцент в большей степени на выборе более надежных структур с более высоким уровнем структурной надежности. Проблема заключается в выражении данной величины в количественной форме.

4. Выявлены недостатки в учете при проектировании сетей структурной надежности, для устранения которых, на наш взгляд, требуется обратиться к такой области наук, как теория информации, в частности, использовать ее инструмент в задачах вычисления структурной надежности в количественной форме, в силу того, что использование лишь качественной формы не позволяет применять в ходе расчетов методы оптимизации.

5. Проведен анализ исторического формирования теории информации и возможности ее учета в задачах формирования сетевых структур. Рассмотрены известные подходы к расчету количества информации и возможности применения классической информационно-энтропийной меры Шеннона в определении количества информации. По результатам анализа делается вывод о перспективности применения подходов Ральфа Хартли и Клода Шеннона к определению количества информации и возможности применения данных инструментов в области электроэнергетики. В результате обосновывается разработка методики оценки состояния и выбора структуры высоконадежной распределительной сети для решения поставленной задачи.

2 Разработка методики оценки состояния и выбора структуры высоконадежной распределительной сети

В данной главе производится разработка методики расчета энтропии и представлена её апробация в сопоставлении с методом вычисления вероятностных характеристик задачи построения эффективной структуры распределительной сети. Реализуется целевая функция и строится система ограничений в виде неравенств. Проводится оценка известных методов оптимизации, в результате которой выбирается наиболее эффективный метод для решения сформулированной оптимизационной задачи. Предлагается собственная вариация модернизированного метода оптимизации на основе метода «ветвей и границ», учитывающего два показателя эффективности: структурную надежность, выражающую накладываемые ограничения, и стоимостную экономичность, выражающую целевую функцию. Делаются выводы о потребности в создании менее громоздкой вариации решения поставленной оптимизационной задачи, при этом используются инструменты, взятые из такой области, как теория информации. Рассматриваются различные подходы к определению количества информации и проводится анализ разработанных методов определения количества информации, содержащейся в распределительной сети, с целью выбора оптимального метода.

2.1 Формализация задачи поиска оптимальной структуры распределительной сети

2.1.1 Графическая интерпретация распределительной сети

Одним из возможных путей решения проблем, связанных с выбором структур распределительных сетей различного рода, является формализация задачи оптимизации с последующим решением ее посредством специализированных инструментов. Для начала необходимо обосновать суть

решаемой задачи, а уже затем провести анализ известных на сегодняшний день методов оптимизации для выявления оптимального решения поставленной задачи.

Как было описано ранее, при строительстве различного рода распределительных сетей одним из наиболее важных моментов является выбор на этапе проектирования оптимальной структуры из всех возможных с учетом расположения потребителей и показателей эффективности. В связи с этим актуальной является разработка методик по анализу и выбору оптимальных структур по критерию экономичности с ограничениями по такому показателю эффективности, как надежность. Но для того чтобы проверить достоверность и продуктивность разработанных методик, необходимо произвести проверку, то есть построить структуру с учетом предложенной методики. Однако в реальности это неоправданно рискованно, в силу того, что если методика окажется ошибочной, то применившие её компании могут понести огромные издержки. В связи с этим актуальным является осуществление имитационного моделирования с возможностью многократной проверки разработанных методик без риска получения ущерба.

Другими словами, в решении задачи по проверке новаторских методик, направленных на поиск оптимальной структуры распределительной сети, одним из важных моментов выступает осуществление имитационного моделирования. Для этого необходимо представить модель рассматриваемой структуры и, используя современные программные инструменты, осуществить проверку разработанной методики на продуктивность в сравнении с классическими методами.

Для начала нужно выбрать наиболее удобный способ визуализации рассматриваемой распределительной сети. Допустим, требуется запитать некоторое количество потребителей от общего источника энергии, при этом каждый из них обладает некоторой величиной вероятности робастности участка сети, по которому элемент (потребитель) снабжается

электроэнергией от источника питания. Все элементы системы нанесены на так называемую топографическую карту, представляющую собой географическую карту универсального назначения с изображенной на ней местностью, на которой планируется построить распределительную сеть и, соответственно, есть возможность определить маршруты прокладки электролиний. Помимо этого, изначально необходимо знать значения цен и вероятностей безотказной работы всех линий сети, которые связывают элементы сети (потребителей) между собой. Стоимость линий представлена в прейскурантах специализированных магазинов, а вероятности безотказной работы элементов данной сети можно рассчитать, имея базу статистических данных по отказам аналогичных элементов за несколько лет.

Для дальнейшей разработки методики необходимо обратиться к такой области, как теория графов [57; 58] и исследуемую распределительную сеть представить в виде графа. В целом под термином граф (G) подразумевается совокупность двух конечных множеств, множества V , содержащего n вершин точек и множества W , содержащего m неупорядоченных пар вершин [6]. Изображение распределительной сети в виде графа повторяет графическое изображение схемы, но без детализации элементов, из которых состоит данная сеть. Вершины данного графа (узлы) соединяются непрерывными линиями (ребрами). Под элементами распределительных сетей, которые моделируются ребрами графа, подразумеваются: линии электропередач (ЛЭП), батареи конденсаторов, трансформаторы, реакторы и тому подобное, а в качестве узловых точек данной сети выступают шины электрических станций и подстанций.

Два ребра кратны (параллельны), если они имеют одну и ту же пару конечных вершин. При этом для области энергетики данные ребра считаются резервирующими, то есть теми, по которым будет протекать ток в случае отказа основной линии электропередач. Ребро графа называется петлей, если

она начинается и оканчивается в одной и той же вершине, однако в данном исследовании мы ими пренебрегаем.

В данном случае мы имеем взвешенный граф и в качестве весовых коэффициентов данного графа выступают сразу два значения, первое – это стоимостные затраты на возведение данного элемента (к примеру, ЛЭП), второй – это вероятность его работоспособного состояния. При этом графы бывают ориентированные и неориентированные. Представление в форме ориентированного графа, в частности, структурной схемы, расширяет информацию о модели в силу того, что информация о направленности связей графа является весьма важной для задач анализа и синтеза. При этом в силу специфичности исследования необходимо визуально отображать направление электрического тока от источника до приемников, поэтому в дальнейшем будем изображать распределительные сети в виде ориентированного (направленного) графа.

Что касается конфигурации распределительных сетей, то они могут быть разомкнутыми (радиальными и магистральными) или замкнутыми, при этом разомкнутая радиальная схема больше по длине и на реализацию данной схемы потребуется больше оборудования, в частности, опор, коммутационного оборудования, проводников и изоляторов, то есть ее возведение дороже возведения магистральной схемы.

При выходе из строя любого промежуточного участка разомкнутой магистральной сети следующие за ним участки сети окажутся отрезанными от источника питания, что также приведет к издержкам, всё это говорит о меньшей надежности данной сети. По этой причине на практике чаще применяются комбинированные схемы распределительных сетей – резервные распределительные сети. В данном случае сети делают по резервным схемам, одновременно используя и радиальную, и магистральную схемы для создания наиболее надежной системы обеспечения потребителей электроэнергией. Вершинам в нашем случае соответствуют конечные узлы

(потребители электроэнергии) и источник питания, а рёбрам – физические связи между вершинами (ЛЭП). Для моделирования топологии схем распределительных сетей используют матричные модели, отображающие свойства графов.

В итоге исследуемая структура сети будет представлена в виде ориентированного взвешенного графа $G = (U, X)$, отображающего связи источника энергии со всеми потребителями. В данном графе U – множество вершин, которые имитируют потребителей в количестве m и источник энергии u_0 ; X – множество ребер, имитирующих связи между элементами структуры. Каждое ребро отображает элемент x_i и каждому ребру i приписаны: p_i – вероятность появления события (меняющего состояние элемента) и c_i – стоимость i -го элемента. Каждой вершине u_l ($l=1, 2, \dots, m$) приписана граничная величина требуемого значения надежности [77]. На рисунке 2.1 представлен пример данного графа.

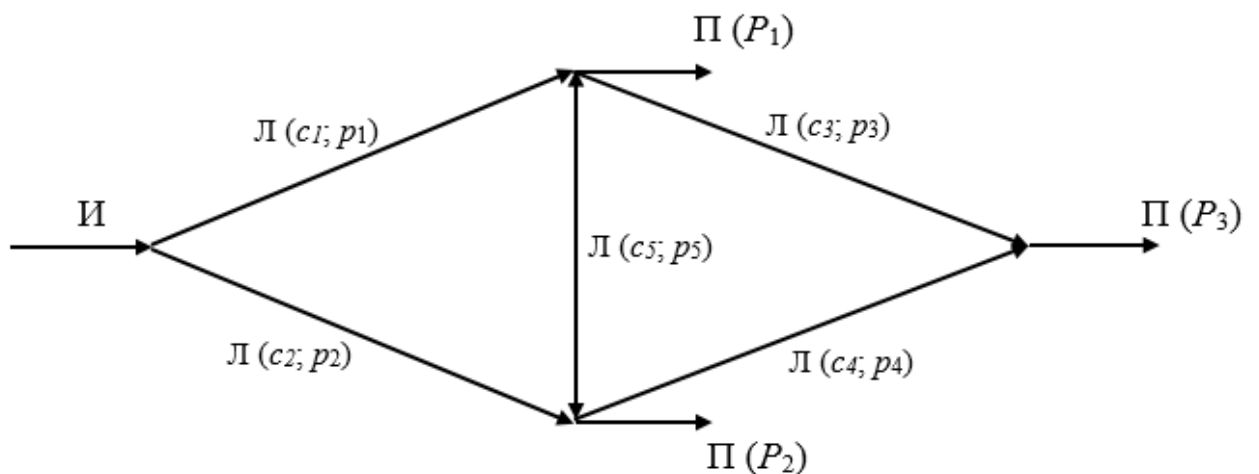


Рисунок 2.1 – Распределительная сеть, представленная в виде графа

На предварительном этапе подготовки исходных данных мы не можем построить оптимальную структуру распределительной сети в силу того, что имеем дело с избыточной структурой (с излишним числом элементов), которую можно представить в виде графа, близкого по свойствам к полносвязному графу. При этом в данном случае следует ориентироваться на построение резервированных конфигураций схем сетей.

В нашей модели мы будем ориентироваться на построение резервированных конфигураций схем сетей. При этом в случае решения задачи по поиску оптимальной структуры будем учитывать замкнутые сети, в случае же решения задачи по анализу структуры распределительной сети будем использовать радиально-магистральную конфигурацию схемы сети. Весьма важным при выборе данного рода структур сетей является найти баланс, то есть ту оптимальную структуру, которая была бы и достаточно надежной, и максимально дешевой, для этого необходимо сформулировать целевую функцию и ограничения для модели.

Описав модель электрической сети, перейдем непосредственно к анализу инструментов, позволяющих проводить имитационное моделирование систем данного рода. При этом стоит помнить, что один из важных показателей, которые необходимо учитывать при проектировании электрических сетей – показатель надежности, являющийся своего рода вероятностной величиной. Если же говорить о предлагаемых нами способах расчета данной надежности через инструменты теории информации, что является новаторским решением описанной проблемы, то важно сделать акцент на том, что для анализа различных методик по расчету надежности необходимо, чтобы в ходе имитационного моделирования был выполнен сравнительный анализ. Другими словами, необходимо, чтобы программный инструмент, осуществляющий имитационное моделирование нашей системы, позволял проводить анализ результатов при проектировании классическим методом и новым методом с учетом расчета структурной надежности.

К программным средствам, позволяющим производить моделирование распределительных сетей, можно отнести: Matlab/Simulink, VisSim, GNU Octave, AnyLogic, EASY5 и прочие. Особое внимание стоит обратить на программный комплекс Matlab/Simulink, который в настоящее время является одним из наиболее популярных. В работе А. С. Семёнова обосновывается использование данного программного

продукта для математического моделирования распределительных сетей различного рода [129].

2.1.2 Формирование целевой функции и ограничений задачи

Далее перейдем к формированию целевой функции и ограничений оптимизационной задачи. В нашем случае в качестве целевой функции следует выбрать функцию, отражающую минимизацию экономических затрат. Данные затраты включают в себя расходы на строительство, ремонт и прочие денежные траты на начальных этапах построения электрической сети. Допустим на рисунке 2.1 все денежные ресурсы на возведение элемента 1 составляют 200 тыс. рублей, обозначим данную величину c_1 ; для элемента 2 – 100 тыс. рублей и для элемента 3 – 300 тыс. рублей. Как видно, общая сумма на возведение данной системы будет равна $C = 200 + 100 + 300 = 600$ тыс. рублей. В случае выбора структуры без элемента 3 стоимость станет равной 300 тыс. руб. В итоге итоговая целевая функция будет иметь следующий вид:

$$c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3 \rightarrow \min;$$

$$\sum c_j x_j \rightarrow \min;$$

где x_j может принимать значения 1 или 0, означающие наличие или отсутствие элемента j в структуре сети; c_j характеризует величину стоимости элемента.

Решение данной целевой функции направлено на получение наименьших затрат при выборе структуры распределительной сети.

Вначале формируется система ограничений для создаваемой модели. В число ограничений входят неравенства, каждое из которых характеризует вероятность, измеряемую от 0 до 1, работоспособного состояния $P(k,l)$ связи источника энергии k с потребителем l , тем самым отражая её структурную надежность:

$$\begin{cases} P(k,2) \geq P_2; \\ P(k,3) \geq P_3; \\ \dots \\ P(k,l) \geq P_l; \end{cases}$$

где $P(k,l)$ – вероятность работоспособного состояния линии $k-l$, по которой потребитель l запитывают электроэнергией; P_l – принятое значение вероятности в обеспечении бесперебойного снабжения потребителя l электроэнергией, учитывающее максимально возможное количество часов отсутствия электроснабжения с учетом категории надежности потребителя l ; k – источника питания; l – потребитель электроэнергии.

В итоге можно сформировать оптимизационную задачу:

$$\sum c_j x_j \rightarrow \min; \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} P(k,2) \geq P_2; \\ P(k,3) \geq P_3; \\ \dots \\ P(k,l) \geq P_l; \end{cases} \quad (2.2)$$

где $x_i = [0;1]$; c_i – стоимость элемента, выраженная в валюте; l – номер потребителя энергии; k – номер источника питания; $P(k,l)$ – вероятность работоспособного состояния цепи элементов, по которой потребитель l снабжается энергией; P_l – установленное значение вероятности в обеспечении бесперебойного снабжения потребителя l энергией, учитывающее максимально возможное количество часов отсутствия энергоснабжения с учетом категории надежности потребителя l .

Реализация задачи (2.1)-(2.2) включает в себя целевую функцию минимизации средств на строительство сети, а также систему ограничений. Последние представлены в форме неравенств, каждое из которых характеризует вероятность работоспособного состояния $P(k,l)$ связи источника энергии k с потребителем l , тем самым отражая её структурную надежность.

Порядок решения данной задачи:

1. Составляется граф $G(U, V)$: U – вершины; V – дуги (элементы сети).
 2. Выделяются источник k и потребители l . Последним приписываются граничные вероятности P_i работоспособного состояния вершин (узлов сети). Каждой дуге графа G принадлежит вероятность работоспособного состояния элемента сети, полученная на основе статистических данных об отказах. Кроме этого, каждой дуге приписывают прогнозируемые затраты на строительство линии.

3. По методу минимальных путей от k к l формируется матрица инцидентности V в следующем порядке:

- дугам присваиваются значения вероятностей работоспособного состояния p_{kl} по правилу:

$$p_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{если } k=l; \\ p_{kl}, & \text{если в наличии связь } k-l; \\ 0, & \text{если } k-l \text{ отсутствует.} \end{cases};$$

- матрица V возводится в квадрат на основе теорем о сложении и умножении вероятностей;
- полученная матрица инцидентности V возводится в степень g ;
- возведение в степень матрицы прекращается тогда, когда данное возведение перестанет менять свой состав. При этом вероятность, присущая пути от элемента k к l будет описываться выражением:

$$P(k,l) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i \leq f} P(A_i \cap A_f) + \sum_{i \leq f \leq h} P(A_i \cap A_f \cap A_h) - \dots + (-1)^{w-1} P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_w),$$

где A – элемент сети, i, f, h, w – индексы элементов сети.

В итоге матрица будет иметь левые части системы (2.2), как функции вероятности путей графа.

4. Целочисленная задача решается методом ветвей и границ, хотя и не единственным при построении оптимальной структуры.

Важное место в решении данной задачи занимают полученные функции матрицы инцидентности V . Однако здесь присутствует ряд недостатков, затрудняющих её применение: наличие громоздких нелинейных левых частей системы (2.2); возможное несоответствие правых частей неравенств реальным требованиям соблюдения уровня обеспечения надежности; появление недостоверных результатов расчета на ЭВМ с плавающей точкой (утвержденной в стандарте IEEE 754) по причине наличия сложных функций $P(k,l)$, в которых значения вероятностей P близки к 1 и 0. Тем самым применение этой процедуры уместно только при наличии малого числа элементов в структуре из-за проблемы «проклятия» размерности.

Пример. Допустим, необходимо запитать троих потребителей от одного определенного источника электроэнергии, причем каждый из них обладает некоторой величиной вероятности робастности p участка сети, по которому элемент снабжается электроэнергией от источника питания. При этом данный граф будет иметь вид мостиковой схемы. Помимо этого, изначально следует знать значения вероятностей безотказной работы, получаемые в ходе анализа статистических данных, и стоимости всех линий сети, которые связывают между собой элементы сети (потребителей электроэнергии). Пример модели данной схемы распределительной сети представлен на рисунке 2.2.

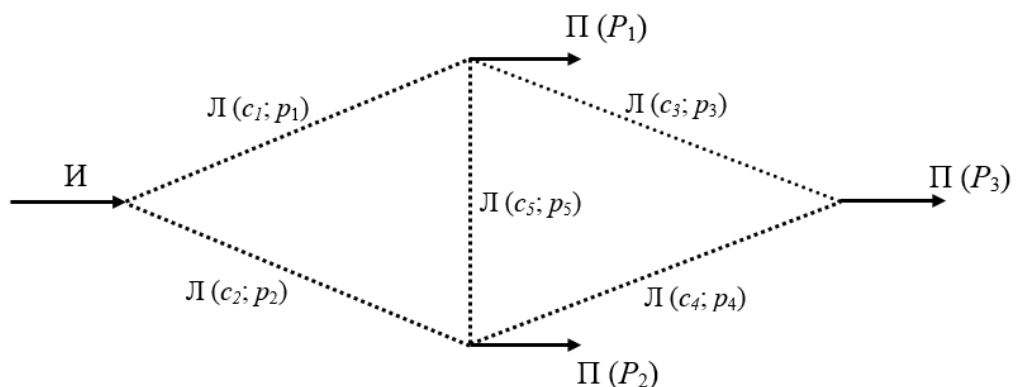


Рисунок 2.2 – Модель мостиковой схемы распределительной сети: И – источник электроэнергии; П – потребители электроэнергии; Л – линии электропередач.

Стоит отметить, что каждый потребитель Π имеет рассчитанную требуемую вероятность работоспособного состояния (P_l) с учетом категории надежности. А каждая линия L имеет два показателя: стоимость (c_i) и вероятность работоспособного состояния (p_i). При этом задача сводится к определению оптимального маршрута прокладывания линий L с минимизацией затрат и поддержанием на нужном уровне надежности электроснабжения каждого из потребителей. В таком случае целевой функцией является выражение (2.1), решение которого направлено на получение наименьших затрат при выборе структуры распределительной сети, а в число ограничений (2.2) входят неравенства, каждое из которых характеризует вероятность работоспособного состояния $P(k,l)$ связи единственного источника энергии k с потребителями 1–3:

$$\sum c_j x_j \rightarrow \min;$$

$$\begin{cases} P(k,1) \geq P_1; \\ P(k,2) \geq P_2; \\ P(k,3) \geq P_3. \end{cases}$$

В итоге решение задачи сводится к выбору структуры системы, удовлетворяющей требованиям по надежности и экономичности. Реализация модели (2.1)–(2.2) представляет собой достаточно сложную задачу. Для реализации системы неравенств (2.2) можно применить метод минимальных путей, который применяют при работе с графами. При этом все минимальные пути прокладываются от k до l и тем самым позволяют определить вероятность работоспособного состояния $P(k,l)$. Следующим шагом является выбор метода оптимизации, который бы способствовал решению данной задачи.

2.2 Выбор метода решения задачи построения структур распределительных сетей

Как было упомянуто ранее, при выборе различного рода распределительных сетей специалист по проектированию ранжируют варианты структур с учетом ряда известных показателей эффективности, в их число входят надежность, экономичность, безопасность и прочие. На практике чаще всего руководствуются в большей степени учетом показателя экономичности, то есть из всех возможных вариантов структур выбирают самую экономически выгодную. Однако недостаточный учет уровня надежности может привести к тому, что сэкономленные деньги будут потрачены на вызванные выходом из строя элементов недостаточно надежной сети экономические издержки. В связи с этим актуальным является разработка методик, способных решить задачи оптимизации по показателям надежности и экономичности. В перспективе имеет смысл добавить в задачу показатель безопасности, однако в нашем исследовании данный показатель не учитывается. Математической основой решения указанной задачи является теория оптимизации [1], при этом для возможности применения численных методов данной теории и математических результатов расчетов необходимо установление определенных границ системы, которую планируется оптимизировать. Помимо этого, необходимо установить количественный показатель, на основе которого и будут анализироваться все возможные варианты в поисках наилучшего, а также построить модель, отражающую взаимосвязь между переменными. Эта последовательность шагов определяет постановку задачи оптимизации.

С целью определения оптимального метода оптимизации для решения задачи (2.2) необходимо рассмотреть в целом классификацию известных методов оптимизации, применяемых на практике, и выбрать наиболее подходящий.

Методов оптимизации на сегодняшний день существует очень большое количество, это обосновывается разнообразием общей записи задач оптимизации [98; 111; 145]. От класса задачи зависит подбор метода. Классификация задачи определяется через целевую функцию и допустимую область, описанные ранее. При этом методы имеют достаточно расплывчатое деление на группы, но в целом к числу методов оптимизации относят условную и безусловную оптимизацию, линейное и нелинейное программирование (метод Ньютона, метод неопределенных множителей Лагранжа), динамическое программирование (принцип Беллмана), комбинаторную оптимизацию и всё более популярную стохастическую оптимизацию (генетический алгоритм, методы Монте-Карло и имитации отжига) и прочие. Также выделяют венгерский алгоритм, алгоритмы поиска на графах: информированные (альфа-бета-отсечение, RBFS и т. д., то есть методы, основанные на эвристическом поиске) и неинформированные (поиск в глубину и ширину и прочие)). В целом упомянутые методы можно разбить на три подгруппы: детерминированные; стохастические (случайные) и комбинированные. В ряде работ представлены обзоры известных методов оптимизации для различного рода задач, в частности, в статье Ю. В. Кольцова демонстрируется сравнительный анализ методов оптимизации для решения задачи интервальной оценки потерь электроэнергии [96], в статье же Е. М. Захарова представлен обзор методов многомерной оптимизации [55]. В диссертационной работе Д. А. Зорина [59] проведен анализ методов оптимизации для решения задачи построения вычислительных систем, удовлетворяющих требованиям по надежности и использующих наименьшее число аппаратных ресурсов для выполнения прикладной программы за время, не превышающее заданного. В результате выявлена потребность в использовании стохастического метода имитации отжига, однако задача, поставленная в диссертационной работе несколько отличается от данной в связи с этим применимость данного метода не столь очевидна.

Несмотря на столь большое разнообразие методов оптимизации, необходимо сузить данный перечень до минимума и искать оптимальный метод для решения сформированной ранее оптимизационной задачи. Говоря о выборе из всего этого многообразия методов наиболее подходящего, следует понимать, что сформулированная ранее задача относится к классу целочисленных комбинаторных задач. Обосновывается это тем, что при увеличении количества элементов в сети и её сложности выбор оптимальной структуры сети становится нетривиальной комбинаторной задачей с плохо формализуемыми требованиями [4].

Для не слишком массивных систем, имеющих количество потребителей не более 20–30, применимы точные методы, например, метод полного перебора, позволяющий путем перебора всех вариантов структур найти оптимальный, но в нашем случае применение данного метода нецелесообразно по причине чрезмерных вычислительных и временных затрат, также можно отметить венгерский метод и метод направленного перебора. Если же имеется значительное количество потребителей, то данная задача относится к NP-полной, то есть её решение точными методами практически невозможно в силу чрезмерной вычислительной нагрузки. Для решения задачи такого рода применяются эвристические (стохастические) методы оптимизации. В их число входят: эволюционные алгоритмы, метод имитации отжига, муравьиные алгоритмы, метод Монте-Карло и прочие. Из этих методов наиболее подходящими для решения нашей задачи являются генетический алгоритм и метод имитации отжига. Первый примечателен тем, что основан на последовательном подборе, комбинировании и вариации параметров путем в некоторой степени моделирования процесса естественного отбора, то есть биологической эволюции [22]. Популярность же метода имитации отжига обусловлена использованием упорядоченного случайного поиска, аналогичного процессу образования в веществе кристаллической структуры с минимальной энергией при охлаждении [174].

Данные методы оптимизации являются одними из наиболее популярных сегодня, но при этом общими недостатками обоих стохастических методов является сложность их программной реализации в среде Matlab/Simulink, а также то, что при малом количестве потребителей данные методы будут менее эффективны, чем точные комбинаторные методы, поскольку не дают точного решения задачи, и их применение целесообразно лишь при значительных вычислительных нагрузках, когда точные методы не могут быть использованы. Соответственно, использовать их для проверки применимости разрабатываемой методики не совсем корректно в силу возможностей неверной интерпретации полученных результатов в ходе расчетов. Однако в случае решения аналогичной оптимизационной задачи, но при значительном количестве потребителей, следует применять данные методы.

Среди комбинаторных методов наиболее известным является метод «ветвей и границ» (англ. branch and bound), также являющийся информационным. Данный метод – один из наиболее известных методов оптимизации, впервые предложенный для решения задач целочисленного программирования в 1960 году Аилсой Ленд и Элисон Дойг [177]. Он представляет собой общий алгоритмический метод поиска оптимальных решений для задач оптимизации различного рода. Чаще всего его применяют для решения комбинаторной и дискретной оптимизации.

Его алгоритм сводится к решению задачи, представленной структурой в виде дерева ветвления, которое позволяет разбить всё множество решений задачи на непересекающиеся подмножества. После разбиения на данные подмножества осуществляется полный перебор с параллельным отсеком тех подмножеств, которые заведомо не содержат оптимальных по ряду показателей решений задачи, то есть осуществляется направленный перебор множества всех вариантов решений поставленной задачи. Достоинство данного метода перед полным перебором видится в наличии границ,

позволяя отсекаать нерентабельные подмножества, что существенно ускоряет процесс поиска решения путем сужения области поиска оптимальных решений задачи. Допустим, целевая функция направлена на минимизацию, и в случае, если верхняя граница определенного подмножества меньше нижней границы целевой функции, то данное подмножество можно отбросить поскольку на нем минимум не будет достигнут.

Одним из способов проверки метода оптимизации на практике является решение с его помощью какой-либо NP-полной задачи. Из всех NP-полных задач следует выделить задачу коммивояжера (англ. travelling salesman problem), которая по своей сути в некоторой степени похожа на задачу по поиску оптимальных структур распределительных сетей, но с некоторыми оговорками. Суть задачи коммивояжера сводится к поиску самого выгодного (по стоимости или длине) маршрута коммивояжера в ходе объезда заданных городов, при этом коммивояжер должен побывать в каждом минимум один раз и в конце вернуться в город, с которого начинался его путь. Различие данной задачи с нашей в том, что в нашей же задаче возвращение в источник питания не требуется.

Применимость метода ветвей и границ для решения данной NP-полной задачи была математически доказана в 1963 году учеными Дж. Литтлом, К. Мурти, К. Кэролом и Д. Суини, которыми был разработан алгоритм, получивший название алгоритма Литтла [180]. С математической точки зрения в задаче коммивояжера ставится задача формирования оптимального маршрута объезда заданного числа городов (n) и требуется найти наилучший из $(n-1)!$ вариантов по критерию времени, стоимости (или расстоянию) маршрута.

Данная задача связана с определением минимального гамильтонова цикла. Множество всех решений представится в виде связного графа без циклов и петель, где вершины графа представляют собой подмножества частично упорядоченных вариантов всех возможных решений, а корень

графа объединяет все множество вариантов. К примеру, подмножество всех путей для вершины (x, y) должно содержать ребро (x, y) . В силу того, что разбиение графа на подмножества аналогично ветвлению дерева, то данный метод также называют методом поиска по дереву решений.

Единственным незначительным недостатком применения вышеуказанного метода можно назвать то, что в случае слишком большого количества потребителей перебор вариаций структур с отсечением будет иметь факториальную сложность, что также будет затруднительно рассчитать даже на современной вычислительной технике. Однако учитывая темпы технического прогресса и развитие данной техники, то данный недостаток в недалеком будущем может сойти на нет.

Алгоритм метода «ветвей и границ»:

1. Вначале выполняется решение задачи без учета целочисленности, методами линейного программирования, в зависимости от задачи.
2. Задание множества с учетом дополнительных ограничений.
3. Вычисление оценок (границ).
4. Поиск решения двух задач с ограничениями.
5. В случае не удовлетворения условиям целочисленности осуществляется ветвление и повтор этапов. Отсутствие решения говорит о неразрешимости задачи.

Рассмотрим далее ряд работ, включающих в себя применение данного метода оптимизации. В работе А. Н. Антамошкина и И. С. Масича представлена реализация данного метода для решения задачи псевдобулевой оптимизации, в которых функции предполагаются заданными алгоритмически и исследуется алгоритм нахождения точного решения задачи [3]. Решение данным методом задачи о ранце представлено в статье Р. М. Колпакова и М. А. Посыпкина [95]. В работе Я. Е. Львовича и И. Л. Каширина этот метод применяется для многокритериальной задачи повышения надежности резервирования, что достаточно близко по тематике

нашему исследованию [104]. В работе же В. В. Сафронова предложена методика оптимизации структуры сложных технических систем в условиях риска на основе метода ветвей и границ по критерию, заданному интервалом возможных значений [127].

Математическое решение задачи методом ветвей и границ имеет следующий вид:

$$\max F = \sum_{j=1}^n c_j x_j; \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i; \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}; \quad x_j \geq 0;$$

где x_j – целые числа.

В таблице 2.1 представлен сравнительный анализ известных методов оптимизации.

Таблица 2.1 – Сравнительный анализ методов оптимизации

Метод оптимизации	Скорость	Точность	Выборка
Метод полного перебора	-	+	-
Метод направленного перебора	-	+	-
Метод «ветвей и границ»	+/-	+	+
Метод имитации отжига	+/-	+/-	+
Генетический алгоритм	+/-	+/-	+
Алгоритм пчелиного роя	-	-	+/-
Муравьиный алгоритм	-	+/-	+/-
Венгерский алгоритм	-	+/-	-

Результаты анализа методов оптимизации, способных решать задачи оценки состояний и выбора структур распределительных сетей, свидетельствуют о том, что при работе с достаточно массивными системами эвристические методы более предпочтительны. В случае оценки рентабельности применения нашей новаторской методики, акцент делается на необходимости проверки гипотезы о применимости меры неопределенности информации в качестве показателя, выражающего уровень структурной надежности распределительной сети в количественной форме. В этом случае данные методы не подходят, так как не дают стопроцентно

точных результатов и могут ошибочно показать низкие результаты применения новой методики [63]. Следовательно, в качестве оптимального метода проверки методики эффективен метод «ветвей и границ», а в расчётах, имеющих дело с большой размерностью системы, целесообразнее применять эвристические методы оптимизации.

2.3 Решение задачи построения оптимальной структуры с учетом соблюдения требуемого уровня надежности

Для реализации системы неравенств (2.2) можно применить метод минимальных путей [175], который чаще всего используют при работе с графами. При этом все минимальные пути прокладываются от k до l , способствуя тем самым определению его вероятности работоспособности $P(k, l)$.

С целью реализации метода оптимизации требуется представить исходную распределительную сеть в виде графа. При этом следует отметить, что на начальном этапе имеется лишь карта с обозначенными на ней элементами сети, затем строят граф $G(U, V)$, в котором U – элементы сети, а V – их связи.

Матрица инцидентности связей V (столбцы соответствуют дугам, а строки – вершинам) составляется по методу минимальных путей от источника k к потребителям l с определением вероятности пути $k-l$ по алгоритму:

1. Элементам сети присваиваются значения вероятностей работоспособного состояния p_{kl} согласно следующему правилу:

$$p_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{если } k = l; \\ p_{kl}, & \text{если в наличии связь } k-l; \\ 0, & \text{если связь } k-l \text{ отсутствует.} \end{cases}$$

2. На следующем шаге производится возведение матрицы V в квадрат, при этом необходимо учитывать все известные теоремы о сложении и умножении вероятностей.

3. Далее полученную матрицу инцидентности V возводят в степень g .

4. Прекращается возведение в степень матрицы в тот момент, когда данное возведение перестанет менять её вхождения.

Минимальный путь от элемента k к элементу l будет иметь вероятность:

$$P(k,l) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i \leq f} P(A_i \cap A_f) + \sum_{i \leq f \leq h} P(A_i \cap A_f \cap A_h) - \dots + (-1)^{w-1} P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_w).$$

Представленный алгоритм формирования матрицы инцидентности и вычисления всех минимальных путей сети продемонстрируем на конкретном примере. Пусть имеется три потребителя (на рисунке 2.1 это узлы 2–4), которые снабжаются электроэнергией от единственного источника питания (узел 1 на рисунке 2.1). Общее возможное количество всех связей между элементами сети равняется 5 (мостиковая схема).

Каждому ребру графа приписываются граничные вероятности работоспособного состояния узлов сети (например, $P_2=0.83$, $P_3=0.92$, $P_4=0.85$), а также вероятность работоспособного состояния связи, полученная на основе статданных об отказах за несколько лет. Кроме этого, каждой ветви приписывают прогнозируемые затраты на строительство связи (например, затраты на возведение участка сети 1–2 составят 5.32 млн руб.).

Матрица инцидентности для рассматриваемой системы:

$$V = \begin{vmatrix} 1 & p_1 & p_2 & 0 \\ 0 & 1 & p_3 & p_4 \\ 0 & p_3 & 1 & p_5 \\ 0 & p_4 & p_5 & 1 \end{vmatrix}$$

Возведенная матрица инцидентности V во вторую степень с учетом правил умножения и сложения вероятностей:

$$V^2 = \begin{vmatrix} 1 & p_1 + p_2 p_3 & p_2 + p_1 p_3 & p_1 p_4 + p_2 p_5 \\ 0 & 1 & p_3 + p_4 p_5 & p_4 + p_3 p_5 \\ 0 & p_3 + p_4 p_5 & 1 & p_5 + p_3 p_4 \\ 0 & p_4 + p_3 p_5 & p_5 + p_4 p_3 & 1 \end{vmatrix}$$

Умножение V^2 на первую матрицу инцидентности:

$$V^3 = V^2 \cdot V = \begin{vmatrix} 1 & p_1 + p_2 p_3 + p_2 p_4 p_5 & p_2 + p_1 p_3 + p_1 p_4 p_5 & p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 \\ 0 & 1 & p_3 + p_4 p_5 & p_4 + p_3 p_5 \\ 0 & p_3 + p_4 p_5 & 1 & p_5 + p_3 p_4 \\ 0 & p_4 + p_3 p_5 & p_5 + p_4 p_3 & 1 \end{vmatrix}$$

В матрице V^3 минимальным путям соответствуют вероятности $P(1,2)$, $P(1,3)$, $P(1,4)$ и их можно переписать в виде:

$$P(1,2) = P(A'_1) + P(A'_2) + P(A'_3) = p_1 + p_2 p_3 + p_2 p_4 p_5;$$

$$P(1,3) = P(A''_1) + P(A''_2) + P(A''_3) = p_2 + p_1 p_3 + p_1 p_4 p_5;$$

$$P(1,4) = P(A'''_1) + P(A'''_2) + P(A'''_3) = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4.$$

Применив принцип включения–исключения, получим для минимальных путей их вероятности:

$$P(1,2) = p_1 + p_2 p_3 + p_2 p_4 p_5 - p_1 p_2 p_3 - p_1 p_2 p_4 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 p_5;$$

$$P(1,3) = p_2 + p_1 p_3 + p_1 p_4 p_5 - p_1 p_2 p_3 - p_1 p_2 p_4 p_5 - p_1 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 p_5;$$

$$P(1,4) = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_4 p_5 - p_1 p_3 p_4 p_5 - p_1 p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_5 - \\ - p_2 p_3 p_4 p_5 - p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 - \\ - p_1 p_2 p_3 p_4 p_5.$$

В итоге задача примет следующий вид:

$$5.32x_1 + 4.64x_2 + 6.15x_3 + 7.36x_4 + 6.87x_5 \rightarrow \min;$$

$$\begin{cases} P(1,2) \geq 0.95; \\ P(1,3) \geq 0.90; \\ P(1,4) \geq 0.85. \end{cases}$$

Методика предполагает формирование множества S с показателями: отображение пути (от источника к последнему пронумерованному потребителю) в виде единицы, когда имеется связь, и в виде нуля, если нет связи; наличие (если есть связь) или отсутствие (если нет связи) затрат на

строительство. Множество S отражает лишь нижнюю оценку целевой функции с наименьшей стоимостью затрат Z на построение сети. Поэтому должны быть соблюдены граничные условия, представленные в системе неравенств (2.2). Включая последовательно в S по одной связи, с её комбинацией на разных участках пути, в результате сформируется дерево решений, состоящее из всего возможного перечня рассмотренных множеств. Работа и особенности методики заключается в нижеследующем:

1. В качестве начальной точки можно взять множества S_{00010} и S_{10100} . Структура сети (рис. 2.1) в первом случае подразумевает наличие только одного элемента под номером четыре ($x_4 = 1$), во втором – первого и третьего элементов сети. При расчете затрат в случае S_{00010} : $Z^{00010} = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + c_5x_5 = 0 + 0 + 0 + c_4 \cdot 1 + 0 = c_4$ (в силу того, что $x_4 = 1$, тогда как все остальные элементы отсутствуют и их затраты равны 0). Далее следует выполнить проверку на соблюдение (2.2), вычислив все значения $P(k, l)$ и сравнить их с граничными P_l . Вычисление $P(k, l)$ выполняется согласно условиям: если $x_j = 1$, то p_j остается в неравенстве; при $x_j = 0$ – p_j исключается из неравенства. После вычисления при данных условиях значения $P(k, l)$ их следует сопоставить с P_l . Если хотя бы одно из граничных условий $P(k, l) \geq P_l$ не выполняется, то следует переходить на следующий шаг и строить новые множества.

2. На следующем шаге формируется новая группа множеств, в которой количество формирующихся множеств будет равно числу возможных неповторных связей, присоединенных к уже построенным путям предыдущего множества. Начиная с левого порядкового номера связей каждого из множеств в группе, последовательно производится замена 0-ого элемента на единичный. Тем самым для нового множества формируется своя структура и вычисляется величина затрат. При каждом формировании структуры осуществляется проверка недопустимости её повторений с ранее построенными структурами. Для каждого из множеств выполняется проверка

граничных условий системы неравенств (2.2). В случае, когда выполняются все граничные условия, то для такого множества фиксируются затраты, и процесс ветвления прекращается, поскольку дальнейшее ветвление приведёт лишь к увеличению затрат. Однако в целом процесс ветвления не прекращается, его следует продолжать для тех множеств, в которых хотя бы одно из граничных условий системы неравенств (2.2) является невыполнимым.

3. На следующем этапе все множества, для которых не выполнено условие (2.2) на прошлом шаге, ветвятся на следующие группы. При этом число множеств, содержащихся в образованных группах, зависит от количества 0-ых элементов предыдущего множества. В качестве начала отчета берётся 0-ой элемент, у которого номер по порядку на 1 больше 0-ого элемента из предыдущего множества. Продемонстрируем это на конкретном примере: для множества S_{00010} началом отчета будет элемент с порядковым номером не 1, а 5, в силу того, что элемент $x_4 = 1$ является входящим, а в случае S_{00100} началом отчета будет элемент под номером 4 и так далее.

4. Последующее ветвление и формирование множеств будет осуществляться до тех пор, пока не будут получены все конечные множества S . В результате будет построено дерево решений, снизу у которого расположены итоговые множества с наличием всех выполненных условий и те множества, для которых условия являются невыполнимыми.

5. Последним шагом является сравнение затрат итоговых множеств с последующим выбором такого, затраты которого окажутся наименьшими, и, соответственно, структура будет оптимальной с точки зрения надежности и экономичности.

В итоге представленная методика дает возможность поэтапно построить все возможные варианты структуры системы и параллельно с этим вычислять для каждого из них стоимость с учетом соблюдения ограничений системы неравенств (2.2).

Пример. На рисунке 2.1 в качестве исходного узла примем 1-й, исходным множеством будет S_{11000} , примем $x_1 = 1$ и $x_2 = 1$. Тогда затраты на построение данного вида структуры составят: $Z^{11000} = c_1 x_1 + c_2 x_2 = 5.32 \cdot 1 + 4.64 \cdot 1 = 9.96$ млн рублей. Условия из (2.2) не выполняются, в силу отсутствия необходимых связей в структуре. Последующие этапы показали (рис. 2.3), что итоговыми множествами, для которых не выполняются условия, стали S_{11011} и S_{11001} (на рисунке 2.3 они обведены прямоугольниками), а множества S_{11110} и S_{11101} являются итоговыми, с наличием выполненных условий. Из данных множеств выбирается оптимальное путем сравнения вычисленных затрат итоговых множеств: $Z^{11110} = 23.47$ млн рублей, $Z^{11101} = 22.98$ млн рублей. Из них оптимальным вариантом является множество S_{11101} . Множество S_{11111} – фиктивное.

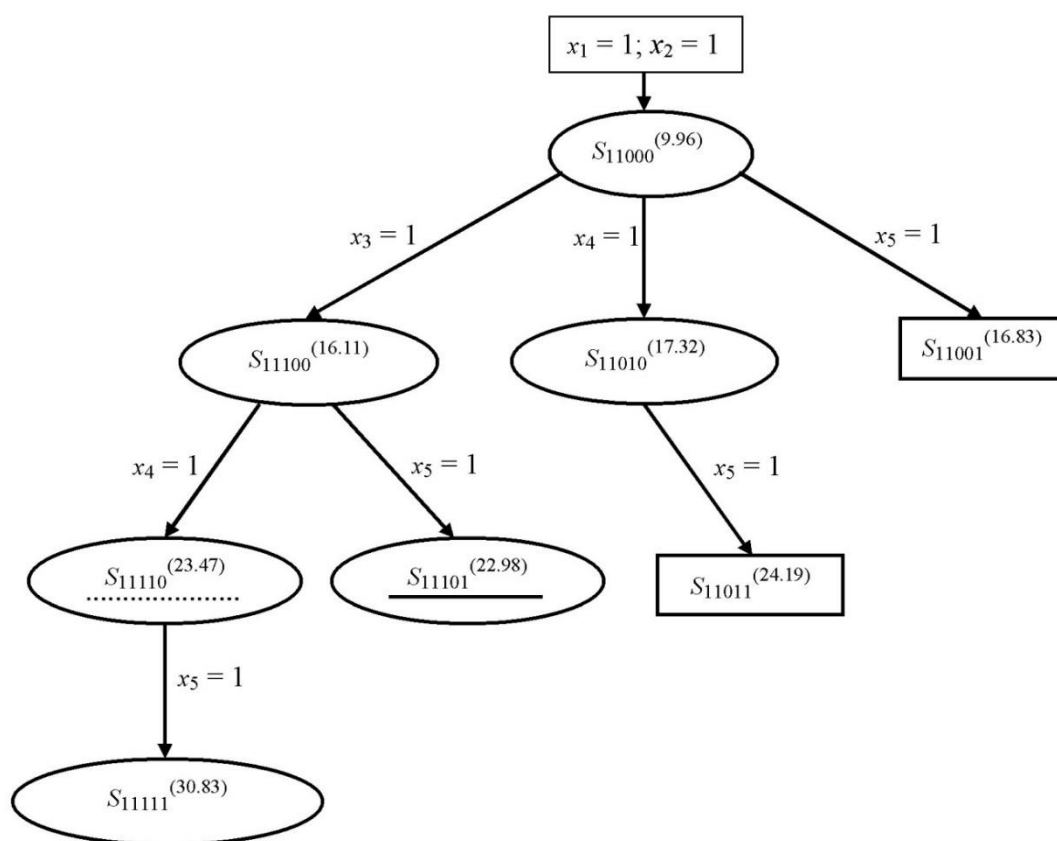


Рисунок 2.3 – Демонстрация метода «ветвей и границ» на конкретном примере

Как видно из рисунка 2.3, итоговое множество S_{11110} (подчеркнуто пунктирной чертой снизу) удовлетворяет решению, а итоговое множество S_{11101} (подчеркнуто сплошной чертой) обеспечивает оптимальное решение задачи.

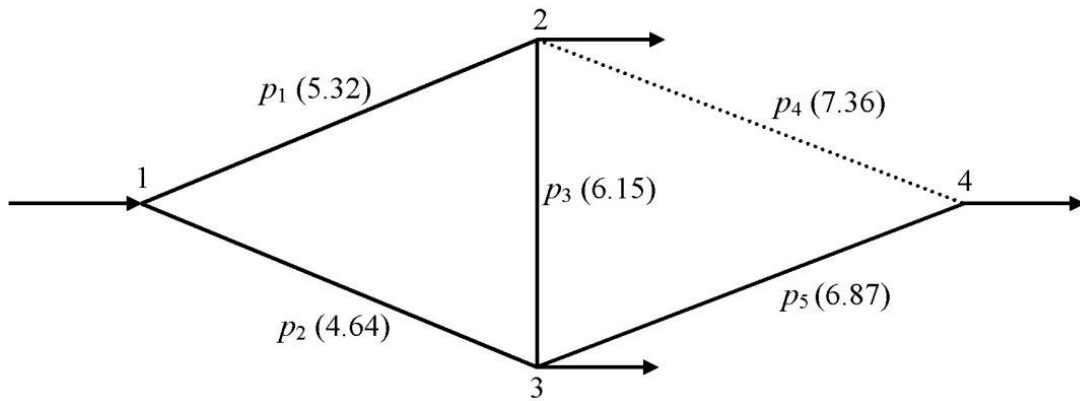


Рисунок 2.4 – Оптимальная структура сети

Для решения данной задачи можно применить метод «ветвей и границ» с корректировкой, касающейся особенностей учета показателя надежности. Помимо традиционной составляющей задачи, направленной на достижение минимума затрат строительства структуры, введены ограничения на выполнение условий по обеспечению бесперебойного снабжения потребителей энергией/ресурсами. Оптимальное решение достигается поэтапным формированием структур с проверкой соблюдения условия задачи и конечным выбором структуры, удовлетворяющей показателям экономичности и надежности [48].

Применимость данного метода имеет свои ограничения: для сложных и многоэлементных структур невозможно получить адекватные условиям функции матрицы инцидентности V ; наличие громоздких нелинейных левых частей системы; возможное несоответствие правых частей неравенств реальным требованиям соблюдения уровня обеспечения надежности; появление недостоверных результатов расчета на ЭВМ с плавающей точкой (утвержденной в стандарте IEEE 754) по причине наличия сложных функций $P(k,l)$, в которых значения вероятностей P близки к 1 и 0. Тем самым

применение этого метода уместно только при наличии малого числа элементов в структуре из-за проблемы «проклятия» размерности.

С целью решения данных проблем имеет смысл обратиться к описанной в предыдущей главе мере неопределенности информации и выразить показатель надежности через данную меру, для начала рассмотрим основные подходы к измерению количества информации, содержащейся в распределительной сети, некоторые из которых были затронуты в предыдущей главе.

Если говорить о решении оптимизационной задачи, то важно помнить о том, что показатели, на основе которых можно выполнять анализ всех вариантов с целью выявления «наилучшего», необходимо представить в количественной форме. Количественное выражение показателя экономичности не вызывает вопросов в силу того, что данный показатель можно представить в виде суммы стоимостей всех элементов выбираемой структуры. Если же говорить о показателе надежности, то здесь важно помнить, что на практике чаще всего он представляется в качественной форме, есть также различные способы расчета надежности. Поэтому целесообразным является применение в данном случае инструментов из других областей знаний, в частности из теории информации.

2.4 Особенности применения меры неопределенности информации в задаче оценки состояния распределительной сети

2.4.1 Оценка представления параметров структурной надежности через энтропию

Чтобы обеспечить требуемый уровень качества проектирования и эксплуатации распределительной сети, человек принял на себя роль управления, для реализации которого берется точка отсчета по времени и рассматриваются наиболее вероятные состояния. Частота и продолжительность состояний элементов структуры системы зависит от

уровня, числа и мощности факторов воздействия, включая управленческие решения. Например, с позиции анализа структурной надежности, состояния могут быть описаны временем отказа и наработки на отказ, частотой возникновения событий, относящихся к появлению работоспособного и неработоспособного состояний элементов системы. Эти показатели востребованы со стороны подсистемы управления с целью сохранения/повышения уровня структурной надежности технического объекта. Кроме этого, они применимы и для определения такого показателя, как количество информации, присущей каждому из элементов и системе в целом. Рассматривая его дополнительно в качестве показателя структуры системы, можно судить о её состоянии, которое отвечало бы установленным требованиям по надежности.

По величине информации можно судить о том, насколько информативна система [30]. Анализ количественного содержания информации в распределительной сети представлен в работах [36; 32; 53; 52]. Решению задач по определению количества информации в структуре распределительной сети посвящены работы [11; 31; 39; 45; 50; 51].

Рассмотрим применение меры неопределенности информации в качестве выражения структурной надежности. В теории информации рассматривается информационная энтропия как мера неопределённости или непредсказуемости информации в случае появления какого-либо события. Если рассматривать распределительную сеть, то в процессе её эксплуатации она меняет свое содержание, её структура изменяется, свидетельствуя об изменении информации. Количество этой информации можно определить через её меру, для этого нужна хотя бы структура системы. Сложность самой структуры, обусловленная количеством её элементов и топологией, накладывает свой отпечаток на определение искомых показателей. Если обратиться к вопросам обеспечения надежного функционирования системы, то структура здесь играет немаловажную роль. Если произойдет с некоторой

долей вероятности разрыв связей в структуре, он окажет влияние на надежность снабжения ресурсами самой системы и тех объектов, которых она снабжает. Поскольку появление разрывов в структуре относят к случайным процессам, то имеем дело с неопределенностью информации. Данная величина может быть выражена в количественной форме как мера информации, с помощью которой можно решать задачи выбора наиболее информативной структуры из рассматриваемых альтернатив. Задачу выбора или «запомненного выбора» нельзя считать простейшей, поскольку речь здесь идет о применимости вероятностно-статистической методологии учета факторов неопределенности при наблюдении поведения системы. Здесь факторы рассматриваются как случайные, порождающие неопределенность и учитываются через вероятностные показатели. Поэтому приходится опираться на статистические характеристики.

С целью конкретизации области применимости разрабатываемой методики учета количества информации сфокусируемся на такой распределительной сети, как электрическая сеть. Как было сказано ранее, любая система подвержена каким-либо воздействиям случайного характера, в данном случае составляющие распределительной сети (такие как трансформаторы, линии электропередач и т.д.) в ходе эксплуатации подвержены воздействию окружающей среды, которая также имеет природу случайного характера. В связи с этим целесообразным является применение вероятностного подхода, в частности, показатель надежности можно попытаться выразить через инструменты прочих областей знаний, имеющих связь с вероятностными величинами.

Путем анализа статистических данных работы элементов рассматриваемой структуры распределительной сети можно сформировать базу данных по отказам данных элементов и тем самым выразить вероятностную величину неработоспособности q элементов, таким же способом можно вычислить вероятность безотказной работы элементов, то

есть вероятностную величину их работоспособности p , при этом связь между этими двумя величинами выражается формулой: $p + q = 1$. Допустим, вероятность того, что линия электропередач будет работать, равняется 0.9 (т.е. вероятность работоспособного состояния данного элемента $p = 0.9$, или 90 %), то вероятность того, что она выйдет из строя, составляет ровно 0.1 (10 %), причем данные вероятностные величины в сумме для одного элемента системы всегда равны единице (т.е. 100 %). Безусловно, помимо двух состояний, элемент может пребывать в еще большем количестве состояний, например, ремонтном, когда элемент хотя и не работает в данный конкретный момент, но нельзя сказать, что он пребывает в неработоспособном состоянии, однако в данной работе ограничимся лишь двумя противоположными состояниями. При этом стоит отметить, что сложность заключается в разграничении данных показателей.

Собственная информация является исходной для определения информационной (статистической) энтропии по Шеннону. Далее можно прибегнуть к такому инструменту теории информации, как мера неопределенности информации, позволяющему вычислять в количественной форме информацию дискретных систем по известной формуле Клода Шеннона (2.3).

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i = -\sum_{i=1}^N p_i I_i, \text{ при условии } \sum_{i=1}^N p_i = 1. \quad (2.3)$$

Вероятность, которая стоит в (2.3) перед логарифмом связывает информацию с информационной энтропией и влияет на конечный результат, в силу того, что в большинстве методов определения количества энтропии данная вероятность служит для усреднения количества энтропии. С позиции анализа структурной надежности, когда статистические характеристики не устойчивы, а события рассматриваются как совместные, усреднение может способствовать росту погрешности. Поэтому вопрос о том, какую величину вероятности поставить перед логарифмом энтропии Шеннона, тема для

отдельных научных изысканий. Поэтому далее будем использовать классическое выражение (2.3), ограничившись предположением об усреднении энтропии.

Рассмотрим применение данной формулы в задаче выражения количественной величины структурной надежности распределительной сети. Согласно результатам расчетов, описанных в статье [47], следует преобразовать формулу (2.3) в следующий вид:

$$H = -(p \log_2 p + q \log_2 q), \text{ при условии } p + q = 1. \quad (2.4)$$

При этом логарифм берется с основанием 2 по той причине, что мы рассматриваем лишь два противоположных (несовместных) состояния: работоспособное и неработоспособное.

Рассматривая структурное содержание системы на основе меры неопределенности информации, приходится, опираясь на теорию вероятностей, строить (например, согласно [34; 37]) статистический ансамбль, отражающий на длительном интервале времени процесс вероятностной смены состояний. Если ансамбль данных готов, то далее, используя ряд математических выражений и по заданному алгоритму, можно определить количество информации, присущее рассматриваемой структуре системы.

Как было упомянуто в предыдущей главе, в теории информации нашло свое применение выражение Клода Шеннона, при помощи которого можно определить количество информации или количество информационной энтропии. Что касается количества информации, то оно отражает меру уже известной аналитику информации об объекте. С другой стороны, количество информационной энтропии соотносится с мерой неопределённости или непредсказуемости информации в случае появления какого-либо события. Здесь с некоторой долей вероятности можно судить о наличии информации, поэтому энтропия более интересна аналитику с точки зрения анализа, последующей выработки и принятия решений в процессе управления

объектом. К. Шеннон дал определение: информация – результат выбора из возможных альтернатив. Последующее развитие теории информации позволило трактовать применение формулы Шеннона как возможность определения энтропии неопределенности информации.

Представление показателей надежности распределительных сетей через меру неопределенности информации более подробно представлено в работах [70; 89; 73]. В работе [74] описываются основные преимущества применения меры неопределенности информации в расчете структурной надежности распределительной сети.

Одним из подходов к является содержание структуры системы и её изменчивость под воздействием внешних и внутренних факторов. В статьях [64; 67; 76] рассмотрена применимость инструментов теории информации в задачах повышения надежности распределительных электрических сетей, в работе же Н. Б. Филимонова рассмотрена их применимость в задачах управления и наблюдения [137], а в работах [15; 69] оптимизация в условиях неопределенности. При этом не исключены возможности в применении методов определения количества энтропии, содержащейся в структуре системы. Сама структура, включающая в себя множество элементов, состояний и связей будет весьма сложной, что накладывает свой отпечаток на определение искомых показателей. Кроме этого имеется множество определений информации, обусловленных спорными моментами в понимании вопроса «что такое информация». Но несмотря на отсутствие четкого определения понятия информации, профессор А. Н. Панченков сформулировал определение информационной энтропии [113; 112]: «Информационная энтропия – это логарифмическая мера количества информации», что подтверждает немаловажную роль логарифма (как степени) в решении задач количественной оценки информационного содержания систем, о чем также упоминалось в предыдущей главе. Здесь уместно выделить один из подходов к определению информации как

результата случайного выбора одного варианта из нескольких возможных и равноправных [142]. Поэтому, прежде чем приступить к определению количества энтропии, следует выделить ряд условий, в рамках которых можно приступить к решению данной задачи.

Далее предложим к рассмотрению один из подходов к определению энтропии, в основе которого лежит классическое выражение К. Шеннона [49].

Условия решения задачи. Среди задач рассмотрим ту, которая касается вопросов обеспечения надежного функционирования системы, то есть, имея количество энтропии, можно судить о том, каким уровнем надежности располагает рассматриваемая система.

Если вопрос касается надежности системы, то следует оговориться, о какой надежности идет речь. Надежность бывает функциональная и структурная. Для функциональной надежности характерны требования, удовлетворяющие выполнению функции в течение заданного времени, тогда как для структурной – сохранение надежности при заданной структуре и известных значениях надежности всех входящих в нее элементов. Следовательно, структура системы, с позиции анализа надежности, играет немаловажную роль. Например, если произойдет разрыв связи в структуре, то он окажет влияние на надежность снабжения ресурсами как самой системы, так и объектов, которых она снабжает.

Поскольку далее речь пойдет о структурной надежности, то следует рассмотреть вероятные состояния системы и её элементов. Элемент системы может находиться во множестве состояний, учет которых резко осложнит решение поставленной задачи определения энтропии. Поэтому целесообразно рассматривать ограниченное число вариантов состояний, полагая при этом, что элемент на данный момент находится в каком-либо одном из состояний. В теории надежности часто берут во внимание лишь два состояния, которые являются противоположными по смыслу:

работоспособное и неработоспособное. Но даже наличие всего двух состояний $m = 2$ не исключает трудностей в поиске решения, поскольку для системы количество состояний будет определяться как m^n , где n – количество элементов в системе. Поставленное условие об учете только двух состояний позволит не только уменьшить количество рассматриваемых состояний, но и создаст возможность использовать логарифмическую меру с основанием 2 для определения количества информации в битах.

Выделенные качественно различающиеся между собой два состояния должны быть определяющими факторами для расчета энтропии с её разделением на составляющие: энтропия работоспособного состояния и энтропия неработоспособного состояния. Путем сопоставления их между собой можно судить о структурной надежности системы.

И ещё одно немаловажное условие: какими по своему содержанию будут применены исходные показатели для определения количества информации. Этим фактором определяется понятийный характер представления информации об объекте в количественном виде.

Принимая во внимание упомянутые условия, рассматривая структурное содержание системы на основе меры неопределенности информации, можно определить количество энтропии, присущее рассматриваемой структуре системы. Полученные значения (в битах) позволят судить о том, насколько информативна система, можно ли считать тот или иной вариант структуры надежным с позиции сложности/простоты, резервирования элементов и т. п. [143].

Определение количества энтропии. В основе вычислений (как было отмечено ранее) лежит подход К. Шеннона. С позиции описания условий рассматриваемой задачи формула Шеннона определения суммарной энтропии системы имеет вид:

$$H_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i + \sum_{i=1}^n q_i \log_2 q_i, \quad (2.5)$$

где p_i и q_i – вероятности работоспособного и неработоспособного состояний элемента i , n – количество элементов в системе. Основание логарифма, равное 2, свидетельствует о рассмотрении двух состояний системы.

Поскольку имеется структура системы с числом элементов, равным n , следует определить вероятности для (2.5), которые на практике определяются через наличие и обработку статистических данных. В таком случае речь идет об определении статистической энтропии. Имеется ряд методов с применением статистической энтропии, например, в работах [34; 37; 40; 44; 54]. Однако эти методы не всегда удобны для определения энтропии, что объясняется следующими причинами: собственная или частная информация ($h_i = \log_2 p_i + \log_2 q_i$) для 2-х состояний при $p_i = q_i = 0.5$ дает нам 2 бита информации, показывая, что элемент может находиться в двух состояниях. В данном случае элемент нас интересует лишь с точки зрения его собственного состояния (в рабочем состоянии или нерабочем), тем самым мы ограничиваем себя информацией, количество которой не превысит двух бит. Если требуется иметь больше информации о состоянии элемента, то следует отказаться от учета вероятностей при логарифме.

Рассмотрим на примере возможности в получении собственной информации в количестве, превышающем 2 бита. В качестве примера возьмем структуру системы для анализа её структурной надежности. При этом имеем в виду, что элемент системы может находиться в одном из двух состояний. Состояния рассмотрим на часовом временном интервале. Собрав статистику о частоте отказов и времени восстановления элемента системы за 5–10 лет, можно получить среднее число часов работоспособного состояния элемента в течение года M_p , час. Дополнительно количество часов неработоспособного состояния элемента в течение года можно определить по выражению: $M_q = T - M_p$, час, где T – количество часов в году.

Имея M_p и M_q , можно ответить на вопрос, насколько актуальна задача применения данных показателей в формуле Шеннона (2.3). Ответ на

поставленный вопрос представлен в [29] с учетом того, что в [93] не исключается возможность применения в (2.5) иных показателей, нежели вероятности.

Тем самым мера Шеннона определения суммарной энтропии системы будет иметь вид:

$$H_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n H_i = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 M_{pi} + \sum_{i=1}^n q_i \log_2 M_{qi}, \quad (2.6)$$

где при условии $p_i + q_i = 1$, p_i и q_i – вероятность, связанная с предположением о том, что будет получена собственная информация h_i о нахождении элемента i в работоспособном и неработоспособном состояниях.

Собственная информация о состоянии элемента:

$$h_i = \log_2 M_{pi} + \log_2 M_{qi}. \quad (2.7)$$

Приняв на временном интервале $M = M_p + M_q = 0.5 + 0.5 = 1$ час и подставив значения в (2.6), получим информацию о состояниях элемента i , равную 2 бита. Если рассмотреть равновероятное ($p_i = q_i = 0.5$) появление собственной информации на интервале времени в 1 час, то по (2.7) получим $H = 1$ бит. Это минимальное количество информации, которое будем иметь при условии того, что в качестве единичного элемента выбран 1 час на рассматриваемом временном интервале T .

Применение (2.6) и (2.7) позволяет отойти от традиционной основы теории информации, ориентированной на представление информации, неразрывно связанной с управлением и снятием неопределённости при выборе одной из множества альтернатив [29].

Выражение (2.6) и условие о представлении собственной информации через среднее количество часов работоспособного и неработоспособного состояний позволяет применить ряд методов определения количества энтропии. Среди них можно предложить методы эквивалентных преобразований структуры системы [54; 28], метод минимальных путей [42], метод минимальных сечений [43] и метод полного перебора состояний [44].

2.4.2. Энтропийный подход к анализу состояния структуры распределительной сети

Обратимся далее к вопросу о некоторых особенностях в определении количества информации при анализе состояний распределительной сети. Теория информации рассматривает возможности применения «информации» с количественной стороны. Тем не менее анализ и моделирование процессов взаимодействия элементов системы через выражение информации с качественной стороны можно также считать целесообразными [100]. В данном случае информация разделяется на составляющие согласно качественным признакам, каждая из которых рассматривается как количественная характеристика интерпретации статистических данных. Разделение по качественному признаку количества информации – результат привязки доли информации к каждому из выделенных свойств системы.

В информатике существует несколько подходов к измерению информации, одним из которых является энтропийный подход, не исключающий возможности его применения к анализу надежности и живучести распределительных сетей. Данный подход позволяет определять (измерять) информационную энтропию, содержащуюся в исследуемом объекте относительно объектов, с которыми он взаимодействует [41]. Здесь доступны методы, большинство из которых предусматривает подход К. Шеннона в определении количества информации для дискретных систем по выражению 2.1 [11; 12; 37].

Далее рассмотрим возможности применения (2.5) в оценке структурной надежности систем. С целью определения уровня надежности системы, состояния элементов (работоспособное и неработоспособное) обусловлены появлением непересекающихся, противоположных и качественно различающиеся событий. Фиксированные по времени состояния являются исходными данными определения средней величины вероятностей состояний: работоспособного p и неработоспособного q . Определить

количество информации можно по выражению (2.3). Однако оно не позволяет разделить информацию по качественному признаку. Применение данного выражения будет справедливым лишь для частного случая, когда рассматривается лишь один элемент системы, с предположением о его полной независимости состояний. В этом случае на основе построенного ансамбля статистических данных и предположения о неизменности значений вероятности появления событий в будущем можно определить в соответствии с мерой Шеннона информационную энтропию по выражению 2.5.

Однако существует ряд причин, по которым выражение (2.5) не может быть использовано для анализа структуры системы в целом. Поясним данное обстоятельство. Поскольку информация должна быть разделена на качественные составляющие, невозможно обойти стороной наличие топологии структуры системы. Сложные системы включают в себя множество элементов, и отказ одного из них приводит к отказам (неработоспособному состоянию) других элементов. Наличие причинно-следственной связи означает то, что элементы зависимы и их взаимосвязанные состояния образуют пересекающиеся события [34; 37]. Следовательно, процедура определения результирующей информации является сложной (как показано в [35]) и должна выполняться по разработанным алгоритмам (например, посредством эквивалентных преобразований структуры системы согласно [54]).

Сама сложность заключается не в формуле (2.5), а в определении результирующих значений вероятностей работоспособного P и неработоспособного Q состояний системы. Например, их вычисление для пересекающихся i -х и j -х состояний можно записать в общей форме:

$$P = \prod_{i,j} p_i q_j; \quad Q = \prod_{i,j} q_i p_j. \quad (2.8)$$

Количество выражений вида (2.8) может быть огромным, равным 2^n , где n – число элементов системы, 2 – количество рассматриваемых состояний

элемента. Результирующие значения, согласно (2.8), можно определить для каждой из решаемых задач в отдельности, используя методы ветвей и границ, перебора состояний и др. Что касается получения количества информации, то можно рекомендовать метод, представленный в [44].

Далее предложим метод эквивалентных преобразований структуры системы с целью определения количества информации. Разработке данного метода предшествовал ряд работ, среди которых следует выделить [34; 37; 40; 44; 54; 29].

Суть метода заключается в следующем. Необходимо оценить уровень связности элементов системы, то есть насколько жестко связаны элементы в её структуре. Пусть имеется, например, структура распределительной сети (участок трубопроводной, электрической, компьютерной сети). К задачам, в решении которых связность элементов имеет существенное значение, можно отнести те, которые обусловлены наличием свойств структурной надежности системы. Следовательно, предстоит решить задачу оценки структурной надежности системы через полученное количество информации в битах.

Опыт эксплуатации распределительной сети включает в себя фиксацию частоты отказов и времени восстановления каждого из элементов системы. На основе этих двух показателей (обратившись к теории надежности) можно для каждого из элементов вычислить вероятность отказа элемента q и вероятность безотказной работы $p = 1 - q$.

Составим структуру распределительной сети. Пусть она будет иметь вид, представленный на рисунке 2.5, в котором каждому элементу в виде квадрата приписаны номер элемента, его вероятность работоспособного и неработоспособного состояний.

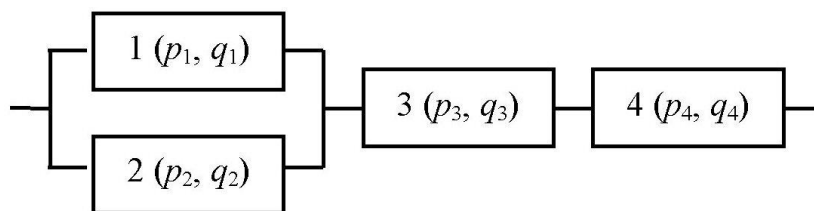


Рисунок 2.5 – Структура распределительной сети

Чтобы определить количество информации в системе, применим метод эквивалентирования параллельно и последовательно соединенных элементов из [54], представив тем самым всю структуру в виде одного эквивалентного элемента. При этом разделим количество информации на две качественно противоположные составляющие: информационную энтропию работоспособного и неработоспособного состояний.

Представим далее пример расчета энтропий и проанализируем результаты. Пусть известны все $p_i = 0.5$ и $q_i = 0.5$.

Определим величины энтропий для каждого из элементов системы:

- энтропия работоспособного состояния i -го элемента:

$$H(p_i) = p_i \log_2 p_i = 0.5 \log_2 0.5 = 0.5;$$

- энтропия неработоспособного состояния i -го элемента:

$$H(q_i) = q_i \log_2 q_i = 0.5 \log_2 0.5 = 0.5.$$

- суммарная энтропия системы:

$$H_\Sigma = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i + \sum_{i=1}^n q_i \log_2 q_i = \sum_{i=1}^4 0.5 \log_2 0.5 + \sum_{i=1}^4 0.5 \log_2 0.5 = 4.0.$$

Эквивалент энтропий 1 и 2 элементов, соединенных параллельно:

- энтропия неработоспособного состояния:

$$H(q_{12}) = q_1 H(q_2) + q_2 H(q_1) = 0.5 \cdot 0.5 + 0.5 \cdot 0.5 = 0.5;$$

- энтропия работоспособного состояния:

$$H(p_{12}) = H(p_1) + H(p_2) + p_1 H(q_2) + p_2 H(q_1) = 0.5 + 0.5 + 0.5 \cdot 0.5 + 0.5 \cdot 0.5 = 1.5;$$

Эквивалент энтропий 3 и 4 элементов, соединенных последовательно:

- энтропия неработоспособного состояния:

$$H(q_{34}) = H(q_3) + H(q_4) + q_4 H(p_3) + q_3 H(p_4) = 0.5 + 0.5 + 0.5 \cdot 0.5 + 0.5 \cdot 0.5 = 1.5;$$

- энтропия работоспособного состояния:

$$H(p_{34}) = p_3 H(p_4) + p_4 H(p_3) = 0.5 \cdot 0.5 + 0.5 \cdot 0.5 = 0.5; \quad (2.9)$$

Полный эквивалент энтропий, соединенных последовательно:

- суммарная энтропия неработоспособного состояния:

$$H(q_{экг}) = H(q_{12}) + H(q_{34}) + q_1 q_2 H(p_{34}) + (q_3 + q_4 - q_3 q_4) H(p_{12}) = \\ = 0.5 + 1.5 + 0.5 \cdot 0.5 \cdot 0.5 + (0.5 + 0.5 - 0.5 \cdot 0.5) \cdot 1.5 = 3.25; \quad (2.10)$$

- суммарная энтропия работоспособного состояния:

$$H(p_{экг}) = p_3 p_4 H(p_{12}) + (p_1 + p_2 - p_1 p_2) H(p_{34}) = \\ = 0.5 \cdot 0.5 \cdot 1.5 + (0.5 + 0.5 - 0.5 \cdot 0.5) \cdot 0.5 = 0.75.$$

Проверка расчетов:

$$H_{\Sigma} = H(p_{экг}) + H(q_{экг}) = 0.75 + 3.25 = 4.0.$$

Проанализируем полученные значения. Из выражений (2.9) и (2.10) следует: структура на рисунке 2.5 обладает более высокой информативностью о её неработоспособном состоянии. С точки зрения структурной надежности такого вида структура не обладает высоким уровнем надежности в обеспечении потребителей энергоресурсами. Если рассмотреть более правдоподобные статистические данные реальных распределительных сетей с вероятностями, например, $p_i = 0.99$ и $q_i = 1 - 0.99 = 0.01$, то, выполнив аналогичный расчет, получим: $H(p_{экг}) = 0.186$; $H(q_{экг}) = 0.138$; $H_{\Sigma} = 0.324$. Даже для реальных структур систем данного вида соотношение информации между двумя состояниями приблизительно равно, что вновь свидетельствует о невысоком уровне структурной надежности.

Данный метод определения количества информации, содержащейся в простейшей структуре распределительной сети, посредством параллельных и последовательных эквивалентных преобразований позволяет определять количество информации (информационных энтропий) содержащихся в простейшей структуре системы и сопоставить структуры между собой для выбора наиболее информативной. Метод применим для систем, в которых вероятностные состояния элементов рассматриваются как противоположные и независимые [33].

Учет качественных параметров надежности через величину энтропии. В теории надежности события рассматриваются как случайные,

характеризуясь значениями вероятности работоспособного и неработоспособного состояний, оставляя при этом в стороне вопросы неопределенности информации. Для более полного анализа структурного содержания системы, её надежности востребован качественный подход, разделяющий общее количество информационной энтропии на составляющие.

Поскольку между теорией информации и теорией вероятностей существует связь (так как в каждой из них рассматриваются состояния и события), то принимая во внимание (2.8), можно определить количество информационной (суммарной) энтропии о состоянии системы за рассматриваемый период:

$$H_{\Sigma} = -(P \log_2 P + Q \log_2 Q) = -(H(P) + H(Q)), \quad (2.11)$$

при условии: $P + Q = 1$. Здесь $H(P)$, $H(Q)$ – информационные энтропии, соответственно, работоспособного и неработоспособного состояний системы.

Рассмотрим особенности понятийного характера упомянутых состояний, относящихся к содержанию слова «энтропия». Что касается $H(Q)$, то вопрос о правомочности её определения не стоит так остро, как с $H(P)$. Дело в том, что энтропия неработоспособного состояния непосредственно обусловлена наличием вероятностных признаков появления непредвиденных событий. Тем самым она отражает природу неопределенности информации, что нельзя сказать об энтропии работоспособного состояния. Если рассматривать $H(P)$ с точки зрения наличия в системе определенной информации, то (при многообразии её определений) она характеризует наличие совокупности сведений о состоянии системы, когда её элементы выполняют заданные функции. При этом не исключен вероятностный характер отражения работоспособного состояния, что позволяет связать $H(P)$ со словом «энтропия». Далее представим пояснения, относящиеся к важности учета качественной составляющей в определении энтропии. От искусственной системы требуется повышенный уровень надежности и,

следовательно, она должна обладать большей информативностью и меньшей неопределенностью. Здесь можно выделить два предельных случая энтропии неработоспособного состояния:

- 1) практически нулевая энтропия, свидетельствующая о наличии максимальной энтропии работоспособного состояния;
- 2) высокая энтропия, характеризующая критическое содержание работоспособного состояния системы. В первом случае мы с высокой долей вероятности полагаем, что система в будущем будет обладать высоким уровнем надежности, тогда как во втором – предельным, с точки зрения возможностей существования (необходимости дальнейшей эксплуатации) распределительной сети.

Взаимная связь между этими случаями и предположение о независимости возникновения противоположных событий свидетельствуют о значимости процесса разделения количества энтропии на качественные составляющие согласно (2.11). Выражение (2.11) можно обобщить и на случай представления энтропии через её нормировку [40]:

$$H^*(P) + H^*(Q) = n, \quad (2.12)$$

где n – количество элементов в системе, а «звездочка» означает наличие нормированного значения энтропии.

В процессе анализа энтропийного содержания системы $H(P)$ можно рассматривать как ресурсы, обеспечивающие её надежное функционирование, а $H(Q)$ – как ресурсы, выбывшие (изъятые) из системы под воздействием внешних сил (сил природы).

Смысл соотношения энтропий в (2.11) заключается в следующем. Распределительная сеть, являясь открытой, находится в некоторой среде, при движении в которой структура видоизменяется, а заложенные в неё ресурсы выбывают под воздействием сил природы. По причине отсутствия достоверных знаний о движении среды эти диссипативные процессы (с некоторой долей вероятности) предлагается учесть через $H(Q)$. В реальности

(с позиции анализа структурной надежности) величина $H(Q)$ невелика по сравнению H_Σ . Однако, если судить об объемах прекращения подачи энергоресурсов в отдельные узлы системы, то такое утверждение будет неправомерным, поскольку речь уже идет о функциональной надежности. С целью сохранения системы от дальнейшего разрушения требуется привлечение дополнительных ресурсов, что и приведет к снижению неопределенности, выраженному через увеличение $H(P)$. Следовательно, эти две составляющие энтропии находятся в соотношении между собой. Между ними происходит взаимообмен: с одной стороны, значение $H(Q)$ предопределяет величину $H(P)$, поскольку отражает видоизменение структуры под влиянием внешних воздействий, с другой – $H(P)$ видоизменяет структуру и $H(Q)$ вследствие целенаправленного вмешательства человека в систему, снимая тем самым неопределенность.

Разграничение по уровню состояний системы. Энтропию можно использовать в качестве величины, характеризующей уровень структурной надежности системы, поскольку её характеристики наделены свойствами:

- определения меры неопределенности (в структуре и поведении) состояний системы в количественном виде, выражаясь через её вероятностные характеристики;
- зависимости от размерности пространства состояний системы, числа её элементов и топологии структуры;
- отсутствия необходимости выбора начала координат в пространстве состояний системы;
- разделения полученной информации о состояниях системы по качественному признаку.

Опираясь на данные свойства и выражения (2.11), измерить качественные соотношения энтропии можно через относительную величину:

$$\begin{aligned} G(P) &= H(P)/H_\Sigma; \\ G(Q) &= H(Q)/H_\Sigma; \end{aligned} \tag{2.13}$$

$$G(P) + G(Q) = 1.$$

Относительные величины:

$$G(P) = H^*(P)/n;$$

$$G(Q) = H^*(Q)/n; \quad (2.14)$$

$$G(P) + G(Q) = 1.$$

Таким образом, приведенный показатель G разграничивает качественно различающиеся состояния системы, проводя тем самым уровень/границу в рамках суммарной энтропии всей системы.

Определение показателя, по сути свидетельствующего об уровне структурной надежности, должно производиться в следующем порядке:

- на основе составленной структуры выбирается способ определения значений энтропии $H(P)$ и $H(Q)$;
- вычисляются значения $H(P)$ и $H(Q)$ анализируемой системы;
- вычисляется H_Σ ;
- определяются значения $G(P)$ и $G(Q)$, или $G(Q) = 1 - G(P)$.

Применение показателя G – возможность оценки уровня структурной надежности посредством разграничения (проведение границы) между работоспособным и неработоспособным состояниями распределительной сети.

Выделим свойства показателя G :

- при соотношении $G(Q)/G(P) = 0$ – система обладает идеальной структурной надежностью, а при $G(P)/G(Q) = 0$ – структура отсутствует;
- рост $G(P)$ свидетельствует о развитии системы, а рост $G(Q)$ – о её деградации;
- дополнительное внесение в структуру резервных элементов (расширение системы) отмечается ростом $G(P)$.

Справедливость данных свойств подтверждена применением метода, предложенного в работе [44].

Одним из важных вопросов в области оценки надежности распределительной сети можно считать меру количества присущей ей информации. Рассматривая структурную надежность важно разделить состояния её структурных элементов на две качественно противоположные составляющие: работоспособное состояние и неработоспособное. Каждому из этих противоположных состояний присуща своя энтропия. Определив отдельно по каждому качественному признаку энтропию, можно вычислить показатель разграничения уровня структурной надежности. Сопоставляя между собой показатели, можно оценить долю присутствия энтропии неработоспособного состояния в общем объеме полученной информации, присущей всей структуре системы. Такой показатель весьма полезен в качестве критерия при решении задач оптимизации структур систем [47].

Данный показатель отражает наличие топологии структуры, разнообразие и зависимость множества противоположных состояний между собой. Тем самым в качестве показателя уровня структурной надежности допустимо использование отношения энтропии неработоспособного состояния системы $H(Q)$ и суммарной энтропии H_{Σ} при наложенных на систему ограничениях. Такой показатель позволяет судить о состоянии системы и её структурной надежности: значения показателя убывают при расширении (эволюции) системы, если относительное приращение суммарной энтропии системы не меньше относительного приращения энтропии неработоспособного состояния.

2.5 Разработка методики оценки состояния и выбора структуры высоконадежной распределительной сети

Для распределительной сети важную роль в вопросах неопределенности информации играет структурное содержание системы. Содержательная часть структуры оценивается состоянием элементов, то есть

обусловлена результатом их многовариантного и неоднозначного поведения: работа, отказ и старение оборудования, отклонения параметров от установленных значений, недостаток ресурсов и т.п., что обусловлено влиянием внешних и внутренних факторов вероятностной природы. Существует множество уже известных решений, направленных на обеспечение устойчивого состояния структуры, которые не исключают необходимости иметь достаточное количество информации для реализации этой задачи. Если для её решения принять во внимание влияние структурных изменений, то здесь востребована достоверная информация. Её проблематично не только получить, но и предположить, поскольку окружающая среда нам порой малоизвестна. Однако сложные распределительные сети, обеспечивающие надежное снабжение ресурсами потребителей, имеют современные системы диагностики и диспетчеризации (например, производство и передача электроэнергии, железнодорожный транспорт и др.). И несмотря на то, что эти системы предоставляют порой достоверную информацию о поведении объекта, она не всегда (из-за отсутствия необходимых аналитических инструментов) идет на пользу лицу, принимающему решения. Следовательно, в основу механизма ожидания структурных изменений системы необходимо заложить не только знания о её внутреннем состоянии, но и вероятностные знания об окружающей среде. В этой связи необходим подход к проблеме с позиции качественного и количественного учета информации.

В своей основе созданная методика опирается, прежде всего, на подходы Ральфа Хартли, Клода Шеннона и А. Я. Хинчина к расчету количества информационной энтропии. Решение о возможности применения этого показателя базируется на его универсальности, так как он служит мерой близости состояния системы к равновесному, что немаловажно в решении задач анализа и оценки уровня надежности при изменчивости состояния сети.

Основополагающими моделями определения энтропии послужили формула Клода Шеннона: $H = -\sum_i p_i \log p_i$, обобщающая формулы Ральфа Хартли и модель А. Я. Хинчина, отражающая роль энтропии в реализации задач передачи информации: $H(AB) = -\sum_i \sum_j p_{ij} \log p_{ij}$, где H – количество энтропии, p_{ij} – вероятность появления событий i и j в ансамблях конечных состояний A и B . На наш взгляд, формула Хинчина играет ключевую роль в задачах выбора из множества альтернатив, так как описывает полную систему событий ансамблей состояний элементов сети (без учета направлений потоковых процессов).

При рассмотрении несовместных состояний сети с позиции структурной надежности её элемент i характеризуется вероятностью работоспособного p_i и неработоспособного $q_i = 1 - p_i$ состояний. Последние определяются исходя из наличия показателей надежности, значения которых отвечают закономерностям распределения случайных величин и заносятся в статистический ансамбль состояний: время, в течение которого элемент находился в том или ином состоянии; частота появления противоположных событий и др.

Между теориями информации и вероятностей, о чем свидетельствовали К. Шеннон и А. Я. Хинчин, существует связь, обусловленная наличием измерения состояний и событий. В свою очередь теория вероятностей связана с теорией надежности, что не исключает возможности применения теории информации в задачах выбора из множества альтернатив. Поэтому с точки зрения анализа структурной надежности, разграничение по качественному признаку состояний на работоспособное и неработоспособное с целью расчета энтропии можно считать обоснованным. Тогда вычисление количества энтропии системы, в случае независимости и противоположности событий, определяется по формуле:

$$H_{\Sigma} = -\left(\sum_{i=1}^{N_1} p_i \log_2 p_i + \sum_{j=1}^{N_0} q_j \log_2 q_j\right), \text{ при условии } \sum_{i=1}^{N_1} p_i + \sum_{j=1}^{N_0} q_j = 1, \quad (2.15)$$

где p_i, q_j – вероятности работоспособного i и неработоспособного j состояний

системы,
$$p(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N_0 \rightarrow \infty}} \frac{N_0 - \sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0} \approx \frac{N(t)}{N_0}, \quad q(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N_0 \rightarrow \infty}} \frac{\sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0}, \quad N_0 - \text{число}$$

элементов в начале испытаний системы; n_i – число отказавших элементов в интервале времени Δt ; t – время, для которого определяется вероятность; $N(t)$ – число элементов, исправно работающих на интервале $[0; t]$. Как правило, противоположные события свойственны для всех элементов сети, в формуле (2.15) сохраняется условие: $N_0 = N_1$.

Выражение (2.15) формализует возможности в получении конечного результата измерения неопределенности информации и её последующем снятии. Одним из подходов к снятию неопределенности является выявление слабых звеньев сети.

При построении методики и её последующем применении соблюдены условия: 1) рассматриваются только статистические данные о состоянии структуры сети; 2) учитываются простейшие дискретные состояния; 3) информация подлежит накоплению; 4) информация должна быть связана с её неопределенностью; 5) используется логарифмическая мера, обладающая аддитивностью; 6) при определении информации используется классический подход Шеннона и модель Хинчина; 7) выражение (2.15) является основополагающим; 8) рассматриваются только закрытые системы; 9) энтропия всех пересекающихся состояний элементов структуры равна сумме энтропий её независимо функционирующих элементов.

Согласно данным условиям выражение (2.15) преобразовано к следующему обобщенному виду:

$$H_{\Sigma} = -\sum_{i=1}^N [H(p_i) + H(q_i)] = -\sum_{i=1}^N (p_i \log_2 p_i + q_i \log_2 q_i), \quad (2.16)$$

где N – число элементов в структуре системы; p_i и q_i – вероятности противоположных состояний элемента i ($p_i + q_i = 1$); $H(p_i)$ и $H(q_i)$ – энтропии противоположных состояний элемента i . Выражение (2.16) (согласуется с моделью Хинчина) в предположении о независимом функционировании элементов позволяет определить суммарную энтропию системы.

При разработке методики особое внимание уделено возможностям получения количества информации о вероятностном пересечении состояний элементов сети. Важность их учета обусловлена тем, что в структурной надежности рассматриваются совместные события, при которых элементы переходят из одного состояния в другое. Учет таких состояний предусматривает направление потоков в сети от источников к потребителям. Тем самым принимается во внимание не только изменчивость структуры сети, но и надежность выполнения функции энергоснабжения потребителей. Разработка методики включает в себя построение уравнений расчета энтропии состояний связи «источник–потребитель» через применение процедуры эквивалентирования и методов преобразования структур. При этом предусмотрено соблюдение свойств: 1) для исходного и эквивалентного состояния элементов, энтропия выражается через вероятностные характеристики сети, полученные на основе статистики; 2) структура характеризуется количеством элементов сети и размерностью пространства состояний; 3) система является закрытой; 4) энтропия рассматривается применительно к каждому из несовместных событий.

Предлагаемая к применению методика построения математических выражений эквивалента связей «источник-потребитель» сети заключается в нижеследующем:

1. Формируется статистический ансамбль элементов с вероятностями работоспособного и неработоспособного состояний элементов.

2. Эквивалент связи строится от источника до выбранного потребителя и включает в себя пути и сечения. Определяется количество элементов в

структуре связи и строятся пути или сечения. Далее построение математических выражений представлено как для сформированных путей, так и для сечений.

3. Эквивалент вероятности состояний:

- вероятность событий работоспособного состояния элементов пути j , $j=1, 2, \dots, m_n$:

$$P_j = \prod_{k=1}^{n_n} p_k ; \quad (2.15)$$

- вероятность событий неработоспособного состояния элементов сечения j , $j=1, 2, \dots, m_c$:

$$Q_j = \prod_{k=1}^{n_c} q_k , \quad (2.16)$$

где q_k и p_k – вероятности несовместных событий элемента k , входящего в путь и сечение j ; n_n и n_c – соответственно, количество элементов, входящих в путь и сечение.

4. Согласно (6) и (7), для каждого пути и сечения определяются:

$$Q_j = 1 - P_j ; \quad (2.17)$$

$$P_j = 1 - Q_j .$$

(2.18)

5. Для каждого из m_n путей и m_c сечений определяется энтропия:

- работоспособного состояния элементов пути j с порядковым номером элементов i и вероятностью k :

$$H(P_j) = \sum_{i=1}^{n_n} [(\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n_n} p_k) H(p_i)]; \quad (2.19)$$

- то же для неработоспособного состояния:

$$H(Q_j) = \sum_{k=1}^{n_n} [H(p_k) + H(q_k)] - H(P_j); \quad (2.20)$$

- неработоспособного состояния элементов сечения j с порядковым

номером элементов i и вероятностью k :

$$H(Q_j) = \sum_{i=1}^{n_c} [(\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n_c} q_k) H(q_i)]; \quad (2.21)$$

- то же работоспособного состояния:

$$H(P_j) = \sum_{k=1}^{n_c} [H(p_k) + H(q_k)] - H(Q_j); \quad (2.22)$$

6. Энтропия совокупности всех рассматриваемых путей:

- работоспособного состояния m_n путей:

$$H(P) = \sum_{j=1}^{m_n} [H(P_j) + (1 - \prod_{j=1}^{m_n} Q_j) H(Q_j)]; \quad (2.23)$$

- то же неработоспособного состояния:

$$H(Q) = \sum_{i=1}^N [H(p_i) + H(q_i)] - H(P) = H_\Sigma - H(P); \quad (2.24)$$

7. Энтропия совокупности всех рассматриваемых сечений:

- неработоспособного состояния m_c сечений:

$$H(Q) = \sum_{j=1}^{m_c} [H(Q_j) + (1 - \prod_{j=1}^{m_c} P_k) H(P_j)]; \quad (2.25)$$

- то же работоспособного состояния:

$$H(P) = H_\Sigma - H(Q). \quad (2.26)$$

Данная методика (2.15)-(2.26) позволяет строить формулы определения энтропии $H(P)$ и $H(Q)$ оценки состояния связей «источник–потребитель» в структуре сети, а также последовательно строить систему уравнений ограничений задачи.

Посредством перебора всех пересекающихся состояний элементов структуры малой размерности подтверждена достоверность выполненных расчетов энтропии по разработанной методике.

Особенности методики, используемые для дальнейшего исследования, заключаются в нижеследующем:

1) позволяет определять величину энтропии с разделением по качественному признаку на два противоположных состояния системы: работоспособное и неработоспособное (для решения задач анализа надежности систем);

2) дает возможность учесть разнообразие состояний элементов структуры системы;

3) позволяет отслеживать статику изменения энтропии во времени;

4) не исключается возможность дальнейшей модернизации, разработки новых методов и решений задач обеспечения надежности распределительной сети.

Для реализации методики востребованы сбор, предварительная обработка и последующий анализ статистических или диагностических данных. Методика расчета энтропии не исключает дальнейшей модернизации, разработки новых алгоритмов решения задач оценки состояния и построения структур распределительных сетей различного назначения.

Выводы по второй главе

1. Формализована задача поиска оптимальной структуры электрической сети, представленной в виде ориентированного взвешенного графа с учетом минимизации экономических затрат, представленной в виде целевой функции. И с учетом соблюдения требуемого уровня надежности электроснабжения потребителей путем накладывания ограничений, представленных в виде неравенств, характеризующих условие соответствия требуемому уровню надежности для определенного потребителя, рассчитанного до него уровня надежности с учетом всех элементов.

2. Дана оценка известных методов оптимизации с целью выбора наиболее подходящего для решения поставленной задачи оптимизации. В

силу того, что в данной работе акцент делается на проверке гипотезы о применимости методики, в которой мера неопределенности информации представлена в качестве показателя, выражающего уровень структурной надежности распределительной сети, был выбран точный комбинаторный метод «ветвей и границ».

3. Разработана пошаговая процедура реализации метода «ветвей и границ» для поиска оптимального решения задачи. Процедура предусматривает ряд вычислительных операций и структурных преобразований схемы с обязательным условием проверки на соблюдение требуемого уровня надежности. Данный показатель выражается в виде нелинейных алгебраических неравенств. Они позволяют определять вероятности бесперебойной работы элементов сети, связывающих источник энергии/ресурсов с потребителями. Представлен пример, демонстрирующий порядок работы метода ветвей и границ, где в качестве поясняющего примера рассматривается система, схема которой имеет мостиковую структуру. Представленный метод позволяет путем учета показателей надежности и экономичности осуществлять поиск наиболее эффективной структуры распределительной сети.

4. Рассмотрен ряд методов определения количества информации, содержащейся в структурах распределительных сетей. Они основаны на методах эквивалентирования, полного перебора, минимальных путей, минимальных сечений и применимы для систем, состояния элементов которых разграничиваются на несовместные и независимые. Разработано модифицированное математическое выражение формулы Шеннона, которое с учетом соблюдения ряда условий может быть использовано в существующих методах расчета меры неопределенности информации, позволяющей разграничивать и выражать в количественном виде уровень структурной надежности исследуемой системы.

5. Формализована методика оценки состояния и выбора с учетом меры неопределенности информации структуры высоконадежной распределительной сети, межэлементные связи которой характеризуются количественными характеристиками энтропии. Методика включает в себя процедуры определения информационной энтропии совместных и несовместных событий, относящихся к участкам и всей сети. Решение достигается путем процедур эквивалентирования структур, а также методом построения путей и сечений на графах, что позволяет учесть множество пересекающихся состояний элементов сети.

3 Разработка вычислительных процедур выбора эффективных структур распределительной сети

В данной главе на основе впервые созданной методики оценки состояния и выбора структуры высоконадежной распределительной сети сформулированы задачи и разработаны вычислительные процедуры выбора эффективных структур распределительной сети: поиск экстремума при допустимом множестве ограничений, удовлетворяющих условиям надежности, выраженным через энтропию. Представлены контрольные примеры расчета распределительной электрической сети одного из районов Республики Хакасия, выполнен анализ полученных результатов.

3.1 Вычислительная процедура анализа надежности распределительной сети электроснабжения

Распределительная сеть является сложным техническим объектом, который работает круглый год на открытом воздухе и подвергается воздействию: атмосферных осадков, колебаний температуры окружающей среды, запыленности, содержащихся в воздухе паров химических реагентов и др. Все эти факторы, их случайное появление, связано с неопределенностью информации о поведении сети. Следствием воздействия нежелательных факторов является появление события, которое может изменить режим работы электрооборудования (элемента сети), переводя его из работоспособного состояния в неработоспособное. При этом структура сети меняется, что приводит к ущербам производственного процесса. Мониторинг и анализ состояний сети позволяют отслеживать её структурное содержание (изменяющиеся состояния элементов), и в последующем принимать решения, направленные на устранение негативных последствий. Следовательно, накопление и систематизация информации о состоянии электрооборудования

пополняет знания и позволяет выработать решения по снятию неопределенности в поведении сети.

Проектирование и эксплуатация систем внешнего электроснабжения направлены на обеспечение бесперебойной работы приемников электроэнергии. Одним из показателей оценки жизнеспособности системы является её надежность электроснабжения потребителей. Регулярный мониторинг работы системы электроснабжения, обработка данных и их анализ позволяют специалистам по проектированию и эксплуатации вырабатывать эффективные решения по соблюдению требуемого уровня надежности.

При анализе структурной надежности сети основными показателями традиционно считаются, как упоминалось в главе 1, статистические: частота потока отказов, время восстановления повреждений и устранения аварий, вероятности состояний элементов сети и др.

При анализе надежности распределительной сети электроснабжения, как упоминалось ранее, перспективным направлением можно считать учет неопределенности информации о состоянии структуры. Неопределенность информации, её мера являются одним из показателей оценки надежности распределительной сети.

Решая вопросы анализа надежности, трудность формализации задачи учета неопределенности заставляет нас ограничиваться рассмотрением только структурного содержания распределительной сети. Однако, с другой стороны, построение простейшей структуры сети не составляет особого труда. Структуру можно представить в виде графа, в котором связи (ребра) – элементы сети, а узлы (вершины) – сочленения элементов. Параметры сети присущи только ребрам графа: состояния элементов, частота и вероятность появления событий.

В процессе анализа надежности функционирования сети, ценность информации заключается в возможностях использования её

неопределенности в качестве меры информационной энтропии. Данная мера позволяет обобщить опыт работы системы электроснабжения на случай, когда важно учесть воздействие случайных факторов на изменчивость структуры, выраженное через величину энтропию как в количественной, так и в качественной формах [47].

Постановка задачи измерения энтропии. Любой элемент распределительной сети можно представить в виде дискретного устройства, имеющего один вход и один выход. В каждый рассматриваемый момент времени с позиции теории надежности элемент находится в одном из двух противоположных состояний: работоспособном и неработоспособном. Смена состояний элемента или сети в целом – дискретно изменяющийся во времени физический процесс, который отражается в виде информации, получаемых системой контроля и управления посредством передачи сообщений.

Формально элемент характеризуется упорядоченными составляющими множеств:

$$A = (P, \delta, N),$$

где N – множество внутренних состояний, $p \in P$ – множество вероятностей появления случайных событий, δ – функция случайного перехода из одного состояния в противоположное. Функция переходов отражает во времени следующий процесс: на вход устройства поступает энергетический поток дискретного вида, а на выходе поток претерпевает изменение как по частоте, так и по длине.

Задача анализа надежности распределительной сети сводится к сопоставлению полученного в результате расчетов количества информационной энтропии и предельного количества информации, характеризующего обеспечение требуемого уровня надежности.

В свою очередь структурную надежность выражают через вероятностную природу поведения сети либо через требования стандартов

надежности, поэтому поиск конечного решения затруднен. Трудности в расчетах могут быть преодолены, хотя и с учетом некоторых допущений.

Поставленная задача предусматривает подготовку исходных данных: построение структуры, определение совокупности показателей, характеризующих состояния элементов сети. При этом в процессе определения количества информации следует соблюсти ряд условий:

- рассматриваются только статистические данные о состоянии структуры сети;
- учитываются простейшие дискретные состояния;
- информация подлежит накоплению;
- информация должна быть связана с её неопределенностью;
- используется логарифмическая мера, обладающая аддитивностью;
- при определении информации используется классический подход К. Шеннона.

Определение количества энтропии распределительной сети возможно, как уже упоминалось ранее, на основе классической модели К. Шеннона [192]. Она позволяет применять вероятности появления событий, которые определяются исходя из многолетней регистрации и статистической обработки параметров состояний элементов: частоты отказов, времени наработки на отказ, времени восстановления и др. Связь между вероятностью состояний и количеством информации, полученной при наступлении событий, выражается формулой Шеннона:

$$I = -\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i, \text{ при условии } \sum_{i=1}^N p_i = 1, \quad (3.1)$$

где I – количество информации; N – количество возможных событий; p_i – вероятность появления i -го события.

Классическое определение информации, по Шеннону, предполагает наличие статистического ансамбля: частоты появления событий и времени нахождения элемента в том или ином состоянии. Эти показатели, которые

рассматриваются с позиции надежности, позволяют определить вероятности нахождения элемента i в работоспособном и неработоспособном состояниях. В силу того, что в данном случае учитываются лишь два состояния, то рассчитать энтропию для рассматриваемого элемента i можно по выражению 3.2.

Формула (3.1), на наш взгляд, позволяет разграничить информацию по качественному признаку [47]:

$$I = -\left(\sum_{i=1}^{N_1} p_i \log p_i + \sum_{i=1}^{N_2} q_i \log q_i\right), \text{ при условии } \sum_{i=1}^{N_1} p_i + \sum_{i=1}^{N_2} q_i = 1, \quad (3.2)$$

где N_1 и N_2 – это количество работоспособных и неработоспособных состояний элемента; p_i и $q_i=1-p_i$ – вероятности работоспособного и неработоспособного состояний элемента i , которые определяются на основе статистической обработки таких данных, как частота отказов, время наработки на отказ, время восстановления и прочих.

Выражения (3.1)–(3.2) справедливы для тех событий, которые независимы друг от друга и имеют случайную природу, например, отказы объектов сети, при этом большая часть данного рода событий подчинена статистическим законам распределения. Практически для всех систем электроснабжения статистические данные указывают на то, что $p_i \gg q_i$. Поэтому левое слагаемое в формуле (3.2) по своей величине превышает значение правого слагаемого. Дополнительно отметим: равенство этих слагаемых будет достигнуто тогда, когда $p_1 = q_1 = \dots = p_i = q_i = \dots$, что свидетельствует о равновесии противоположных состояний или о наличии хаоса (беспорядка) в структуре сети. Такое равновесие (отсутствие порядка) неприемлемо при эксплуатации сетей, поскольку не удовлетворяет требованиям надежности.

Появление многих событий случайно и большинство из них подчинено законам распределения случайной величины, поэтому по (3.2) можно определить информационную энтропию для одного элемента i , а также

суммарную энтропию всех элементов сети без учета структурных связей между ними:

$$H_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n [H(p_i) + H(q_i)] = - \sum_{i=1}^n (p_i \log_2 p_i + q_i \log_2 q_i), \quad (3.3)$$

где n – число элементов в структуре распределительной сети, $H(p_i) = -p_i \log_2 p_i$ – энтропия работоспособного состояния элемента, $H(q_i) = -q_i \log_2 q_i$ – энтропия неработоспособного состояния элемента i .

В данном случае основание логарифма (равное двум) свидетельствует о рассмотрении двух качественно различающихся, противоположных состояний – работоспособного и неработоспособного, при добавлении еще какого-либо состояния основание логарифма должно быть увеличено. Для всех элементов i соблюдается условие: $p_i + q_i = 1$. Если для всех элементов: $p_i = q_i = 0.5$, максимум энтропии сети $H_{\Sigma} = n$. В процессе поиска оптимального решения величина H_{Σ} будет меняться и зависеть не столько от числа элементов сети, сколько от количества резервных элементов. С их увеличением возрастает и H_{Σ} .

Выражение (3.3) позволяет получить суммарную энтропию H_{Σ} в предположении о независимости функционирования элементов, то есть без учета структурных связей между элементами. Для сети при учете связей между элементами величина H_{Σ} будет оставаться во времени постоянной, если не рассматриваются ситуации, связанные с прибытием или выбытием информации касательно структуры сети (например, не включался в сеть или не исключался из рассматриваемой сети какой-либо элемент). Тогда для реальной сети со связями между элементами полученные значения энтропии работоспособного $H(P)$ и неработоспособного $H(Q)$ состояний элементов должны учитывать вероятные совместные состояния элементов по выражениям в [153; 157; 158].

Анализ надежности функционирования сети предполагает учет взаимосвязей между элементами. Требуется определить энтропию

работоспособного $H(P_{0-j})$ и неработоспособного $H(Q_{0-j})$ состояний по каждому выделенному участку $0-j$ на графе распределительной сети, где 0 – вершина графа, обозначающая источник электроэнергии сети (например, главная понизительная подстанция), j – номер вершины графа, обозначающий присоединенного к сети электроприемника. При расчете этих величин должны быть учтены вероятные совместные состояния элементов.

Когда рассматриваемые участки структуры состоят из последовательно соединенных элементов, выражения для определения величины энтропии с учетом разграничения энтропии на составляющие, будут иметь вид:

- для работоспособного состояния участка:

$$H(P_{0-j}) = \sum_{i=1}^m [(\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m p_k) H(p_i)]; \quad (3.4)$$

- для неработоспособного состояния участка:

$$H(Q_{0-j}) = \sum_{i=1}^m [H(q_i) + (1 - \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m p_k) H(p_i)]. \quad (3.5)$$

В (3.4) и (3.5) k – порядковый номер элемента участка $0-j$, m – количество элементов участка, $i = \overline{1, m}$ – порядковый номер элемента участка.

Для любого участка $0-j$ сохраняется условие:

$$H_{0-j} = H(P_{0-j}) + H(Q_{0-j}) = \sum_{i=1}^m (p_i \log_2 p_i + q_i \log_2 q_i). \quad (3.6)$$

Составной частью анализа структурной надежности распределительной сети является соблюдение условия о допущении возможного перерыва в электроснабжении группы или отдельных электроприемников. Поэтому меру неопределенности информации необходимо не только определить количество $H(P_{0-j})$ и $H(Q_{0-j})$, но и сопоставить их с граничными (критическими) величинами:

- $H^0(P_j)$ – энтропия как информация обеспечения бесперебойного электроснабжения электроприемника j по участку 0- j ;
- $H^0(Q_j)$ – энтропия как информация допустимого отказа в электроснабжении электроприемника j по участку 0- j .

Здесь верхний индекс 0 означает то, что величина граничной энтропии электроприемника j определяется исходя из требований к надежности электроснабжения потребителей.

Тем самым в процессе анализа рассматривается выполнение условий:

- для работоспособного состояния участка:

$$H(P_{0-j}) \leq H^0(P_j); \quad (3.7)$$

- для неработоспособного состояния участка:

$$H(Q_{0-j}) \leq H^0(Q_j). \quad (3.8)$$

Определить величины $H^0(P_j)$ и $H^0(Q_j)$ можно через граничные величины продолжительности работоспособного и неработоспособного состояний участка сети. Применим в качестве параметров (учитывая обоснования в [29]): M_{pj} – среднее время, в течение которого будет обеспечено бесперебойное электроснабжение электроприемника j по участку 0- j ; M_{qj} – среднее время, в течение которого допускается перерыв в электроснабжении электроприемника j по участку 0- j ; вероятность бесперебойного электроснабжения электроприемника j – $p_j^0 = M_{pj} / T$; вероятность допустимого отказа в электроснабжении – $q_j^0 = M_{qj} / T$; $T = M_{pj} + M_{qj}$ – число часов в году.

Граничные величины энтропии определяются по выражениям:

$$H^0(P_j) = p_j^0 \log_2 p_j^0; \quad (3.9)$$

$$H^0(Q_j) = q_j^0 \log_2 q_j^0. \quad (3.10)$$

Пример. Пусть имеется система, содержащая $n = 5$ элементов. Исходя из условия отсутствия последствия и ординарности, отказы элементов будем рассматривать в качестве случайных и независимых событий. Тем самым система (без учета связей между элементами) рассматривается в качестве «черного ящика», на входе которого имеем статистический ряд показателей. Необходимо определить энтропию элементов и системы.

Имеется статистический ряд данных (полученных в ходе испытаний или на основе экспертных оценок), включающий в себя интенсивности отказов λ_i распределенные на выделенном интервале времени t (год и более) (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Статистические данные и величины вероятностей и энтропий элемента

Показатели	1	2	3	4	5
Интервал времени, t	1	1	1	1	1
Вероятность безотказной работы, $p_i(t)$	0,905	0,670	0,368	0,223	0,135
Частная энтропия, h_i	0,1	0,4	1,0	1,5	2,0
Количество отказов, ω_i	1	2	4	3	5
Вероятность нахождения элемента i в работоспособном состоянии, p_i	0,067	0,133	0,267	0,20	0,333
Энтропия элемента, H_i	0,007	0,053	0,267	0,30	0,666

Суммарная энтропия системы – $H = 1,293 \text{ нит}$.

Полученная величина энтропии H_i связана с количеством отказов: чем больше элемент подвержен отказам, тем выше его энтропия. Сопоставляя энтропию элемента H_i с энтропией системы H через индекс H_i/H , можно судить об роли каждого из элементов в обеспечении надежности системы.

В качестве примера определения количества информации в структуре распределительной сети возьмем реальный объект – районные электрические сети одного из районов Республики Хакасия и продемонстрируем, учет каких

конкретно показателей позволяет определить структурное содержание реальной сети.

В качестве реальных технических объектов взяты две ячейки распределительной электрической сети А и В, функционирующие независимо. В структуру данных ячеек входят последовательно соединенные элементы электрической сети: разъединители, выключатели, трансформаторы, линии электропередач различных уровней напряжения.

Выполним расчет энтропии отдельно для ячейки А и ячейки В согласно фактическим данным, полученным в результате мониторинга и среднестатистических данных.

Представим в таблицах 3.2 и 3.3 количественные показатели по ячейкам А и В соответственно.

Таблица 3.2 – Количественные показатели ячейки А

Элемент сети	Количество элементов сети	Количество внезапных отключений потребителей (мониторинг), λ откл. /год	Количество внезапных отключений потребителей (статистика), λ откл. /год	Средняя продолжительность внезапных отключений (мониторинг), τ час	Средняя продолжительность внезапных отключений (статистика), τ час
Линейный разъединитель 35 кВ	1	0,015	0,01	7	6
Разъединитель 35 кВ	2	0,015	0,01	7	6
Выключатель 35 кВ	1	0,014	0,007	32	30
Трансформатор ГПП 35/10 кВ	1	0,009	0,007	67	65
ЛЭП 10 кВ	1	5,87	1,81	8	5
Линейный разъединитель 10 кВ	2	0,02	0,01	4,5	7
Разъединитель 10 кВ	2	0,012	0,01	6	7
Разъединитель ввода 10 кВ	1	0,02	0,007	5,5	7
Выключатель ввода 10 кВ	1	0,02	0,01	23,5	20
Линейный выключатель 10 кВ	1	0,018	0,007	22,5	20
ТП 10/0,4 кВ	1	0,019	0,016	45	50
Итого		6,08	1,93	8,3	5,82

Таблица 3.3 – Количественные показатели ячейки В

Элемент сети	Количество элементов сети	Количество внезапных отключений потребителей (мониторинг), λ откл. /год	Количество внезапных отключений потребителей (статистика), λ откл. /год	Средняя продолжительность внезапных отключений (мониторинг), τ час	Средняя продолжительность внезапных отключений (статистика), τ Час
Линейный разъединитель 35 кВ	1	0,015	0,01	7	6
Разъединитель 35 кВ	2	0,015	0,01	7	6
Выключатель 35 кВ	1	0,014	0,007	32	30
Трансформатор ГПП 35/10 кВ	1	0,009	0,007	67	65
ЛЭП 10 кВ	1	6,37	1,62	6,5	5
Линейный разъединитель 10 кВ	2	0,02	0,01	7,5	7
Разъединитель 10 кВ	2	0,012	0,01	4,5	7
Разъединитель ввода 10 кВ	2	0,02	0,007	5,5	7
Выключатель ввода 10 кВ	1	0,02	0,01	23,5	20
Линейный выключатель 10 кВ	1	0,018	0,007	22,5	20
ТП 10/0,4 кВ	1	0,019	0,016	52	50
Итого		6,62	1,75	6,84	5,9

Далее рассчитаем вероятности работоспособного и неработоспособного состояний ячеек. Для определения вероятности отказа используем формулу: $q = \frac{\lambda \tau}{8760}$ час. Для определения вероятности безотказной работы: $p = 1 - q$.

Таблица 3.4 – Результаты расчета вероятностей

Ячейка	А		В	
	$p(A)$	$q(A)$	$p(B)$	$q(B)$
Мониторинг	0,99424	0,00576	0,99484	0,00517
Статистика	0,99872	0,00128	0,99882	0,00118

Величину энтропии для ячеек можно определить по выражениям:

$$H(p_i) = -p_i \log_2 p_i; H(q_i) = -q_i \log_2 q_i.$$

Таблица 3.5 – Результаты расчета информационной энтропии

Ячейка	А		В	
	$H(p(A))$	$H(q(A))$	$H(p(B))$	$H(q(B))$
Мониторинг	0,008286	0,042853	0,007425	0,039269
Статистика	0,001845	0,012300	0,001701	0,011478

Далее определим величины граничной энтропии для данных ячеек и проверим выполнение условия по ограничениям:

1) граничные значения среднегодовой продолжительности неработоспособного состояния: для ячейки А примем $M_{qA} = 40$ часов; для ячейки В – $M_{qB} = 60$ часов. Для работоспособного состояния: $M_{pA} = T - M_{qA} = 8760 - 40 = 8720$ часов; $M_{pB} = 8700$ часов;

2) рассчитаем вероятности бесперебойной работы и допустимого отказа элементов сети:

$$\text{- для ячейки А: } p_A^0 = \frac{M_{pA}}{T} = \frac{8720}{8760} = 0,9977;$$

$$\text{- для ячейки В: } p_B^0 = \frac{M_{pB}}{T} = \frac{8700}{8760} = 0,9931;$$

3) граничные величины информационной энтропии:

- для ячейки А:

$$H^0(P_A) = -p_A^0 \log_2 p_A^0 = -0,9977 \log_2 0,9977 = 0,0033 \text{ бит};$$

- для ячейки В:

$$H^0(P_B) = -p_B^0 \log_2 p_B^0 = -0,9931 \log_2 0,9931 = 0,0099 \text{ бит}.$$

В результате видно, что условия по ограничениям $H(P) < H^0(P)$ не выполняется лишь для ячейки А в случае учета показателей мониторинга. Для ячейки В условия выполняются для данным, полученным в результате мониторинга и среднестатистических данных. При этом стоит отметить, что данные мониторинга более ценны в силу того, что они получены в ходе непосредственной фиксации отказов. В силу этого оптимальным вариантом выступает добавление резервов в ячейку А с целью повышения уровня надежности данной ячейки до требуемого значения. При этом стоит отметить, что расчет надежности через информационную энтропию позволяет избежать проблемы с плавающей точкой, в случае расчетов реальных значений вероятностей работоспособного и неработоспособного состояний.

Процедура расчета энтропии сети и анализа выявления несоблюдения условию поддержания требуемого уровня надежности

Вычислительная процедура построения задачи поиска «слабого» звена в случае выявления условия несоблюдения требуемого уровня надежности при выборе структуры:

1. Формируется структура распределительной сети в виде графа, в котором: ветви – элементы сети (как правило, оборудование, ЛЭП, трансформаторы, выключатели и др.); вершины – источник электроэнергии и электроприемники (потребители).

2. На основе статистических данных о состоянии элементов сети (частота отказов и время восстановления оборудования) определяются вероятности состояния элементов: $q_i = 1 - p_i$ и рассчитывается информационная энтропия каждого элемента сети: $H(p_i) = -p_i \log_2 p_i$; $H(q_i) = -q_i \log_2 q_i$, где q_i и p_i – вероятность неработоспособного и работоспособного состояния элемента i сети.

3. Строится целевая функция минимума затрат, имеющая (простой линейный) вид:

$$\sum_{i=1} c_i x_i \rightarrow \min, \text{ где } c_i - \text{стоимость затрат на создание элемента сети } x_i.$$

4. Для потребителя (выбранной вершины графа) l вычисляется величина граничного значения энтропии следующим образом. В качестве исходной величины принимается (согласно категории надежности электроснабжения) среднегодовая (в часах) продолжительность неработоспособного состояния M_{ql} электроприемника и рассчитывается величина среднегодовой продолжительности работоспособного состояния: $M_{pl} = T - M_{ql}$, где T – продолжительность эксплуатации оборудования (например, 1 год). Имея эти данные, вычисляются вероятности работоспособного и неработоспособного состояний электроприемника

соответственно по выражениям: $p_i^0 = \frac{M_{pi}}{T}$; $q_i^0 = \frac{M_{qi}}{T}$. Полученные

вероятности позволяют вычислить граничные значения энтропии работоспособного и неработоспособного состояний вершин:

$$H^0(P_i) = -p_i^0 \log_2 p_i^0; \quad H^0(Q_i) = -q_i^0 \log_2 q_i^0.$$

5. Выделяется участок на графе «источник–потребитель» (0- l), для которого по предлагаемой выше методике для рассматриваемой задачи строится левая часть ограничения. Она позволяет вычислять энтропию работоспособного и неработоспособного состояний – $H(P_{0l})$ и $H(Q_{0l})$.

6. Каждое полученное значение энтропии участка сети сопоставляется с величиной граничной энтропии потребителя. На основании их сопоставления делаются выводы: 1) если выполнимы соотношения $H(Q_{0i}) < H^0(Q_i)$ – условия обеспечения уровня надежности участка выполняются; 2) в случае, когда $H(Q_{0i}) > H^0(Q_i)$ – условия не выполняются, что свидетельствует о необходимости принятия мер, направленных на повышение уровня надежности посредством резервирования слабых звеньев участков сети, перейдя к пункту 4.

В данной вычислительной процедуре предусмотрен анализ выявления несоблюдения условия поддержания требуемого уровня надежности рассматриваемой структуры. В случае несоблюдения условия в пункте 6 корректируются (согласно методике оценки состояния и выбора структуры высоконадежной распределительной сети) уравнения левых частей ограничений при условии, что $x_i > 1$. Тем самым создаются модифицированные математические выражения системы ограничений, предусматривающие соблюдение высокого уровня надежности сети с учетом резервирования элементов.

Далее на примере будет продемонстрирован описанный способ вычисления количества энтропии в структуре распределительной сети.

Пример. Пусть дана распределительная сеть, для простоты ее можно представить в виде графа (рис. 3.1). Необходимо определить величину энтропии для участков 0–5 (ветви 0–2 и 2–5) и 0–1 и сопоставить полученные результаты с граничным значением энтропии электроприемников в вершинах 5 и 1.

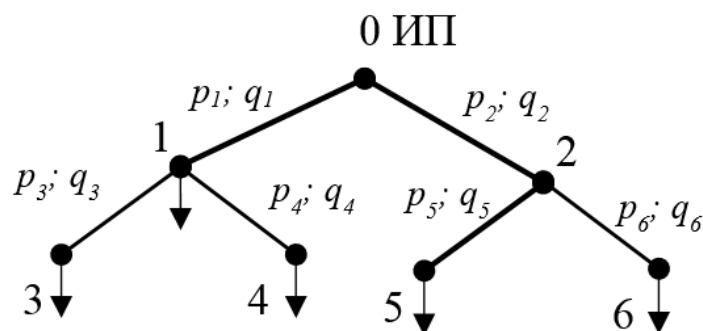


Рисунок 3.1 – Граф распределительной сети

Решение. Примем вероятности работоспособного состояния элементов: $p_1 = 0.985$, $p_2 = 0.975$, $p_5 = 0.998$ (p_3 , p_4 и p_6 не рассматриваются в расчетах). Далее рассчитаем вероятности неработоспособного состояния элементов $q_i = 1 - p_i$: $q_1 = 0.015$, $q_2 = 0.025$, $q_5 = 0.002$.

Величину энтропии для выбранных элементов можно определить по выражениям: $H(p_i) = -p_i \log_2 p_i$; $H(q_i) = -q_i \log_2 q_i$.

Результат: $H(p_1) = 0.021$; $H(q_1) = 0.09$; $H(p_2) = 0.035$; $H(q_2) = 0.013$; $H(p_5) = 0.003$; $H(q_5) = 0.018$.

Определим величины граничной энтропии для электроприемников 1 и 5:

1) граничные значения среднегодовой продолжительности неработоспособного состояния: для электроприемника 1 примем $M_{q1} = 80$ часов; для электроприемника 5 – $M_{q5} = 200$ часов. Для работоспособного состояния: $M_{p1} = T - M_{q1} = 8760 - 80 = 8680$ часов; $M_{p5} = 8560$ часов;

2) рассчитаем вероятности бесперебойной работы и допустимого отказа элементов сети:

- для электроприемника 1:

$$p_1^0 = M_{p1} / T = 8680 / 8760 = 0.9909; q_1^0 = M_{q1} / T = 0.009;$$

- для электроприемника 5:

$$p_5^0 = M_{p5} / T = 8560 / 8760 = 0.9771; q_5^0 = M_{q5} / T = 0.0228;$$

3) граничные величины информационной энтропии:

- для электроприемника 1:

$$H^0(P_1) = -p_1^0 \log_2 p_1^0 = -0.9909 \log_2 0.9909 = 0.013;$$

$$H^0(Q_1) = -q_1^0 \log_2 q_1^0 = -0.009 \log_2 0.009 = 0.0612.$$

- для электроприемника 5: $H^0(P_5) = 0.0326$; $H^0(Q_5) = 0.124$.

Рассчитаем для данных участков сети энтропию противоположных состояний сети:

- для работоспособного состояния участка 0-1:

$$H(P_{0-1}) = H(p_1) = 0.021;$$

- для работоспособного состояния участка 0-5:

$$H(P_{0-5}) = p_5 H(p_2) + p_2 H(p_5) = 0.0278;$$

- для неработоспособного состояния участка 0-1:

$$H(Q_{0-1}) = H(q_1) = 0.09;$$

- для неработоспособного состояния участка 0-5:

$$H(Q_{0-5}) = H(q_2) + H(q_5) + q_2 H(p_5) + q_5 H(p_2) = 0.0311.$$

Проверка выполненного расчета для участка 0–5:

$$H(P_{0-5}) + H(Q_{0-5}) = H(p_2) + H(q_2) + H(p_5) + H(q_5)$$

$$0.0378 + 0.0311 = 0.035 + 0.013 + 0.003 + 0.018$$

$$0.0689 = 0.0689.$$

Сопоставляем значения энтропии:

- для участка 0-1: $H(P_{0-1}) > H^0(P_1)$, $H(Q_{0-1}) > H^0(Q_1)$;

- для участка 0-5: $H(P_{0-5}) < H^0(P_5)$; $H(Q_{0-5}) < H^0(Q_5)$.

Как видно из данного сопоставления, условия (3.7) и (3.8) для участка 0–5 рассматриваемой сети выполняются, а для – 0–1 не выполняются. Поэтому на участке 0–1 работу по обеспечению требуемого уровня надежности следует признать неудовлетворительной, а на участке 0–5 – удовлетворительной. На основании этого на участке 0–1 необходимо принять ряд мер (например, посредством резервирования) по устранению нежелательных последствий и предупреждению непредвиденных ситуаций, так как это в свою очередь в будущем позволит избежать лишних издержек.

3.2 Построение структуры распределительной сети с оптимальным резервированием

Построение структуры сети связано с её вероятным состоянием и, следовательно, не исключает расчета меры неопределенности информации, которую в дальнейшем необходимо сравнить с граничным значением информационной энтропии. Как было описано ранее, данная мера играет определенную роль в измерении структурной надежности данной сети. Возможности применения энтропийного подхода, учитывающего основополагающие принципы системного взгляда на роль информационной энтропии в живой и неживой природе, к анализу состояния структур были представлены в работах [60; 61; 71; 151; 150; 156; 161].

Структуру такой системы, как распределительная сеть, можно представить в виде графа, ветви которого представляют собой связи источника энергии с потребителями (элементов сети), а также связи между потребителями, которые в данном графе представляют собой вершины или узлы. Данный граф представляет собой ациклический граф $G = (U, X)$, где U – множество узлов, которые в данном случае представляют собой потребителей и источник питания, X – множество ветвей, представляющих собой связи (например, линии электропередач) между элементами сети.

Множество U включает в себя начальную вершину ("исток") u_0 ; множество конечных вершин (в данном случае конечные потребители в дереве сети) $u_j \in U_1$; множество фиктивных вершин (места присоединения элементов сети (дуг) друг к другу) $u_k \in U_2$; всё множество ветвей дерева (связей) $M_j \subseteq G$. При этом каждая j -я ветвь (связь между источником и потребителем) – это множество дуг m_j , $(u_0 = 1, u_j = 1, u_k) \in M_j$. Все дуги $x_i \in X$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Каждой дуге x_i приписаны стоимость i -го элемента и вероятность появления события (меняющего состояние элемента). Каждой вершине $u_j \in U_1$ ($j=1, 2, \dots, m$) приписана граничная величина энтропии, величина которой устанавливается при построении задачи оптимизации.

После построения графа данной сети следующим шагом является формулировка задачи оптимизации, в данном случае в качестве целевой функции задачи оптимизации выступает минимизация стоимости сети: $\min < c_i, x_i >$, имеющей линейный вид. Формулировка ограничений, представленных в виде неравенств, которые накладываются на рассматриваемую задачу, представляет собой довольно сложную задачу по той причине, что построенный граф имеет форму дерева. У данного дерева все ветви представляют собой параллельно-последовательные связи между элементами данной сети. При этом параллельное соединение также подразумевает добавление резервного элемента в сеть. Каждую ветвь можно рассматривать в отдельности как состоящий из путей и сечений граф. При этом

информационную энтропию, которая входит в данные ограничения, можно рассчитать через величину вероятности работоспособного и неработоспособного состояний элементов и согласно (3.1) рассчитать количество энтропии. Рассмотрим это более детально.

Можно воспользоваться математическими уравнениями, предложенными в [68; 151; 156; 149], для того, чтобы построить уравнения ограничений данной задачи. На их основе с учетом теорем сложения и умножения вероятностей выразим математическое выражение информационной энтропии ветви графа.

Пусть имеется рассматриваемая j -я ветвь u_0-u_j , связывающая источник u_0 с потребителем u_j . Данная ветвь с учетом резервирования имеет параллельно-последовательную структуру, в которой параллельно соединенные элементы представляют собой сечение i , а последовательно соединенные элементы – путь j . Введем обозначения: n – количество сечений на пути от источника к потребителю (для сети без резерва, n – количество элементов пути); $i = \overline{1, n}$ – порядковый номер сечения (или элемента) пути; m_i – количество резервных элементов сечения i ; $k = \overline{1, m_i}$ – порядковый номер элемента в сечении i . Построим математическое выражение ограничений задачи относительно рассматриваемой j -й ветви.

Рассматривая путь, можно определить:

- вероятность неработоспособного состояния сечения i :

$$Q_i = \prod_{k=1}^{m_i} q_k, \quad (3.11)$$

где k – порядковый номер элемента, входящего в сечение i ; q_k – вероятность неработоспособного состояния элемента k , сечения i ;

- вероятность работоспособного состояния сечения i :

$$P_i = 1 - Q_i; \quad (3.12)$$

- энтропия неработоспособного состояния сечения i :

$$H(Q_i) = \sum_{k=1}^{m_i} [(\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{m_i} q_k) H(q_i)] = - \sum_{k=1}^{m_i} (Q_i \cdot \log_2 q_i); \quad (3.13)$$

- энтропия работоспособного состояния пути j с учетом резервирования:

$$H(P_j) = \sum_{i=1}^n [\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n P_k H(P_i)], \quad (3.14)$$

где k – порядковый номер сечения i ; P_i или P_k – вероятность безотказной работы сечения i ;

- энтропия неработоспособного состояния пути j с учетом резервирования:

$$H(Q_j) = \sum_{i=1}^n [H(Q_i) + (1 - \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n P_k) H(P_i)], \quad (3.15)$$

где k – порядковый номер сечения i , лежащего на пути j .

Рассматривая нагруженное резервирование, отметим следующее: элементы, резервирующие друг друга, находятся в одинаковых условиях эксплуатации, имеют приблизительно одинаковые параметры и свойства, следовательно, вероятности неработоспособного состояния элементов сечения i принимаются равными по величине: $q_1 = \dots = q_k = \dots = q_m$. Тогда математическую модель описания энтропии пути j с учетом резервирования представим далее.

В выражениях (3.11) и (3.13) количество резервных элементов m_i в сечении i неизвестно, обозначим его как x_i , тогда выражение (3.11) будет иметь вид:

$$Q_i = q_i^{x_i}, \quad (3.16)$$

где q_i – вероятность неработоспособного состояния элемента k в сечении i ; x_i – количество резервных элементов сечения i , подлежащих определению по условию задачи оптимизации.

Согласно (3.16):

$$P_i = 1 - Q_i = 1 - q_i^{x_i}. \quad (3.17)$$

Для сечения i :

- энтропия неработоспособного состояния сечения i согласно подстановке (3.16) в (3.13):

$$H(Q_i) = x_i q_i^{x_i-1} H(q_i) = -x_i q_i^{x_i} \cdot \log_2 q_i; \quad (3.18)$$

- то же работоспособного состояния:

$$H(P_i) = x_i [H(p_i) + H(q_i) - q_i^{x_i-1} H(q_i)]. \quad (3.19)$$

Из (3.18) и (3.19) следует, что энтропия сечения i :

$$H_i = H(P_i) + H(Q_i) = x_i [H(p_i) + H(q_i)]. \quad (3.20)$$

Применительно к задаче оптимизации, выполняя ряд преобразований (учитывая подстановку выражений (3.16)-(3.19) в (3.14) и (3.15)), можно получить уравнения с неизвестными x для определения $H(P_j)$ и $H(Q_j)$. Однако такие уравнения в развернутом виде весьма громоздки, что затрудняет их реализацию в качестве ограничений задачи поиска оптимального решения. Тем не менее их можно сократить при определенных условиях: в частности, второе слагаемое в (3.15) будет иметь малую величину (по отношению к первому слагаемому) при вероятностях безотказной работы P_i , близких к единице. Например, при всех $p_i = 0.95$ первое и второе слагаемое отличаются друг от друга более чем в 30 раз, а для всех $p_i = 0.99$ в 200 раз. Поскольку при решении задач резервирования требуется высокий уровень обеспечения надежности распределительной сети, то согласно статданным вероятности безотказной работы её элементов изменяются в пределах $0,99 \div 0,999$. Следовательно, вторым слагаемым в (3.15) можно пренебречь, записав уравнение для определения энтропии неработоспособного состояния пути с учетом резервирования в виде:

$$H(Q_j) \approx \sum_{i=1}^n H(Q_i) = \sum_{i=1}^n x_i q_i^{x_i} \cdot (-\log_2 q_i). \quad (3.20)$$

Данное выражение можно рассматривать в качестве ограничения,

накладываемого на поиск оптимального решения задачи резервирования. Математическая модель резервирования будет иметь вид:

$$\sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^n c_{ji} x_j \rightarrow \min, \quad (3.21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} H(P_{01}) \leq H^0(P_{01}); \\ H(P_{02}) \leq H^0(P_{02}); \\ \dots\dots\dots \\ H(P_{0l}) \leq H^0(P_{0l}); \\ \dots\dots\dots \\ H(P_{0L}) \leq H^0(P_{0L}); \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{n_1} x_{1i} q_{1i}^{x_{1i}} \cdot (-\log_2 q_{1i}) \leq H^0(Q_{01}); \\ \sum_{i=1}^{n_2} x_{2i} q_{2i}^{x_{2i}} \cdot (-\log_2 q_{2i}) \leq H^0(Q_{02}); \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^{n_l} x_{li} q_{li}^{x_{li}} \cdot (-\log_2 q_{li}) \leq H^0(Q_{0l}); \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^{n_L} x_{Li} q_{Li}^{x_{Li}} \cdot (-\log_2 q_{Li}) \leq H^0(Q_{0L}), \end{array} \right. \quad (3.22)$$

где $x_{ji} \geq 0$; x_{li} – количество i -х резервных элементов на участке сети (связь 0- l); 0 – обозначение номера источника питания; n_l – количество элементов, принадлежащих связи 0- l ; $H^0(Q_{0l}) = -q_l^0 \log_2 q_l^0$ – граничная величина энтропии неработоспособного состояния связи 0- l (при несоблюдении которой нарушается условие достижения требуемого числа резервных элементов); q_l^0 – вероятность допустимого перерыва энергоснабжения потребителя l ; q_{li} – вероятность неработоспособного состояния элемента i , принадлежащего связи 0- l . Систему ограничений, в зависимости от назначения задачи, также можно выразить через энтропию $H(P_{0l})$ работоспособного состояния участка 0- l и граничную величину энтропии $H_0(P_{0l})$ работоспособного состояния.

Перейдем к вопросу об установлении величины $H^0(Q_j)$. С позиции соблюдения уровня надежности сети эта величина определяется из условия о допущении специалистами по проектированию возможного перерыва в электроснабжении отдельных или группы потребителей. Граничная величина

информационной энтропии пути определяется с учетом обоснований из [42] по следующему выражению:

$$H^0(Q_j) = q_j^0 \log_2 q_j^0, \quad (3.23)$$

где $q_j^0 = M_{qj}/T$ – вероятность допустимого перерыва в энергоснабжении потребителей по пути j ; M_{qj} – среднее время (в часах) допустимого перерыва в энергоснабжении по пути j ; T – общее количество часов в году.

Решение (3.21)–(3.22) относится к задаче нелинейного программирования и нами в настоящей работе не рассматривается. Тем не менее предложим пример поиска количества резервных элементов для какой-либо одной из ветвей структуры сети.

Пример. Рассматривается распределительная сеть в виде графа, состоящего из $n = 3$ ветвей (элементов), соединенных последовательно. Необходимо определить количество резервных элементов для каждого из имеющихся путей (ветви): x_1 , x_2 и x_3 . В расчетах индекс j не учитывается. Исходные данные задачи: вероятности работоспособного состояний элементов – $p_1 = 0.95$, $p_2 = 0.97$, $p_3 = 0.99$; стоимость всех элементов i одинакова – $c_1 = c_2 = c_3$.

Решение. Определим вероятности неработоспособного состояния элементов: $q_1 = 0.05$, $q_2 = 0.03$, $q_3 = 0.01$.

Величины энтропии элементов сети, измеряемые в битах:

$$H(p_1) = 0.07; \quad H(q_1) = 0.216; \quad H(p_2) = 0.043; \quad H(q_2) = 0.152; \\ H(p_3) = 0.014; \quad H(q_3) = 0.066.$$

Величина граничной энтропии для пути рассчитывается по выражению (3.23): примем величину среднегодовой продолжительности неработоспособного состояния пути $M_q = 100$ часов, $T = 8\,760$ часов; вероятность допустимого отказа в энергоснабжении пути – $q^0 = M_q/T = 100 / 8760 = 0.011$; граничная величина энтропии – $H^0(Q) = -q^0 \log_2 q^0 = -0.011 \cdot \log_2 0.011 = 0.074$.

Решение находим по выражению согласно (3.20):

$$H(Q) \approx -x_1 q_1^{x_1} \cdot \log_2 q_1 - x_2 q_2^{x_2} \log_2 q_2 - x_3 q_3^{x_3} \log_2 q_3. \quad (3.24)$$

Подставив в (3.24) необходимые величины, выполняя подстановки целочисленных значений x и соблюдая в процессе поиска решения условие $H(Q) \leq H^0(Q)$ ($H(Q) = 0.034 < 0.074$), получим следующие результаты: $x_1 = 2$, $x_2 = 2$ и $x_3 = 2$. Таким образом, каждому элементу пути требуется один резервный элемент.

В практике проектирования распределительных сетей с целью повышения уровня надежности используется резервирование однотипными элементами. При этом учет резервов требует значительного расхода денежных средств. Следовательно, необходимо оптимально распределять средства при сохранении требуемой надежности сети.

Будем полагать, что исходная структура проектируемой сети имеет радиальный вид без резервирования. Каждый её элемент i характеризуется показателями: затраты на строительство C_i ; коэффициент готовности или вероятность работоспособного состояния (безотказной работы) p_i ; коэффициент неготовности или вероятность неработоспособного состояния (отказа) q_i .

Для определения показателей используется статистика отказов или нормативные величины. Вероятность работоспособного состояния рассчитывается по формуле: $p = r / (m + r) = r / T$, а неработоспособного состояния по формуле: $q = 1 - p$. Здесь $m = 1/\lambda$ – наработка на отказ; r – среднее время восстановления; λ – параметр потока отказов; $m + r = T$ – среднее время между отказами.

Согласно теории надежности [136] задачи оптимального резервирования делятся на прямую и обратную:

1. Согласно прямой задаче необходимо найти вектор x^* , являющийся решением:

$$\min\{p(x): C(x) \geq C^0\} \text{ или } \min\{q(x): C(x) \leq C^0\}, \quad (3.25)$$

где $p(x)$ и $q(x)$ – минимизируемые вероятности; $C(x)$ – денежные затраты на резерв; C^0 – заданные ограничения.

2. Согласно обратной задаче необходимо найти вектор x^* , являющийся решением:

$$\min\{C(x): p(x) \geq p^0\} \text{ или } \min\{C(x): q(x) \leq q^0\}. \quad (3.26)$$

В задачах (3.25) и (3.26) показатель надежности схемы выражен через вероятности состояний элементов, что позволяет применить методы определения информационной энтропии. В их основе лежит принцип К. Шеннона выбора из многообразия альтернатив.

Таким образом, задача построения оптимальной структуры радиальной распределительной сети с резервированием элементов предполагает применение разработанной методики с соблюдением как минимум двух показателей. Первый из них общеизвестен – экономический, второй – неопределенность информации, отражающая уровень структурной надежности сети. Именно последний показатель принимается в качестве ограничения на поиск решения задачи. Построенные ограничения в виде нелинейных уравнений определения информационной энтропии формируют область допустимых решений (ОДР) задачи. По сути, ОДР – пространство возможных решений, когда полученное число резервных элементов будет нести информацию о том, что надежность функционирования сети отвечает предъявленным к ней требованиям со стороны специалистов по проектированию и эксплуатации.

Если рассматривать радиальную сеть как совокупность элементов без учета связей между ними (при независимом функционировании элементов), то можно, согласно выражению (3.3), определить суммарную энтропию (величину неопределенности информации).

Решение задач (3.25) и (3.26) сводится к построению параллельной структуры сети, в которой соединенные между собой элементы образуют резервные группы (рис. 3.2).

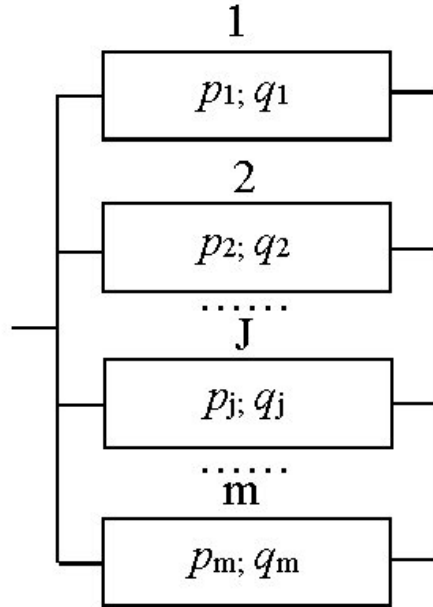


Рисунок 3.2 – Параллельная структура сети

Для последовательно-параллельных структур выражение определения суммарной энтропии с учетом разграничения энтропии на составляющие, для двух состояний (работоспособное и отказ) и m элементов в резервируемой группе j записывается в виде:

- для неработоспособного состояния элементов группы:

$$H(Q_j) = - \sum_{i=1}^m [(\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^m q_k) H(q_i)]; \quad (3.27)$$

- для работоспособного состояния элементов группы:

$$H(P_j) = - \sum_{k=1}^m [H(p_k) + H(q_k)] + H(Q_j) = H_\Sigma - H(Q_j). \quad (3.38)$$

В (3.27) и (3.38) k – порядковый номер элемента в группе j , m – количество резервных элементов в группе.

Далее представим задачу оптимизации (3.26) с участием меры неопределенности информации: $\min\{C(x) : H(P) \geq H^0(P)\}$ или

$\min\{C(x): H(Q) \leq H^0(Q)\}$, где $H^0(P)$ и $H^0(Q)$ – граничная (критическая) величина информационной энтропии, при несоблюдении которой нарушается условие достижения требуемого числа резервных элементов. Выдвинем условие: все резервные элементы в группе имеют одинаковые значения показателей, то есть $p_1 = p_2 = \dots = p_k = \dots = p_m$ и $q_1 = q_2 = \dots = q_k = \dots = q_m$. Обозначим через x_j размер j -й резервной группы (общее количество соединенных параллельно однотипных резервных элементов). Тогда из принятого условия энтропия неработоспособного состояния группы:

$$H(Q_j) = -xq^{x-1}H(q) = -xq^x \log_2 q. \quad (3.29)$$

В (3.29) и далее символ j при x и q не указан по причине освобождения формул от громоздкости.

В свою очередь, согласно (3.28) и (3.29), энтропия работоспособного состояния группы:

$$H(P_j) = -x(p \log_2 p + q \log_2 q - q^x \log_2 q) = -x(H - q^x \log_2 q). \quad (3.30)$$

Соблюдая условие ограничения на количество информационной энтропии и используя 3.30), запишем уравнения ограничений:

$$\text{- по } H^0(P): H - q^x \log_2 q \geq H^0(P); \quad (3.31)$$

$$\text{- по } H^0(Q): q^x \log_2 q \leq H^0(Q). \quad (3.32)$$

Тогда задачу оптимизации в общей форме из вида (3.21)–(3.22) можно представить в виде:

$$C(x_j) = \sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \min, \quad (3.33)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1^{x_1} \log_2 q_1 \leq H^0(Q_1); \\ \dots\dots\dots \\ q_j^{x_j} \log_2 q_j \leq H^0(Q_j); \\ \dots\dots\dots \\ q_n^{x_n} \log_2 q_n \leq H^0(Q_n); \end{array} \right. \quad (3.34)$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где n – число групп в радиальной сети.

Система ограничений (3.34) может быть преобразована к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 q_1^{x_1} \leq H^0(Q_1); \\ \dots\dots\dots \\ a_j q_j^{x_j} \leq H^0(Q_j); \\ \dots\dots\dots \\ a_n q_n^{x_n} \leq H^0(Q_n), \end{array} \right. \quad (3.35)$$

где $a_j = \log_2 q_j$ – коэффициент при нелинейном уравнении.

При решении системы (3.33)– (3.34) следует определиться с граничной величиной энтропии $H^0(Q_j)$, роль и значения которой должны быть понятны специалисту по проектированию. Для установления величины $H^0(Q_j)$ в (3.34) или (3.35), можно предварительно представить её как процентное соотношение с суммарной энтропией элемента резервной группы j :

$$H_{\%}^0(Q_j) = \frac{H(Q_j)}{H_j} \cdot 100, \quad (3.36)$$

где $H_j = -p_j \log_2 p_j - q_j \log_2 q_j$, $H(Q_j) = -q_j^x \log_2 q_j$.

Полученная величина позволяет определить $H_{\%}^0(P_j) = 100 - H_{\%}^0(Q_j)$.

Далее на примере покажем определение $H^0(Q_j)$. Предположим: а) резерв отсутствует ($x = 1$), принимаем $p = 0,99$ (для высоконадежных элементов) и $q = 1,0 - 0,99 = 0,01$, тогда согласно (3.36) – $H_{\%}^0(Q_j) = 82,23\%$, $H_{\%}^0(P_j) = 17,77\%$; б) резерв состоит из 2-х элементов ($x = 2$) и $p = 0,99$ – $H_{\%}^0(Q_j) = 0,82\%$; в) резерв состоит из 3-х элементов ($x = 3$) и $p = 0,99$ – $H_{\%}^0(Q_j) = 0,01\%$. Имея граничную величину в процентах можно по (3.36) определить граничную величину энтропии в битах, необходимую для её подстановки в систему ограничений задачи оптимизации. Полученные значения (при различных вариантах резервирования) не отражают реального соотношения граничной величины энтропии с заданными значениями вероятностей. Дело в том, что для существующей сети, обладающей высокой надёжностью элементов, информационная энтропия её безотказной работы $H_{\%}^0(P_j) \gg H_{\%}^0(Q_j)$. Однако для первого варианта данное условие не соблюдается. Чтобы данное условие было соблюдено, можно заменить вероятности при логарифме на значения большие 1,0.

Рассмотрим применение в качестве параметров, учитывая обоснования в [29], среднее время работоспособного M_{pi} и неработоспособного M_{qi} состояний элемента i , по значениям которых можно найти вероятности $p_i = M_{pi}/T$ и $q_i = M_{qi}/T$, где $T = M_{pi} + M_{qi}$ – число часов в году. Величина энтропии элемента определится по выражению:

$$H_i = p_i \log_2 M_{pi} + q_i \log_2 M_{qi};$$

$$H(Q_j) = q^x \log_2 M_{qi}; \text{ при условии } p_i + q_i = 1. \quad (3.37)$$

Решение задачи (3.33)–(3.34) допускает использование M_{pi} и M_{qi} , позволяя тем самым определить $H_{\%}^0(Q_j)$. Рассчитаем данную энтропию на предыдущем примере (вариант а), предварительно установив $T = 10\,000$ часов: резерв отсутствует ($x = 1$); принято среднее время работоспособного состояния (наработка на отказ) – $M_{pi} = 9\,900$ часов (соответствует $p = 0,99$);

определено среднее время восстановления – $M_{qi} = 100$ часов ($q = 0,01$). Тогда согласно (3.36) и (3.37) – $H(Q_j) = 0,066$, $H_i = 13,207$, $H_{\%}^0(Q_j) = 0,05\%$, $H_{\%}^0(P_j) = 99,5\%$. Полученные значения подтверждают адекватность граничной оценки условиям резервирования.

Для установления величины $H^0(Q_j)$ достаточно задать ожидаемое (предполагаемое) число часов неработоспособного M_{qi} состояния группы j и определить его по (3.36) и (3.37). Например, среднее время аварийного простоя элемента или потребителя энергии M_q не должно быть меньше 175 часов в году. Тогда время наработки на отказ (исходя из 10 000 часов функционирования системы) $M_p = 9\,825$ часов. Вероятности: $p = 0.9825$; $q = 0.0175$. Критическая величина энтропии для группы элементов: $H = H(M_p) + H(M_q) = p \log_2 M_p + q \log_2 M_q = 0,9825 \log_2 9825 + 0,0175 \log_2 175 = 13.161$.

$$H_{\%}^0(Q_j) = \frac{H(M_q)}{H} \cdot 100 = \frac{0.13}{13.161} \cdot 100 = 0.991\% \quad \text{или} \quad H^0(Q_j) = \frac{H(M_q)}{H} = \frac{0.13}{13.161} = 0.0099.$$
Тем самым граничное значение энтропии (исходя из принятого выше условия – $M_q = 175$ часов) для группы элементов j принимаем: $H^0(Q_j) = 0.01$.

Решение задачи (3.33)-(3.35) возможно с применением классических методов нелинейного программирования.

3.3 Расчет количества резервных элементов распределительной сети

Как упоминалось ранее, одним из возможных способов повышения уровня надежности системы, в случае несоблюдения нормативных требований по надежности данной системы, выступает резервирование участков сети, то есть добавление резервных элементов в сеть. Однако в данном случае встает вопрос об оптимальном количестве добавляемых в систему резервных элементов. Найти решение этой задачи возможно методом неопределенных множителей Лагранжа согласно [72]. При этом важно понимать, что при применении указанного метода нужно учесть, что в

качестве ограничений выступают уравнения, а не неравенства, для которых должно выполняться условие Куна-Таккера.

Допустим, имеется два последовательно соединенных элемента сети, целевая функция и ограничение будут иметь следующий вид:

$$C(x_1) = c_1 x_1 + c_2 x_2, \text{ зададим: } c = 200 \text{ тыс. рублей,}$$

$$q_1^{x_1} \log_2 q_1 = H^0(Q_1), \text{ зададим: } q_1 = 0.081, \text{ и } q_2 = 0.082.$$

Граничное значение среднегодовой продолжительности отказа сети зададим: $M_{q1} = 80$ часов.

Следующим шагом определим вероятность допустимого отказа элемента сети и вероятность бесперебойной работы данного элемента:

$$p_1^0 = M_{p1} / T = 8680 / 8760 = 0.9909;$$

$$q_1^0 = M_{q1} / T = 0.009;$$

$$H^0(Q_1) = -q_1^0 \log_2 q_1^0 = -0.009 \log_2 0.009 = 0.0612.$$

$$C(x_j) = \sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \min,$$

$$-0.081^{x_1} \log_2 0.081 - 0.082^{x_2} \log_2 0.082 = 0.0612;$$

$$0.081^{x_1} \cdot 3.62 + 0.082^{x_2} \cdot 3.6 = 0.0612;$$

$$3.62 \cdot (0.081^{x_1} + 0.082^{x_2}) = 0.0612;$$

$$0.081^{x_1} + 0.082^{x_2} = 0.017.$$

С учетом данных расчетов формула Лагранжа примет следующий вид:

$$L(x_1, x_2, \lambda) = 200 \cdot x_1 + 200 \cdot x_2 + \lambda \cdot (0.081^{x_1} + 0.082^{x_2} - 0.017). \quad (3.38)$$

Затем проводим дифференцирование формулы Лагранжа по всем неизвестным, находим значение неопределенного множителя λ , а уже затем рассчитываем минимальное количество резервных элементов. Если их будет по 2 возможных резерва, то выбираем тот, который будет при минимуме затрат:

$$\frac{\partial L(x_1, x_2, \lambda)}{\partial x_1} = 200 + \lambda \cdot (0.081^{x_1})' = 0$$

$$\frac{\partial L(x_1, x_2, \lambda)}{\partial x_2} = 200 + \lambda \cdot (0.081^{x_2})' = 0$$

$$\frac{\partial L(x_1, x_2, \lambda)}{\partial \lambda} = 0.081^{x_1} + 0.082^{x_2} - 0.017 = 0$$

$$L'(x_1) = 200 + (\lambda \cdot 0.08^{x_1})' = 0$$

$$L'(x_2) = 200 + (\lambda \cdot 0.082^{x_2})' = 0$$

$$L'(\lambda) = -0.082^{x_1} + 0.017 - 0.081^{x_2} + 0.018 = 0$$

$$L'(x_1) = 200 + (\lambda \cdot 0.081^{x_1})' = 0$$

$$\lambda \cdot (0.081^{x_1})' = -200$$

$$(0.081^{x_1})' = \frac{-200}{\lambda}$$

$$0.081^{x_1} \cdot \ln(0.081) = \frac{-200}{\lambda}$$

$$0.081^{x_1} = \frac{-79.5}{\lambda}$$

$$x_1 = \log_{0.08} 80 / \lambda$$

$$L'(x_2) = 200 + (\lambda \cdot 0.082^{x_2})' = 0$$

$$\lambda \cdot (0.082^{x_2})' = -200$$

$$(0.082^{x_2})' = \frac{-200}{\lambda}$$

$$0.082^{x_2} \cdot \ln(0.082) = \frac{-200}{\lambda}$$

$$0.082^{x_2} = \frac{-80}{\lambda}$$

$$x_2 = \log_{0.082} 80 / \lambda$$

$$-0.082^{x_1} + 0.017 - 0.081^{x_2} + 0.018 = 0$$

Подставляем x_1 и x_2 и находим λ :

$$-0.08^{\log_{0.08} \frac{80}{\lambda}} + 0.017 - 0.082^{\log_{0.082} \frac{80}{\lambda}} + 0.018 = 0;$$

$$-\frac{80}{\lambda} + 0.017 - \frac{80}{\lambda} + 0.018 = 0$$

$$-\frac{160}{\lambda} = -0.034$$

$$\lambda = \frac{160}{0.034} = 4705.$$

Подставляем и находим x_1 и x_2 :

$$x_1 = \log_{0.08} 80 / \lambda = \log_{0.08} 0.017 = 1.613 \approx 2$$

$$x_2 = \log_{0.082} 80 / \lambda = \log_{0.082} 0.017 = 1.629 \approx 2$$

В результате определено оптимальное количество резервных элементов, которые необходимо добавить в сеть.

При этом, как и было сказано ранее, в данном случае в качестве ограничений выступали уравнения, в реальности же в качестве ограничений выступают неравенства, соответственно, необходимо соблюдение теоремы Куна-Таккера. Теорема Куна-Таккера гласит, что для того, чтобы существовала переменная X_0 , которая бы являлась решением поставленной задачи, необходимо и достаточно, чтобы существовал неопределенный множитель $\lambda_0 \geq 0$ такой, что (X_0, λ_0) для всех $X \geq 0$ и $\lambda \geq 0$. Для случая поиска максимизации целевой функции должно выполняться следующее условие: $L(X, \lambda_0) \leq L(X_0, \lambda_0) \leq L(X_0, \lambda)$, в случае минимизации – условие: $L(X, \lambda_0) \geq L(X_0, \lambda_0) \geq L(X_0, \lambda)$. Для подтверждения выполнения данного условия необходимо найти седловую точку функции Лагранжа (рис. 3.3).

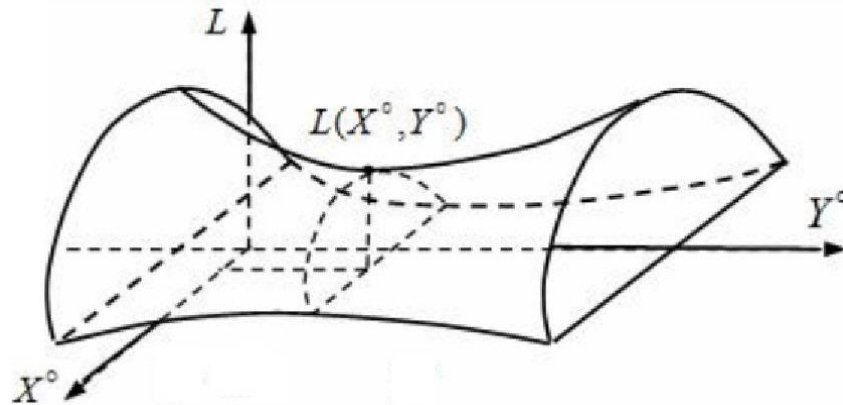


Рисунок 3.3 – Геометрическая интерпретация седловой точки функции Лагранжа

При этом должны выполняться условия оптимальности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(x, \lambda)}{\partial x_j} &\geq 0, \quad j = \overline{1, n}; \\ x_j &\geq 0, \quad j = \overline{1, n}; \\ x_j \frac{\partial L(x, \lambda)}{\partial x_j} &= 0, \quad j = \overline{1, n}; \\ \frac{\partial L(x, \lambda)}{\partial \lambda_i} &\leq 0, \quad i = \overline{1, m}; \\ \lambda_i &\geq 0, \quad i = \overline{1, m}; \\ \lambda_i \frac{\partial L(x, \lambda)}{\partial \lambda_i} &= 0, \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned}$$

Согласно результатам в [72; 172] для нашего случая седловая точка функции Лагранжа $(X_0; \lambda_0) \approx (1.63; 4700)$.

Самым простым способом выявления соблюдения условия Куна-Таккера можно назвать визуальный анализ функции неопределенных множителей Лагранжа и поиск на ней седловой точки, наличие данной точки говорит о соблюдении условия Куна-Таккера. Соответственно, задача сводится к выбору инструмента визуализации.

К возможным программным комплексам, способным визуализировать и осуществлять различные математические вычисления, можно отнести Matlab/Simulink, Matematica, Matchad и Maple.

В таблице 3.6 представлены результаты анализа всех изученных программных обеспечений, позволяющих автоматизированно производить расчеты количества резервных элементов с учетом их явных достоинств, незначительных достоинств и недостатков [66].

Таблица 3.6 – Анализ программных обеспечений

	Интерфейс	Документация	Возможности	Стоимость	Моделирование распределитель ной сети
MS Excel	+,-	+,-	-	-	-
Matlab/ Simulink	+	+	+	-	+
Maple	+	+	+	-	-
GNU Octave	-	-	+,-	+	-
Scilab/Xcos	+	+	+,-	+	+,-
Wolfram Mathematica	+	+,-	+	-	-
R	+,-	+	+	+	-
Jigrein	+,-	+	+,-	-	+,-
VisSim	+,-	+,-	+	-	+,-
LabView	+,-	+	+	-	+
UM	+	+	+	-	+

При этом оптимальным выбором можно назвать применение программы Maple в силу ее вычислительных возможностей в отличие от остальных программ. Для визуализации функции неопределенных множителей Лагранжа в среде Maple необходимо вначале написать код функции неопределенных множителей Лагранжа:

$$L(x_1, x_2, \lambda) = 200 \cdot x_1 + 200 \cdot x_2 + \lambda \cdot (0.081^{x_1} + 0.082^{x_2} - 0.017).$$

```
y := 'y'; plot3d(200*x+y*(0.82e-1^x+0.82e-1^x), x = -120 .. -100, y = -2 .. 2,
grid = [200, 200]),
```

В результате визуализации график будет иметь следующий вид:

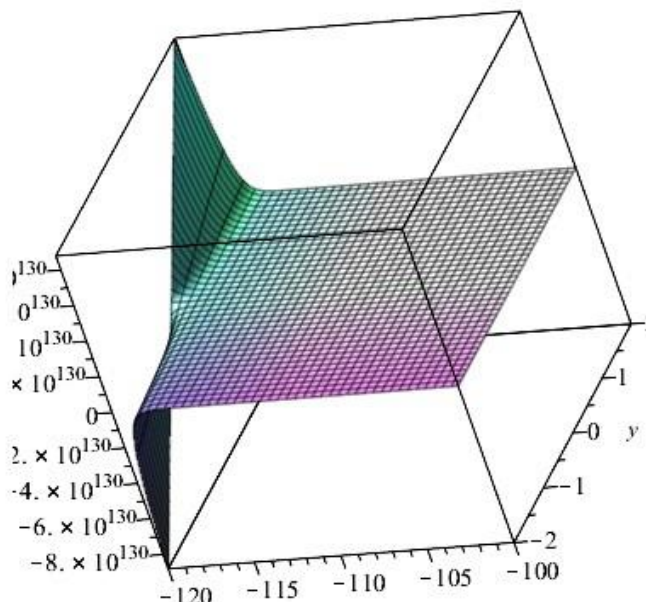


Рисунок 3.4 – График функции Лагранжа

На рисунке 3.4 представлен график функции Лагранжа, на котором видно, наличие у данной функции седловой точки, что свидетельствует в пользу выполнения условий Куна-Таккера и, следовательно, указывает на наличие решения поставленной задачи оптимизации, имеющей неравенства в ограничениях.

Результаты расчетов оптимального количества резервных элементов описаны в работах [154; 173; 172].

3.4 Выбор оптимальной структуры сети с соблюдением требуемого уровня надежности

3.4.1 Определение количества информации в структуре распределительной сети

Еще одна из возможностей применения методики оценки состояния и выбора структуры высоконадежной распределительной сети касалась построения замкнутой структуры сети. При решении задачи построения

оптимальной структуры распределительной сети на ранних этапах проектирования, как было описано ранее, нужно делать акцент не столько на минимизации затрат, сколько на структурной надежности. А при рассмотрении структурной надежности распределительной сети основополагающим моментом является теория надежности, которая для решения данной задачи предлагает искомое решение строить с использованием теории вероятностей и статистических данных, распределение которых подчиняется ряду законов распределения случайной величины. Несмотря на серьезную проработанность вопросов по обеспечению высокого уровня надежности систем, имеется, на наш взгляд, один недостаток: в задачах оптимизации показатель надежности должен быть выражен в количественной форме, как правило, в величине вероятностей возникающих событий. При анализе вероятностной природы появления совместных событий их количество резко возрастает при увеличении объема структуры. Следовательно, для сложных структур в определении величины вероятности появляются дополнительные трудности и при формализации задачи оптимизации. В работе [53] представлена сложность определения вероятности связи «источник – потребитель».

Далее предложим оптимизационную задачу поиска оптимальной структуры распределительной сети с учетом надежности, измеряемой через меру неопределенности информации. В обобщенном виде оптимизационная задача предполагает наличие целевой функции, решение которой направлено на получение наименьших затрат при выборе структуры, и системы ограничений, представленной в виде неравенств. Каждое неравенство в системе ограничений характеризует энтропию работоспособного состояния связи 0-1 (источника u_0 с потребителем l), которая сопоставляется с заданной граничной величиной энтропии $H(P_{0l})$ этой же связи:

$$\sum_{i=1} c_i x_i \rightarrow \min;$$

$$\left\{ \begin{array}{l} H(P_{01}) \leq H^0(P_{01}); \\ H(P_{02}) \leq H^0(P_{02}); \\ \dots \\ H(P_{0l}) \leq H^0(P_{0l}); \\ \dots \\ H(P_{0m}) \leq H^0(P_{0m}); \end{array} \right.$$

$$x_i = [0; 1],$$

где $H(P_{0l})$ – информационная энтропия работоспособного состояния связи 0- l , по которой протекает электроэнергия от источника к потребителю; $H^0(P_{0l})$ – заданная граничная величина энтропии как меры обеспечения бесперебойного снабжения энергией по связи 0- l потребителя l ; 0 – источник питания; l – номер потребителя электроэнергии.

Для построения математических выражений левых частей системы воспользуемся моделью Шеннона и методами минимальных путей и минимальных сечений, представленных в работе [46]. Для более наглядного восприятия предлагаемого к рассмотрению материала возьмем для примера «мостиковую схему» (часто используемую для пояснения работы методов минимальных путей и минимальных сечений определения вероятностей связей между источником и потребителями).

Пусть имеется один источник (вершина 0) и три запрашиваемых от него потребителей (на рисунке 3.5 – вершины 1, 2 и 3).

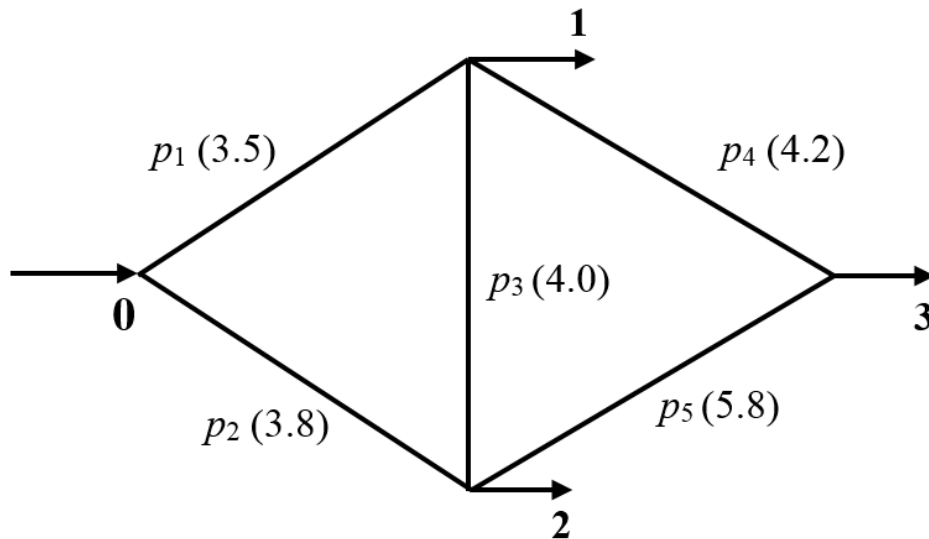


Рисунок 3.5 – Мостиковая схема

Каждой ветви графа приписываются вероятности работоспособного состояния элементов и затраты на строительство элемента.

Представим последовательность вычислений определения энтропии работоспособного состояния $H(P_{0l})$ связи «источник – потребитель». Построить модель и определить по ней величину $H(P_{0l})$ можно двумя способами: 1) через учет всех совместных состояний элементов, входящих в минимальные пути от источника к рассматриваемому потребителю; 2) с использованием метода минимальных путей и сечений.

В обоих способах следует выделить минимальные пути на графе от источника к каждому потребителю. Воспользуемся одним из матричных методов построения минимальных путей. Первоначально строят матрицу инцидентности. Исходная матрица инцидентности для рассматриваемой мостиковой схемы:

$$V = \begin{vmatrix} 1 & p_1 & p_2 & 0 \\ 0 & 1 & p_3 & p_4 \\ 0 & p_3 & 1 & p_5 \\ 0 & p_4 & p_5 & 1 \end{vmatrix}.$$

Возведение матрицы инцидентности V во вторую степень с учетом правил сложения и умножения вероятностей:

$$V^2 = \begin{vmatrix} 1 & p_1 + p_2 p_3 & p_2 + p_1 p_3 & p_1 p_4 + p_2 p_5 \\ 0 & 1 & p_3 + p_4 p_5 & p_4 + p_3 p_5 \\ 0 & p_3 + p_4 p_5 & 1 & p_5 + p_3 p_4 \\ 0 & p_4 + p_3 p_5 & p_5 + p_3 p_4 & 1 \end{vmatrix}.$$

Матрица инцидентности третьей степени:

$$V^3 = V^2 \cdot V = \begin{vmatrix} 1 & p_1 + p_2 p_3 + p_2 p_4 p_5 & p_2 + p_1 p_3 + p_1 p_4 p_5 & p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 \\ 0 & 1 & p_3 + p_4 p_5 & p_4 + p_3 p_5 \\ 0 & p_3 + p_4 p_5 & 1 & p_5 + p_3 p_4 \\ 0 & p_4 + p_3 p_5 & p_5 + p_3 p_4 & 1 \end{vmatrix}.$$

В матрице V^3 минимальным путям графа соответствуют вероятности связей: 0–1 – состоит из трех путей $\{1\}$, $\{23\}$ и $\{245\}$; 0–2 – состоит из путей $\{2\}$, $\{13\}$ и $\{145\}$; 0–3 – из $\{14\}$, $\{25\}$, $\{135\}$ и $\{234\}$. Соответственно вероятности связей P_{01} , P_{02} , P_{03} можно переписать в виде:

$$P_{01} = P(A_1') + P(A_2') + P(A_3') = p_1 + p_2 p_3 + p_2 p_4 p_5;$$

$$P_{02} = P(A_1'') + P(A_2'') + P(A_3'') = p_2 + p_1 p_3 + p_1 p_4 p_5;$$

$$P_{03} = P(A_1''') + P(A_2''') + P(A_3''') = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4.$$

Выражения для определения вероятностей минимальных путей не дают точного результата: сумма вероятностей путей превосходит 1, поэтому перейдем к вышеупомянутым способам расчета.

Первый способ. Воспользуемся моделью сложения и умножения вероятностей пересекающихся событий A для определения полной вероятности работоспособного состояния связи 0–1:

$$P_{01}^{(c)} = \sum_i P(A_i) - \sum_{i \leq f} P(A_i \cap A_f) + \sum_{i \leq f \leq h} P(A_i \cap A_f \cap A_h) - \dots + (-1)^{w-1} P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_w). \quad (3.39)$$

Тогда на основе этой модели, в которой применен принцип совмещения событий и исключения совпадающих вероятностей, перейдем к выражениям определения вероятности связей с учетом перебора всех состояний элементов:

$$P_{01}^{(c)} = p_1 + p_2 p_3 + p_2 p_4 p_5 - p_1 p_2 p_3 - p_1 p_2 p_4 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 p_5;$$

$$P_{02}^{(c)} = p_2 + p_1p_3 + p_1p_4p_5 - p_1p_2p_3 - p_1p_2p_4p_5 - p_1p_3p_4p_5 + p_1p_2p_3p_4p_5;$$

$$P_{03}^{(c)} = p_1p_4 + p_2p_5 + p_1p_3p_5 + p_2p_3p_4 - p_1p_2p_4p_5 - p_1p_3p_4p_5 - p_1p_2p_3p_4 - \\ - p_1p_2p_3p_5 - p_2p_3p_4p_5 - p_1p_2p_3p_4p_5 + p_1p_2p_3p_4p_5 + p_1p_2p_3p_4p_5 + \\ + p_1p_2p_3p_4p_5 + p_1p_2p_3p_4p_5 - p_1p_2p_3p_4p_5.$$

Рассмотрим порядок сложения и произведения событий для определения P_{03} , который имеет следующий вид:

$$A_1 + A_2 + A_3 + A_4 - A_1 \cap A_2 - A_1 \cap A_3 - A_1 \cap A_4 - A_2 \cap A_3 - A_2 \cap A_4 - A_3 \cap A_4 + A_1 \cap \\ A_2 \cap A_3 + A_1 \cap A_2 \cap A_4 + A_1 \cap A_3 \cap A_4 + A_2 \cap A_3 \cap A_4 - A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap A_4,$$

где $A_1 = p_1p_4$, $A_2 = p_2p_5$, $A_3 = p_1p_3p_5$, $A_4 = p_2p_3p_4$. Надстрочный символ c (в скобках) означает применение первого способа в определении энтропии работоспособного состояния связи «источник-потребитель».

Полученные выражения расчета $P_{0l}^{(c)}$ применимы для расчета информационной энтропии работоспособного состояния связи $H_{0l}^{(c)}$. Для расчета величины энтропии работоспособного состояния элемента i можно использовать формулу Клода Шеннона, имеющую следующий вид:

$$H(p_i) = -p_i \log_2 p_i. \quad (3.40)$$

Тогда энтропия работоспособного состояния связей структуры (рис. 3.5) будет определена по выражениям:

$$H_{01}^{(c)} = -p_1 \log_2 p_1 - p_2p_3 \log_2(p_2p_3) - p_2p_4p_5 \log_2(p_2p_4p_5) + \\ + p_1p_2p_3 \log_2(p_1p_2p_3) + p_1p_2p_4p_5 \log_2(p_1p_2p_4p_5) + p_2p_3p_4p_5 \log_2(p_2p_3p_4p_5) - \\ - p_1p_2p_3p_4p_5 \log_2(p_1p_2p_3p_4p_5);$$

$$H_{02}^{(c)} = -p_2 \log_2 p_2 - p_1p_3 \log_2(p_1p_3) - p_1p_4p_5 \log_2(p_1p_4p_5) + \\ + p_1p_2p_3 \log_2(p_1p_2p_3) + p_1p_2p_4p_5 \log_2(p_1p_2p_4p_5) + p_1p_3p_4p_5 \log_2(p_1p_3p_4p_5) - \\ - p_1p_2p_3p_4p_5 \log_2(p_1p_2p_3p_4p_5);$$

$$\begin{aligned}
H_{03}^{(c)} = & -p_1 p_4 \log_2(p_1 p_4) - p_2 p_5 \log_2(p_2 p_5) - p_1 p_3 p_5 \log_2(p_1 p_3 p_5) - \\
& - p_2 p_3 p_4 \log_2(p_2 p_3 p_4) + p_1 p_2 p_4 p_5 \log_2(p_1 p_2 p_4 p_5) + p_1 p_3 p_4 p_5 \log_2(p_1 p_3 p_4 p_5) + \\
& + p_1 p_2 p_3 p_4 \log_2(p_1 p_2 p_3 p_4) + p_1 p_2 p_3 p_5 \log_2(p_1 p_2 p_3 p_5) + \\
& + p_2 p_3 p_4 p_5 \log_2(p_2 p_3 p_4 p_5) + p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 \log_2(p_1 p_2 p_3 p_4 p_5) - \\
& - p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 \log_2(p_1 p_2 p_3 p_4 p_5) - p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 \log_2(p_1 p_2 p_3 p_4 p_5) - \\
& - p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 \log_2(p_1 p_2 p_3 p_4 p_5) - p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 \log_2(p_1 p_2 p_3 p_4 p_5) + \\
& + p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 \log_2(p_1 p_2 p_3 p_4 p_5).
\end{aligned}$$

Данные выражения формируют левые части ограничений (3.34). При определении $H_{0l}^{(c)}$ не исключен учет отдельных свойств, присущих энтропии Шеннона: 1) при $p=1$; 2) при $p=0$.

Первое свойство свидетельствует о том, что количество информации $\log_2 p = 0$. Это означает: элементы системы ни при каких условиях не меняют своего состояния, следовательно, не существует альтернативы выбора из рассматриваемых состояний. При принятии такого свойства мы полагаем: информация о состоянии системы нам доподлинно известна (энтропия отсутствует). Однако в реальных распределительных сетях не существует элементов с вероятностью безотказной работы, равной 1, следовательно, все принимаемые значения p отличны от 1.

Второе свойство дает нам $\log_2 p = \infty$, то есть огромное количество энтропии. Это означает следующее: при p , близком к 0, предполагаем появление события как чрезвычайно редкое явление и поэтому имеющее высокую величину неопределенности (информационной энтропии). Поскольку перед логарифмом имеется $p = 0$, которая означает следующее: мы полагаем, что элемент в системе отсутствует, следовательно, не может присутствовать смена событий, тогда энтропия отсутствующего элемента должна быть равна 0. Данное свойство можно использовать при поиске оптимального решения. Если на рассматриваемом пути хотя бы один элемент отсутствует (когда $p_i = 0$ и $H(p_i)=0$), энтропия пути также будет равна 0 (поскольку в этом случае путь отсутствует).

Далее для каждой из всех связей от источника до потребителя рассчитываются граничные величины информационной энтропии работоспособного состояния: $H^0(P_{0l})$. Данная величина рассчитывается с учетом требований по соблюдению надежности сети согласно допущению специалистами по проектированию возможного перерыва в электроснабжении потребителей. С учетом обоснований в работе [47] граничную величину информационной энтропии для связи 0–1 можно рассчитать по следующему выражению:

$$H^0(P_{0l}) = -p_l^0 \log_2 p_l^0, \quad (3.41)$$

где $p_l^0 = 1 - q_l^0$ – вероятность допустимого бесперебойного энергоснабжения потребителя l по связи 0–1; q_l^0 – вероятность допустимого перерыва в энергоснабжении потребителя l .

Решить задачу оптимизации (3.33)–(3.34) данным способом можно, как представлено в работе [48], методом ветвей и границ. При этом в силу того, что левые части ограничений в (3.34) обладают большим числом слагаемых, поскольку учитывают большое количество вариантов структур сети, это может привести к значительным временным затратам на поиск решения, особенно для слишком массивных сетей. Одним из подходов к устранению данного недостатка является построение ограничений (3.34) на основе минимальных путей.

Второй способ. При его реализации будем опираться на работы [42; 34; 54]. Применительно к примеру на рисунке 3.5 рассмотрим модель определения энтропии $H(P_{0l})$ связи 0–3, состоящей из путей: {13}; {24}; {154}; {253}. Данной связи соответствует схема из последовательно-параллельных минимальных путей (рис. 3.6).

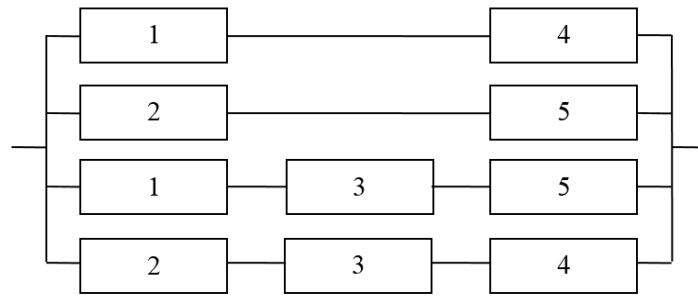


Рисунок 3.6 – Последовательно-параллельная схема минимальных путей связи 0–3

Представленные далее по второму способу математические выражения не обеспечат получения точного результата, поскольку при рассмотрении последовательно-параллельной структуры элементы дублируются. Так, на рисунке 3.6, каждый элемент исходной схемы на рис. 3.5 дублируется дважды. Это означает то, что в последовательно-параллельной структуре количество информации или (в нашем случае) энтропии увеличивается (дважды согласно рисунку 3.6). Чтобы привести в соответствие последовательно-параллельную структуру с исходной, следует уменьшить энтропии элементов, используя выражения:

- для энтропии работоспособного состояния элемента i пути:

$$H(p_{i/s}) = H(p_i) / s_i; \quad (3.42)$$

- для энтропии неработоспособного состояния элемента i пути:

$$H(q_{i/s}) = H(q_i) / s_i, \quad (3.43)$$

где $H(p_i)$ и $H(q_i) = -q_i \log_2 q_i$ – энтропии работоспособного и неработоспособного состояний элемента i заданной структуры; s_i – количество повторений элемента i в последовательно-параллельной структуре; $q_i = 1 - p_i$ – вероятность неработоспособного состояния элемента i системы. Чтобы не загромождать математические формулы дополнительными обозначениями, опустим символ s .

Нами рассматривается закрытая система, свидетельствующая о следующем свойстве: энтропия любого разнообразия состояний системы равна суммарной энтропии независимо функционирующих друг от друга

элементов. Согласно данному свойству предложим к рассмотрению несколько математических выражений, определяющих область использования меры неопределенности информации.

Суммарная величина энтропии минимального пути j для независимо функционирующих элементов может быть определена по выражению:

$$H_j = \sum_{i=1}^{n_j} (p_i \log_2 p_i + q_i \log_2 q_i) = \sum_{i=1}^{n_j} [H(p_i) + H(q_i)]. \quad (3.44)$$

Рассматривая взаимосвязь элементов (применительно к поставленной задаче оптимизации), необходимо отдельно выделить энтропию работоспособного $H(P_j)$ и неработоспособного $H(Q_j)$ состояний пути:

$$H_j = H(P_j) + H(Q_j). \quad (3.45)$$

Для каждого минимального пути j (принадлежащего связи 0-1) величина энтропии работоспособного состояния определится по выражению:

$$H(P_j) = \sum_{i=1}^{n_j} \left[\left(\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n_j} p_k \right) H(p_i) \right] = H_j - H(Q_j). \quad (3.46)$$

Соответственно, величина энтропии неработоспособного состояния:

$$H(Q_j) = \sum_{i=1}^{n_j} \left[H(q_i) + \left(1 - \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n_j} p_k \right) H(p_i) \right] = H_j - H(P_j). \quad (3.47)$$

В выражениях (3.46) и (3.47): p_k – вероятность работоспособного состояния элемента k , принадлежащего пути j ; n_j – количество элементов i (с

вероятностями p_i), входящих в путь; $P_j = \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n_j} p_k$ – вероятность

работоспособного состояния пути j ; $Q_j = 1 - \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n_j} p_k = 1 - P_j$ – то же

неработоспособного состояния.

В качестве примера, применив (3.46) для выделенных минимальных путей (рис. 3.6), определим количество энтропии $H(P_j)$ работоспособного состояния элементов каждого из N путей по выражениям:

- для пути $\{14\}$: $H(P_{14}) = p_4 H(p_1) + p_1 H(p_4)$;
- для пути $\{25\}$: $H(P_{25}) = p_5 H(p_2) + p_2 H(p_5)$;
- для $\{135\}$: $H(P_{135}) = p_3 p_5 H(p_1) + p_1 p_5 H(p_3) + p_1 p_3 H(p_5)$;
- для $\{234\}$: $H(P_{234}) = p_3 p_4 H(p_2) + p_2 p_4 H(p_3) + p_2 p_3 H(p_4)$.

Поиск решения осуществляется согласно следующей разработанной вычислительной процедуре:

1. Строится замкнутый граф. Методом минимальных путей и сечений, согласно выделенной связи «источник–потребитель» 0-1, состоящей из множества путей и сечений, он преобразуется в последовательно-параллельный вид для путей и параллельно-последовательный – для сечений.

2. Вычисляются вероятности состояний элементов (ветвей) и информационная энтропия каждой ветви: $H(p_i) = -p_i \log_2 p_i$; $H(q_i) = -q_i \log_2 q_i$, где q_i и p_i – вероятность неработоспособного и работоспособного состояний элемента i сети.

3. Определяется количество энтропии $H(P_j)$ работоспособного и неработоспособного $H(Q_j)$ состояний каждого из N путей связи 0-1 преобразованного графа.

4. Величина энтропии работоспособного состояния $H(P_{0l})$ последовательно-параллельного графа связи 0-1 определяется по формуле, полученной путем эквивалентирования всех параллельных путей в один путь:

$$H(P_{0l}) = \sum_{j=1}^N [H(P_j) + (1 - \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^N Q_k) H(Q_j)] = H_{0l} - H(Q_{0l}), \quad (3.48)$$

где N – количество путей последовательно-параллельного графа, составляющих связь 0-1, H_{0l} – суммарная величина энтропии связи. В данной

формуле Q_k наделен индексом k , который по своему исходному содержанию соответствует индексу j при определении вероятности Q_j .

В случае использования параллельно-последовательного графа процедура определения энтропии неработоспособного состояния связи 0- l так же, как и в предыдущем случае, предполагает выполнение процесса эквивалентирования. Таким образом, величина энтропии неработоспособного состояния связи 0- l будет вычисляться по формуле:

$$H(Q_{0l}) = \sum_{j=1}^N [(\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^N Q_k) H(Q_j)] = H_{0l} - H(P_{0l}). \quad (3.49)$$

Решая задачу (3.33)-(3.34), удобнее использовать выражение (3.49) из-за его простоты, нежели (3.48). Тогда ограничения (3.34) (на примере одного из m ограничений) можно записать в виде:

$$\begin{cases} \dots \\ H(Q_{0l}) \leq H^0(Q_{0l}); \\ \dots \end{cases} \quad (3.50)$$

где q_l^0 – вероятность допустимого перерыва энергоснабжения потребителя l ;

$H^0(Q_{0l}) = -q_l^0 \log_2 q_l^0$ – граничная величина информационной энтропии неработоспособного состояния связи 0- l .

Выражения (3.48) и (3.49) не содержат искомый показатель x_i , поскольку в рассматриваемой задаче он может принимать значения: 1 – элемент присутствует в структуре; 0 – отсутствует. Такого рода задачи (не исключая при этом определения числа резервных элементов) позволяют осуществлять построение оптимальных замкнутых структур и выбирать альтернативы, отвечающие требованиям соблюдения уровня обеспечения надежности.

Решение задачи (3.33)–(3.34) или (3.33), (3.50) и (3.35) возможно, например, с помощью метода ветвей и границ.

3.4.2 Программная реализация задачи выбора оптимальной структуры распределительной сети

Для автоматизации работы разработанной процедуры на языке высокого уровня C++ было принято решение разработать программное обеспечение, позволяющее проводить моделирование работы сети. C++ был выбран в силу того, что это чрезвычайно мощный язык, содержащий средства создания эффективных программ практически любого назначения, от низкоуровневых утилит и драйверов до сложных программных комплексов самого различного назначения. Основные его достоинства: эффективность, переносимость, мощность, гибкость и удобность. В статьях [75; 86] продемонстрированы основные преимущества данного языка, а в статье [61] его применимость для автоматизации построения структур распределительных сетей. Согласно рейтингу языков программирования The RedMonk Programming Language Rankings [90] данный язык является одним из наиболее востребованных и обсуждаемых.

На языке высокого уровня C++ был разработан оконный интерфейс данной программы (рис. 3.7).

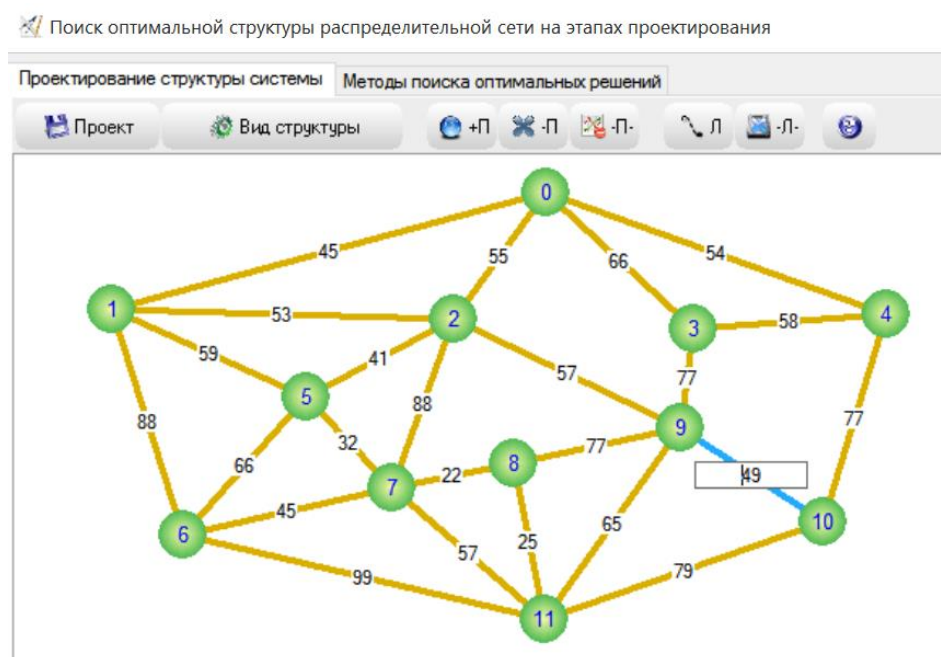


Рисунок 3.7 – Оконный интерфейс разработанного программного обеспечения

Принцип работы с данной программой заключается в построении графа, который отражает структуру проектируемой системы и при этом содержит все возможные ребра, при этом можно указать стоимость (а в перспективе и вероятность работоспособного состояния) каждого из них. Далее необходимо нажать на кнопку "прочие методы" и выбрать подходящий метод для поиска пути. В результате программа автоматически проведет процесс поиска оптимальной с точки зрения экономичности структуры сети и покажет ее на экране (рис. 3.8). Помимо этого, программа может выполнять и прочие функции с графом, в частности искать минимальные пути, проводить поиск в глубину и многое другое.

Более подробно разработка данного программного обеспечения описана в работах [82; 87]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610366 от 13.01.2020 [78].

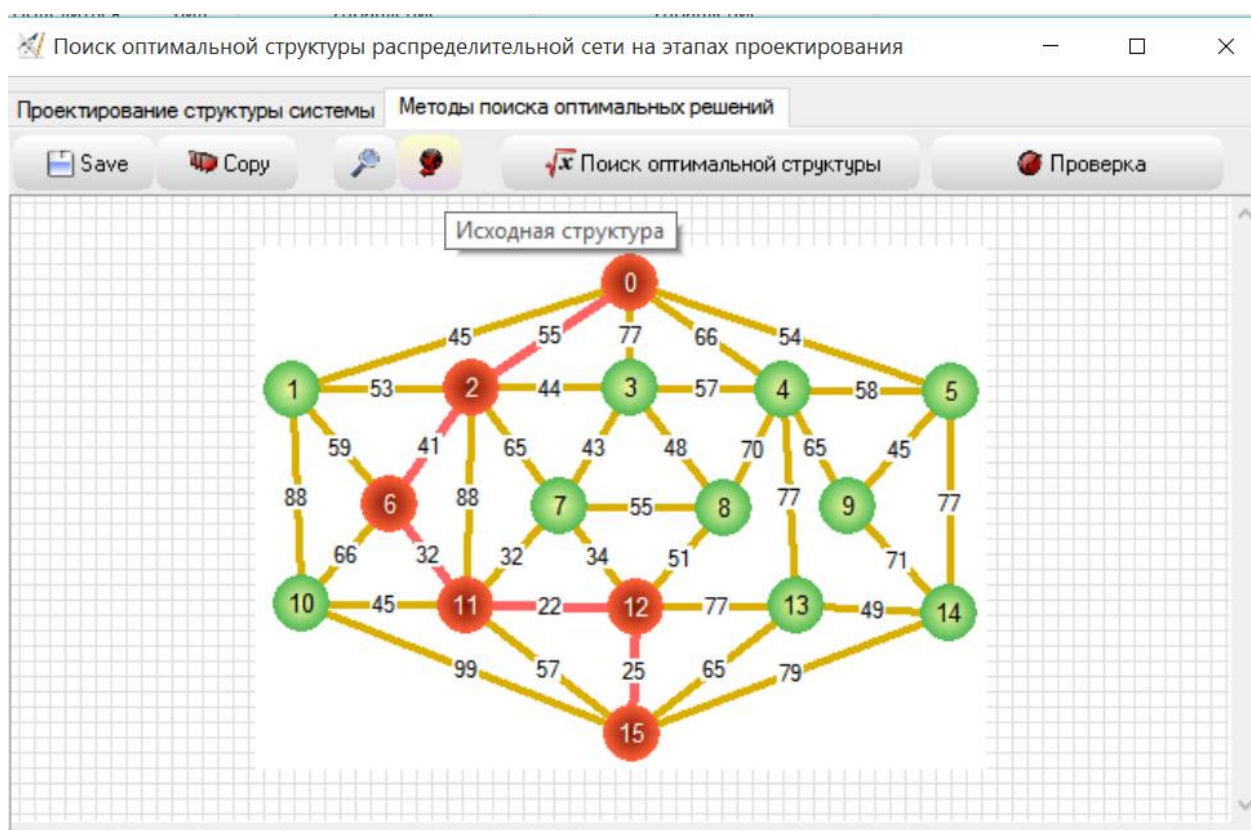


Рисунок 3.8 – Пример поиска оптимальной структуры сети

При этом разработанная программа позволяет путем применения различного рода поиска минимальных путей осуществлять поиск самых дешевых структур распределительных сетей.

В перспективе данное программное обеспечение можно доработать и, добавив учет ограничений, характеризующих структурную надежность, выраженную через меру неопределенности информации, автоматизировать разработанную процедуру, позволяющую решать заданную оптимизационную задачу.

3.4.3 Апробация разработанной процедуры

Пусть дана схема электрической сети с источником питания (0) и 4 потребителями (0–1, 0–2, 0–3 и 0–4), представленная на рисунке 3.9. Требуется найти оптимальную структуру из всех возможных вариантов.

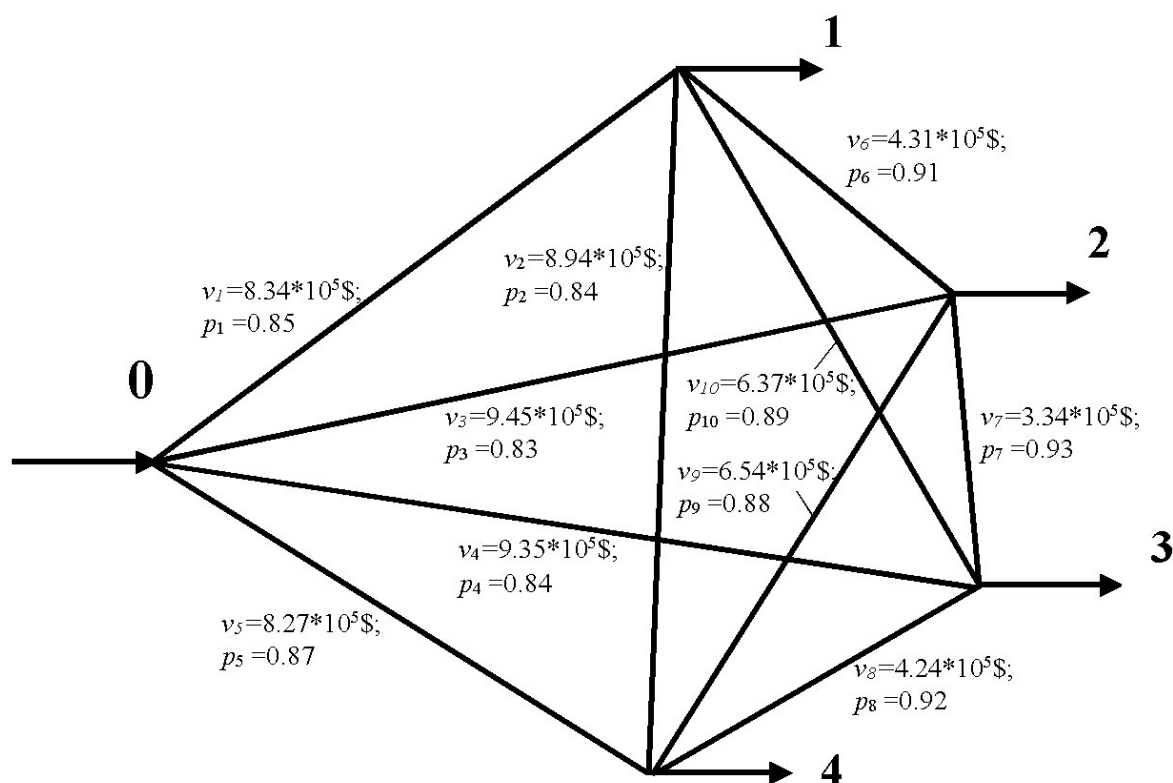


Рисунок 3.9 – Схема распределительной сети с 4 потребителями

В данном случае задача выглядит следующим образом:

$$\sum_{i=1} v_i x_i \rightarrow \min; \begin{cases} H(P_{01}) \geq H^0(P_{01}); \\ H(P_{02}) \geq H^0(P_{02}); \\ H(P_{03}) \geq H^0(P_{03}); \\ H(P_{04}) \geq H^0(P_{04}); \end{cases}$$

Минимальные пути для всех связей (рис. 3.10) в данной схеме следующие:

Для связи 0–1: {1}; {25}; {36}; {4 10}; {569}; {476}; {392}; {5876};

0–2: {3}; {16}; {47}; {59}; {1 10 7}; {129}; {587}; {1287};

0–3: {4}; {58}; {1 10}; {37}; {167}; {398}; {128}; {1698};

0–4: {5}; {12}; {48}; {39}; {169}; {378}; {4 10 2}; {1678};

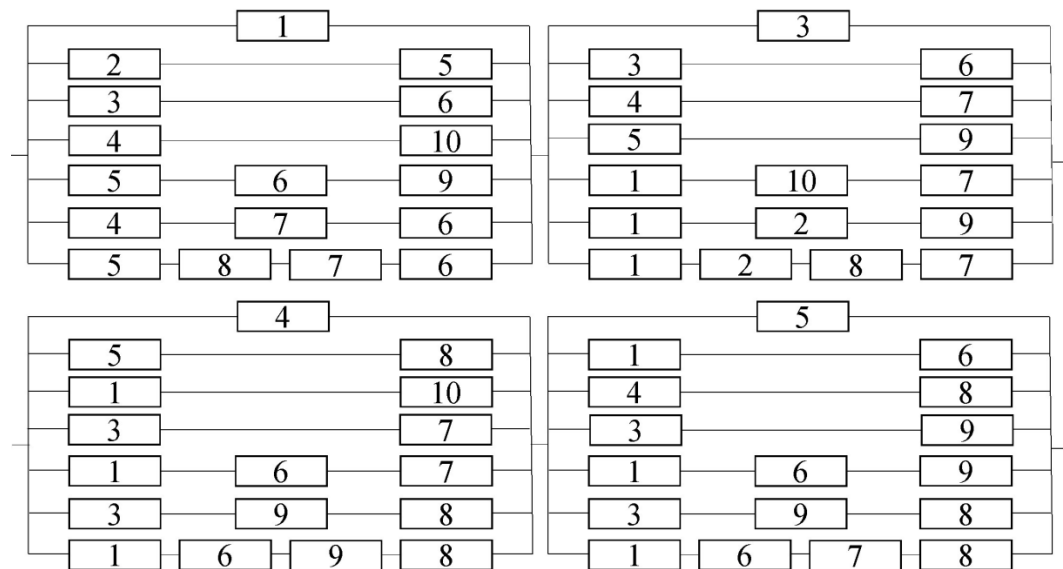


Рисунок 3.10 – Схема из последовательно-параллельных минимальных путей и с 4 потребителями

Ребра 1 и 5 в оптимальной структуре, судя по изначальной схеме, точно будут в силу необходимости в обеспечении требуемого уровня надежности потребителей 1 и 4. Поэтому количество всех вариаций структур: $2^8 = 256$, так как у нас 8 ребер (линий) и каждое из них может иметь два состояния : либо оно есть, либо его нет. Используя метод полного перебора, можно среди этих структур найти наиболее дешевую и при этом соответствующую требуемому уровню надежности, однако это не практично с точки зрения потраченного времени и более правильным будет применение в данном случае метода

ветвей и границ. С помощью отсечения подмножеств, не соответствующих ограничениям по надежности, существенно ускорится поиск оптимальной структуры, при этом среди тех структур, которые выполняют условия по требуемой надежности всех четырех потребителей, будет выбрана самая дешевая структура.

Примем граничные величины среднегодовой продолжительности неработоспособного состояния: для электроприемника 1 – $M_{q1} = 80$ часов; 2 – $M_{q2} = 200$ часов, 3 – $M_{q3} = 140$ часов, 4 – $M_{q4} = 180$ часов. Также для работоспособного состояния: $M_{p1} = T - M_{q1} = 8760 - 80 = 8680$ часов; $M_{p2} = 8560$ часов; $M_{p3} = 8620$ часов; $M_{p4} = 8580$ часов;

Далее определим вероятности бесперебойного электроснабжения и допустимого отказа в электроснабжении:

- для электроприемника 1: $p_1^0 = M_{p1} / T = 8680 / 8760 = 0.9909$; $q_1^0 = M_{q1} / T = 0.009$;

- для 2: $p_2^0 = M_{p2} / T = 0.9771$; $q_2^0 = M_{q2} / T = 0.0228$;

- для 3: $p_3^0 = M_{p3} / T = 0.984$; $q_3^0 = M_{q3} / T = 0.016$;

- для 4: $p_4^0 = M_{p4} / T = 0.9794$; $q_4^0 = M_{q4} / T = 0.02$;

Граничная величина энтропии связей 0–1 – 0–4:

$$H^0(P_{01}) = -p_1^0 \log_2 p_1^0 = -0.9909 \cdot \log_2 0.9909 = 0.013 \text{ бит} ;$$

$$H^0(P_{02}) = -p_2^0 \log_2 p_2^0 = -0.9771 \cdot \log_2 0.9771 = 0.0326 \text{ бит} ;$$

$$H^0(P_{03}) = -p_3^0 \log_2 p_3^0 = -0.984 \cdot \log_2 0.984 = 0.0228 \text{ бит} ;$$

$$H^0(P_{04}) = -p_4^0 \log_2 p_4^0 = -0.9771 \cdot \log_2 0.9771 = 0.0294 \text{ бит} .$$

$$\begin{cases} H(P_{01}) \geq 0.13; \\ H(P_{02}) \geq 0.32; \\ H(P_{03}) \geq 0.228; \\ H(P_{04}) \geq 0.294; \end{cases}$$

Рассчитаем, для примера, надежности, выраженные через меру неопределенности информации, для схемы со всеми ребрами:

Для связи 0–1:

$$\begin{aligned}
 H(P_{01})_{\Sigma} &= H(p_1) + p_5 H(p_2) + p_2 H(p_5) + p_6 H(p_3) + p_3 H(p_6) + p_{10} H(p_4) + p_4 H(p_{10}) + \\
 &+ p_6 p_9 H(p_5) + p_5 p_9 H(p_6) + p_5 p_6 H(p_9) + p_7 p_6 H(p_4) + p_4 p_6 H(p_7) + p_4 p_7 H(p_6) + \\
 &+ p_9 p_2 H(p_3) + p_3 p_2 H(p_9) + p_3 p_9 H(p_2) + p_8 p_7 p_6 H(p_5) + p_5 p_7 p_6 H(p_8) + p_5 p_8 p_6 H(p_7) \\
 &+ p_5 p_8 p_7 H(p_6) = -p_1 \cdot \log_2 p_1 - p_5 \cdot \log_2 p_2 - p_2 \cdot \log_2 p_5 - p_6 \cdot \log_2 p_3 - \\
 &- p_3 \cdot \log_2 p_6 - p_{10} \cdot \log_2 p_4 - p_4 \cdot \log_2 p_{10} - p_6 p_9 \cdot \log_2 p_5 - p_5 p_9 \cdot \log_2 p_6 - \\
 &- p_5 p_6 \cdot \log_2 p_9 - p_7 p_6 \cdot \log_2 p_4 - p_4 p_6 \cdot \log_2 p_7 - p_4 p_7 \cdot \log_2 p_6 - \\
 &- p_9 p_2 \cdot \log_2 p_3 - p_3 p_2 \cdot \log_2 p_9 - p_3 p_9 \cdot \log_2 p_2 - p_8 p_7 p_6 \cdot \log_2 p_5 - \\
 &- p_5 p_7 p_6 \cdot \log_2 p_8 - p_5 p_8 p_6 \cdot \log_2 p_7 - p_5 p_8 p_7 \cdot \log_2 p_6 = \\
 &= -0.85 \cdot \log_2 0.85 - 0.87 \cdot \log_2 0.84 - 0.84 \cdot \log_2 0.87 - 0.91 \cdot \log_2 0.83 - 0.83 \cdot \log_2 0.91 - \\
 &- 0.89 \cdot \log_2 0.84 - 0.84 \cdot \log_2 0.89 - 0.91 \cdot 0.88 \cdot \log_2 0.87 - 0.87 \cdot 0.88 \cdot \log_2 0.91 - \\
 &- 0.87 \cdot 0.91 \cdot \log_2 0.88 - 0.93 \cdot 0.91 \cdot \log_2 0.84 - 0.84 \cdot 0.91 \cdot \log_2 0.93 - \\
 &- 0.84 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.91 - 0.88 \cdot 0.84 \cdot \log_2 0.83 - 0.83 \cdot 0.84 \cdot \log_2 0.88 - \\
 &- 0.83 \cdot 0.88 \cdot \log_2 0.84 - 0.92 \cdot 0.93 \cdot 0.91 \cdot \log_2 0.87 - 0.87 \cdot 0.93 \cdot 0.91 \cdot \log_2 0.92 - \\
 &- 0.87 \cdot 0.92 \cdot 0.91 \cdot \log_2 0.93 - 0.87 \cdot 0.92 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.91 = 2.373 \text{ бит.}
 \end{aligned}$$

$$H(P_{01}) = \frac{H(P_{01})_{\Sigma}}{s_2} = \frac{2.373}{17/10} = 1.395 \text{ бит.}$$

Для связи 0–2:

$$\begin{aligned}
 H(P_{02})_{\Sigma} &= -p_3 \cdot \log_2 p_3 - p_6 \cdot \log_2 p_1 - p_1 \cdot \log_2 p_6 - p_7 \cdot \log_2 p_4 - p_4 \cdot \log_2 p_7 - \\
 &- p_9 \cdot \log_2 p_5 - p_5 \cdot \log_2 p_9 - p_{10} p_7 \cdot \log_2 p_1 - p_1 p_7 \cdot \log_2 p_{10} - p_1 p_{10} \cdot \log_2 p_7 - \\
 &- p_2 p_9 \cdot \log_2 p_1 - p_1 p_9 \cdot \log_2 p_2 - p_1 p_2 \cdot \log_2 p_9 - p_8 p_7 \cdot \log_2 p_5 - \\
 &- p_5 p_7 \cdot \log_2 p_8 - p_5 p_8 \cdot \log_2 p_7 - p_2 p_7 p_8 \cdot \log_2 p_1 - \\
 &- p_1 p_7 p_8 \cdot \log_2 p_2 - p_1 p_2 p_8 \cdot \log_2 p_7 - p_1 p_2 p_7 \cdot \log_2 p_8 = -0.83 \cdot \log_2 0.83 - \\
 &- 0.91 \cdot \log_2 0.83 - 0.83 \cdot \log_2 0.91 - 0.93 \cdot \log_2 0.84 - 0.84 \cdot \log_2 0.93 - \\
 &- 0.88 \cdot \log_2 0.87 - 0.87 \cdot \log_2 0.88 - 0.89 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.85 - 0.85 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.89 - \\
 &- 0.85 \cdot 0.89 \cdot \log_2 0.93 - 0.84 \cdot 0.88 \cdot \log_2 0.85 - 0.85 \cdot 0.88 \cdot \log_2 0.84 - \\
 &- 0.85 \cdot 0.84 \cdot \log_2 0.88 - 0.92 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.87 - 0.87 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.92 - \\
 &- 0.87 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.93 - 0.84 \cdot 0.93 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.85 - 0.85 \cdot 0.93 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.84 - \\
 &- 0.85 \cdot 0.84 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.93 - 0.85 \cdot 0.84 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.92 = 2.639 \text{ бит.}
 \end{aligned}$$

$$H(P_{02}) = \frac{H(P_{02})_{\Sigma}}{s_2} = \frac{2.639}{17/10} = 1.552 \text{ бит.}$$

Для связи 0–3:

$$\begin{aligned}
H(P_{03})_{\Sigma} = & -p_4 \cdot \log_2 p_4 - p_8 \cdot \log_2 p_5 - p_5 \cdot \log_2 p_8 - p_{10} \cdot \log_2 p_1 - p_1 \cdot \log_2 p_{10} - \\
& - p_7 \cdot \log_2 p_3 - p_3 \cdot \log_2 p_7 - p_6 p_7 \cdot \log_2 p_1 - p_1 p_7 \cdot \log_2 p_6 - p_1 p_6 \cdot \log_2 p_7 - \\
& - p_9 p_8 \cdot \log_2 p_3 - p_3 p_8 \cdot \log_2 p_9 - p_3 p_9 \cdot \log_2 p_8 - p_2 p_8 \cdot \log_2 p_1 - \\
& - p_1 p_8 \cdot \log_2 p_2 - p_1 p_2 \cdot \log_2 p_8 - p_6 p_9 p_8 \cdot \log_2 p_1 - \\
& - p_1 p_9 p_8 \cdot \log_2 p_6 - p_1 p_6 p_8 \cdot \log_2 p_9 - p_1 p_6 p_9 \cdot \log_2 p_8 = -0.84 \cdot \log_2 0.84 - \\
& - 0.92 \cdot \log_2 0.87 - 0.87 \cdot \log_2 0.92 - 0.89 \cdot \log_2 0.85 - 0.85 \cdot \log_2 0.89 - 0.93 \cdot \log_2 0.83 - \\
& - 0.83 \cdot \log_2 0.93 - 0.91 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.85 - 0.85 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.91 - 0.85 \cdot 0.91 \cdot \log_2 0.93 - \\
& - 0.88 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.83 - 0.83 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.88 - 0.83 \cdot 0.88 \cdot \log_2 0.92 - \\
& - 0.84 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.85 - 0.85 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.84 - 0.85 \cdot 0.84 \cdot \log_2 0.92 - \\
& - 0.91 \cdot 0.88 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.85 - 0.85 \cdot 0.88 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.91 - 0.85 \cdot 0.91 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.88 - \\
& - 0.85 \cdot 0.91 \cdot 0.88 \cdot \log_2 0.92 = 2.502 \text{ бит.}
\end{aligned}$$

$$H(P_{03}) = \frac{H(P_{03})_{\Sigma}}{s_3} = \frac{2.502}{17/10} = 1.472 \text{ бит.}$$

Для связи 0–4:

$$\begin{aligned}
H(P_{04})_{\Sigma} = & -p_5 \cdot \log_2 p_5 - p_2 \cdot \log_2 p_1 - p_1 \cdot \log_2 p_2 - p_8 \cdot \log_2 p_4 - p_4 \cdot \log_2 p_8 - \\
& - p_9 \cdot \log_2 p_3 - p_3 \cdot \log_2 p_9 - p_6 p_9 \cdot \log_2 p_1 - p_1 p_9 \cdot \log_2 p_6 - p_1 p_6 \cdot \log_2 p_9 - \\
& - p_7 p_8 \cdot \log_2 p_3 - p_3 p_8 \cdot \log_2 p_7 - p_3 p_7 \cdot \log_2 p_8 - p_{10} p_2 \cdot \log_2 p_4 - \\
& - p_4 p_2 \cdot \log_2 p_{10} - p_4 p_{10} \cdot \log_2 p_2 - p_6 p_7 p_8 \cdot \log_2 p_1 - \\
& - p_1 p_7 p_8 \cdot \log_2 p_6 - p_1 p_6 p_8 \cdot \log_2 p_7 - p_1 p_6 p_7 \cdot \log_2 p_8 = -0.87 \cdot \log_2 0.87 - \\
& - 0.91 \cdot \log_2 0.85 - 0.85 \cdot \log_2 0.91 - 0.92 \cdot \log_2 0.84 - 0.84 \cdot \log_2 0.92 - \\
& - 0.88 \cdot \log_2 0.83 - 0.83 \cdot \log_2 0.88 - 0.91 \cdot 0.88 \cdot \log_2 0.85 - \\
& - 0.85 \cdot 0.88 \cdot \log_2 0.91 - 0.85 \cdot 0.91 \cdot \log_2 0.88 - 0.93 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.83 - \\
& - 0.83 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.93 - 0.83 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.92 - 0.91 \cdot 0.93 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.85 - \\
& - 0.89 \cdot 0.84 \cdot \log_2 0.84 - 0.84 \cdot 0.84 \cdot \log_2 0.89 - 0.84 \cdot 0.89 \cdot \log_2 0.84 - \\
& - 0.85 \cdot 0.93 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.91 - 0.85 \cdot 0.91 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.93 - \\
& - 0.85 \cdot 0.91 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.92 = 2.503 \text{ бит.}
\end{aligned}$$

$$H(P_{04}) = \frac{H(P_{04})_{\Sigma}}{s_4} = \frac{2.503}{17/10} = 1.472 \text{ бит.}$$

$$\begin{cases} 1.395 \gg 0.13; \\ 1.552 \gg 0.32; \\ 1.472 \gg 0.228; \\ 1.473 \gg 0.294; \end{cases}$$

Хотя по надежности данная схема самая надежная, но она при этом и самая дорогая, так как включает в свою стоимость все ребра:

$$V = \sum_{i=1}^N v_i = (8.34 + 8.94 + 9.45 + 9.35 + 8.27 + 4.31 + 3.34 + 4.24 + 6.54 + 6.37) \cdot 10^5 = 59700000\$.$$

Проводя аналогичные расчеты для всех структур, можно в итоге отобрать самую дешевую и при этом надежную, в данном случае после применения метода ветвей и границ, такой структурой оказалась структура на рисунке 3.9.

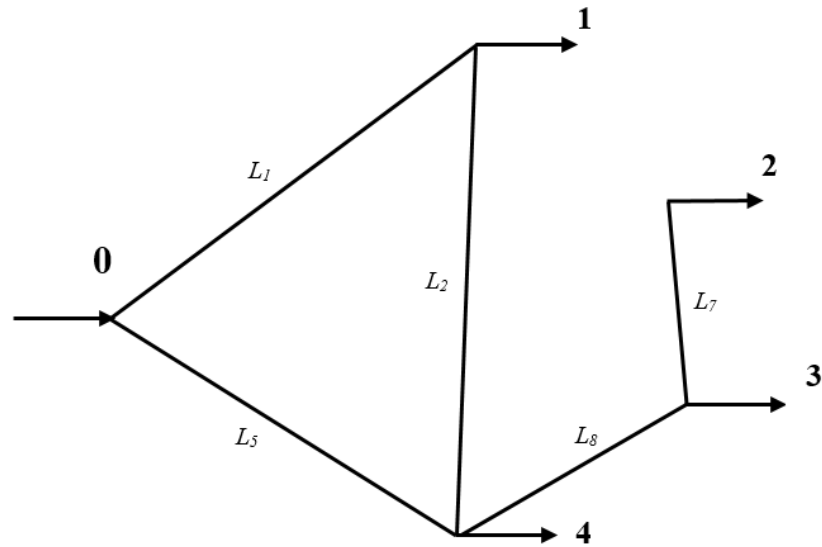


Рисунок 3.11 – Оптимальная структура распределительной сети

Для 0–1:

$$H(P_{01}) = -p_1 \cdot \log_2 p_1 - p_2 \cdot \log_2 p_5 - p_5 \cdot \log_2 p_2 = -0.85 \cdot \log_2 0.85 - 0.87 \cdot \log_2 0.84 - 0.84 \cdot \log_2 0.87 = 0.586 \text{ бит.}$$

Для 0–2:

$$\begin{aligned} H(P_{02})_{\Sigma} &= -p_8 p_7 \cdot \log_2 p_5 - p_5 p_7 \cdot \log_2 p_8 - p_5 p_8 \cdot \log_2 p_7 - p_2 p_7 p_8 \cdot \log_2 p_1 - \\ &- p_1 p_7 p_8 \cdot \log_2 p_2 - p_1 p_2 p_8 \cdot \log_2 p_7 - p_1 p_2 p_7 \cdot \log_2 p_8 = \\ &- 0.92 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.87 - 0.87 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.92 - 0.87 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.93 - \\ &- 0.84 \cdot 0.93 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.85 - 0.85 \cdot 0.93 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.84 - \\ &- 0.85 \cdot 0.84 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.93 - 0.85 \cdot 0.84 \cdot 0.93 \cdot \log_2 0.92 = 0.853 \text{ бит.} \end{aligned}$$

$$H(P_{02}) = \frac{H(P_{02})_{\Sigma}}{s_2} = \frac{0.853}{7/5} = 0.609 \text{ бит.}$$

Для 0–3:

$$\begin{aligned}
H(P_{03}) = & -p_8 \cdot \log_2 p_5 - p_5 \cdot \log_2 p_8 - p_2 p_8 \cdot \log_2 p_1 - p_1 p_8 \cdot \log_2 p_2 - \\
& - p_1 p_2 \cdot \log_2 p_8 = -0.92 \cdot \log_2 0.87 - 0.87 \cdot \log_2 0.92 - 0.84 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.85 - \\
& - 0.85 \cdot 0.92 \cdot \log_2 0.84 - 0.85 \cdot 0.84 \cdot \log_2 0.92 = 0.753 \text{ бит.}
\end{aligned}$$

Для 0–4:

$$\begin{aligned}
H(P_{04}) = & -p_5 \cdot \log_2 p_5 - p_2 \cdot \log_2 p_1 - p_1 \cdot \log_2 p_2 = -0.87 \cdot \log_2 0.87 - \\
& - 0.84 \cdot \log_2 0.85 - 0.85 \cdot \log_2 0.84 = 0.585 \text{ бит.}
\end{aligned}$$

$$\begin{cases} 0.586 \geq 0.13; \\ 0.609 \geq 0.32; \\ 0.753 \geq 0.228; \\ 0.585 \geq 0.294; \end{cases}$$

$$V_{opt} = \sum_{i=1}^N v_i = (8.34 + 8.94 + 8.27 + 3.34 + 4.24) \cdot 10^5 = 3313000\$.$$

В итоге экономия составляет:

$$\Delta V = V - V_{opt} = 5970000 - 3313000 = 2657000 \$.$$

Как видно из расчетов, применение разработанной процедуры позволяет существенно сэкономить денежные ресурсы и при этом построить оптимальную структуру распределительной сети.

Проводя сравнительный анализ расчетов структурной надежности, рассчитанной классическим методом и разработанным, было выявлено, что разработанная процедура количественного расчета структурной надежности, благодаря формализации формулы расчета, позволяет повысить в целом качество расчета уровня надежности и облегчить поиск оптимальной структуры распределительной сети без потери информации о состоянии структуры системы.

Таблица 3.7 – Сравнительный анализ полной структуры и построенной с учетом оптимизации

Показатель эффективности	Полная структура	С учетом оптимизации	Экономия, преимущества
Экономичность	$C = \sum_{i=1}^N c_i = (8.34 + 8.94 + 9.45 + 9.35 + 8.27 + 4.31 + 3.34 + 4.24 + 6.54 + 6.37) \cdot 10^5 = 5\,970\,000\$$	$C_{opt} = \sum_{i=1}^N c_i = (8.34 + 8.94 + 8.27 + 3.34 + 4.24) \cdot 10^5 = 3\,313\,000\$$	$\Delta C = C - C_{opt} = 5\,970\,000 - 3\,313\,000 = 2\,657\,000 \$$ $\downarrow 44\%$
Структурная надежность	$\begin{cases} 2.373 \gg 0.13; \\ 1.552 \gg 0.32; \\ 1.472 \gg 0.228; \\ 1.473 \gg 0.294; \end{cases}$	$\begin{cases} 0.586 \geq 0.13; \\ 0.609 \geq 0.32; \\ 0.753 \geq 0.228; \\ 0.585 \geq 0.294; \end{cases}$	Оптимизированный вариант структуры соблюдает условия по структурной надежности.

Как видно из данных таблицы 3.7, с помощью применения разработанной процедуры удалось выбрать наиболее дешевую (на 44 % дешевле самой надежной сети) и при этом удовлетворяющую требуемому уровню надежности структуру распределительной сети.

В результате тестирования методики на основе разработанных процедур, подтверждены её положительные качества в решении задач о выборе и оптимизации структур для замкнутых систем:

- 1) возможность перестраивать уравнения системы

$$\sum_i H(p_{ij}) \prod_i f(p_i, x_i) \geq H_j^0 \quad \text{при изменениях в структуре;}$$

- 2) представление формул определения энтропии в компактном виде, в отличие от громоздких формул вида пересечения и объединения вероятностей состояний;

3) устранение проблемы с плавающей точкой (утвержденной в стандарте IEEE 754) в получении конечных результатов путем программной реализации.

Выводы по третьей главе

1. Разработана вычислительная процедура, позволяющая осуществлять анализ структурной надежности распределительной сети с учетом меры неопределенности информации. Процедура позволяет осуществлять расчет количества информации в системе и находить в ней наименее слабые места, так называемые «слабые звенья», которые необходимо снабдить дополнительными резервами. Оптимальное количество резервов можно определить методом неопределенных множителей Лагранжа. Процедура позволяет оценить структурную надежность всей системы и отдельных ее элементов, определить оптимальное количество резервных элементов, установка которых способствовала бы поддержанию требуемого уровня надежности системы.

2. Разработана вычислительная процедура, направленная на поиск оптимальной структуры замкнутой сети на этапах её проектирования. В данной процедуре учитываются такие показатели эффективности, как экономичность, выраженная через целевую функцию минимизации затрат, и структурная надежность, выраженная через систему ограничений, состоящих из неравенств. При этом надежность выражена в количественной форме посредством её расчета через меру неопределенности информации, позволяющей улучшить результаты расчета надежности путем формализации формул по расчету. Процедура базируется на методах перебора состояний структуры, минимальных путей и минимальных сечений и применима для систем, в которых вероятностные состояния элементов рассматриваются как независимые и противоположные. Процедура частично реализована в виде программного продукта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы получены следующие основные результаты:

1. Обоснована необходимость разработки новой методики оценки и выбора высоконадежных распределительных сетей. Выполнен анализ методов определения количественных оценок показателей безотказности, оценки вероятностных состояний элементов и структуры сети. Обозначена роль и возможности применения вероятностной меры и меры неопределенности информации в реализации задач анализа надежности.

2. Впервые разработана и реализована методика вычисления энтропии, исходные значения которой характеризуются показателями структурной надежности элементов сети. Методика включает в себя процедуры определения информационной энтропии совместных и несовместных событий, относящихся к участкам и всей сети. Решение достигается путем процедур эквивалентирования структур, а также методом построения путей и сечений на графах, что позволяет учесть множество пересекающихся состояний элементов сети. Применение этих процедур позволяет строить математические уравнения оценки состояния и системы ограничений задач выбора эффективной структуры сети

3. Предложена вычислительная процедура построения оптимальной структуры распределительной сети, включающая в себя целевую функцию минимизации средств на возведение сети и систему ограничений. Каждое из уравнений системы формировалось по методу минимальных путей (согласно теоремам сложения и умножения) для расчета вероятностей связей «источник–потребитель». Правые части включают в себя значения граничной вероятности, вычисленной исходя из средней наработки между отказами, и необходимы для соблюдения условий необходимого уровня надежности снабжения потребителей энергией по выделенной связи. Поиск оптимального варианта осуществлялся методом ветвей и границ. Задача апробирована на

тестовом примере решением с помощью метода ветвей и границ и применима к выбору структуры сети малой размерности.

4. На основе разработанной методики сформированы задачи и предложены вычислительные процедуры оценки состояния и выбора структуры распределительной сети, эффективной с точки зрения обеспечения требуемого уровня надежности:

4.1. Оценка состояния сети и поиска «слабого» звена. Решение данной задачи основано на построении математического выражения определения энтропии (левая часть уравнения) для множества связей «источник–потребитель» и заданного значения энтропии выполнения граничного условия соблюдения требуемого уровня надежности для потребителя (правая часть). Оценка состояния сети определяется соблюдением условий, накладываемых на ограничения, а поиск «слабого» звена – решением задачи оптимизации.

4.2. Расчет оптимального количества однотипных резервных элементов. Задача относится к выбору структуры с резервированием. Решение позволяет определить количество резервирующих друг друга однотипных элементов. Полученная структура не имеет «слабых» звеньев, что означает снятие неопределенности в сети, направленное на поддержание её надежности на заданном уровне. Уравнения системы ограничений имеют нелинейный вид, компактны и подлежат линеаризации исходя из количества элементов и возможных состояний. Решение задачи оптимизации, состоящей из системы алгебраических уравнений энтропии, получено при участии классических методов оптимизации.

4.3. Решение задачи оптимизации, которая состоит из целевой функции затрат и системы ограничений. Область допустимых решений определена функциями меры неопределенности информации соблюдения условия сохранения требуемого уровня надежности узлов сети. Для апробации задачи выбрана тестовая схема, выполнен сравнительный анализ

результатов с расчетами, полученными на основе процедуры, представленной в п. 3. Предлагаемая процедура решения данной задачи позволяет учесть фактор наличия неопределенности информации при выборе структур замкнутых сетей и выбирать структуры большей размерности, нежели при использовании меры вероятности.

5. Предлагаемые в работе решения поставленных задач обладают дополнительными положительными качествами анализа надежности: возможностью раздельного учета работоспособного и неработоспособного состояния элементов и их объединения; снятием проблемы, связанной с разработкой надежного программного обеспечения; возможностью анализа изменения интенсивности отказа при её прогнозировании; участием показателей неопределенности в объединении с доступными данными о надежности элементов с целью разработки модели их априорного распределения для анализа и решения сложных задач

Таким образом, цель данного исследования достигнута путем разработки методики, построения задач и расчетных процедур, применяемых в оценке состояния и выборе эффективных структур, не исключая при этом проблем снятия неопределенности информации.

СПИСОК БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аббасов, М. Э. Методы оптимизации : учебное пособие / М. Э. Аббасов. – Санкт-Петербург : Издательство «ВВМ», 2014. – 64 с.
2. Андросик, А. Б. Неопределенность информации в задаче прогнозирования / А. Б. Андросик, В. И. Хрусталева, А. С. Дулесов [и др.]. – Текст : непосредственный // Информационные технологии: приоритетные направления развития : [монография]. – Книга 7. – Новосибирск: СИБПРИНТ, 2012. – С. 97–112.
3. Антамошкин, А. Н. Метод ветвей и границ для задач условной псевдобулевой оптимизации с алгоритмически заданными функциями / А. Н. Антамошкин, И. С. Масич. – Текст : непосредственный // Решетневские чтения. – 2014. – Т. 2. – № 18. – С. 13–14.
4. Балашова, Т. И. Модели, методы и алгоритмы повышения структурной надежности сетей передачи данных : специальность 05.13.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Балашова Татьяна Ивановна. – Нижний Новгород, 2015. – 21 с. – Текст : непосредственный
5. Башкиров, А. Г. Энтропия Реньи как статистическая энтропия для сложных систем / А. Г. Башкиров. – Текст : непосредственный // ТМФ. – 2006. – Том 149. – Номер 2. – С. 299–317.
6. Борисова, Л. Ф. Моделирование оптимальных сетевых структур на базе графов кодовых пересечений при объединении произвольных сетей / Л. Ф. Борисова, Н. М. Путинцев. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ. – 2011. – Том 14. – № 4. – С. 789–798.
7. Бриллюэн, Л. Наука и теория информации / Л. Бриллюэн. – Москва : Наука, 1960. – 392 с. – Текст : непосредственный.
8. Бриллюэн, Л. Научная неопределённость и информация / Л. Бриллюэн: [перевод с английского]. – Текст : непосредственный. – Изд. 3 // URSS. – 2010. – 272 с. – ISBN 978-5-397-00969-0.

9. Будылина, Е. А. Основные принципы проектирования сложных технических систем в приложениях / Е. А. Будылина. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2013. – № 5. – С. 42–45.

10. Вильсон, А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем / А. Дж. Вильсон. – Москва : Наука, 1978. – 248 с. – Текст : непосредственный.

11. Вильчинская, О. О. Определение количества информации в структуре технической системы / О. О. Вильчинская, И. Н. Гатауллин, С. О. Головинов [и др.]. – Текст : непосредственный // Информационные технологии : приоритетные направления развития. Кн. 5 : [монография]. – Новосибирск : Сибпринт, 2010. – 261 с.

12. Винер, Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине / Н. Винер. – Москва : Наука, 1983. – 344 с. – Текст : непосредственный.

13. Волков С. В. Разработка методики комплектования запасными элементами электрических сетей 10 кВ на основе прогнозирования отказов : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.20.02 / Волков Сергей Владимирович. – Красноярск, 2006. – 24 с. – Текст : непосредственный.

14. Воробьёв, В. А. Теория систем и системный анализ. Стохастические системы : учебное пособие / В. А. Воробьёв, Ю. В. Березовская; Сев. (Арктич.) федер. ун-тим. М. В. Ломоносова. – Архангельск : ИПЦ САФУ, 2012. – 147 с. – ISBN 978-5-261-00616-9. – Текст : непосредственный.

15. Вошинин, А. П. Оптимизация в условиях неопределенности : [для вузов] / А. П. Вошинин, Г. Р. Сотиров. – М. : Изд-во МЖ ; София : Техника, 1989. – 224 с. : ил. – ISBN 5-7046-0001-8. – Текст : непосредственный.

16. Вяткин, В. Б. Синергетическая теория информации. Часть 1. Синергетический подход к определению количества информации /

В. Б. Вяткин. – Текст : непосредственный // Научный журнал КубГАУ. – Краснодар : КубГАУ, 2008. – № 44 (10).

17. Вяткин, В. Б. Синергетическая теория информации. Часть 2. Отражение дискретных систем в плоскости признаков их описания / В. Б. Вяткин. – Текст : непосредственный // Научный журнал КубГАУ. – Краснодар : КубГАУ, 2009. – № 45 (1).

18. Вяткин, В. Б. Синергетическая теория информации. Часть 3. Информационные функции и энтропия Больцмана / В. Б. Вяткин. – Текст : непосредственный // Научный журнал КубГАУ. – Краснодар : КубГАУ, 2009. – № 46 (2).

19. Вяткин, В. Б. Хаос и порядок дискретных систем в свете синергетической теории информации / В. Б. Вяткин. – Текст : непосредственный // Научный журнал КубГАУ. – Краснодар : КубГАУ, 2009. – № 47 (13).

20. Гвоздев, В. Е. Анализ надежности технических систем на основе математико-статистического моделирования / В. Е. Гвоздев, Г. И. Таназлы, А. Ю. Хасанов. – Текст : непосредственный // Вестник УГАТУ. – 2011. – № 2 (42).

21. Гельгор, А. Л. Теоретико-информационные основы телекоммуникационных систем : учеб. пособие / А. Л. Гельгор, Е. А. Попов. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2013. – 288 с. – Текст : непосредственный.

22. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы : учебное пособие / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – [2-е изд.]. – Москва : Физматлит, 2006. – 320 с. – Текст : непосредственный.

23. Гнатюк, В. И. Техноценологический подход к оптимизации системы электроснабжения войск / В. И. Гнатюк. – Калининград : КВИ ФПС РФ, 1996. – 56 с. – Текст : непосредственный.

24. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 28 с. – Текст : непосредственный.

25. Гук, Ю. Б. Расчет надежности схем электроснабжения / Ю. Б. Гук, М. М. Синенко, В. А. Тремясов. – Ленинград : Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1990. – С. 66–70. – Текст : непосредственный.

26. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М. : Мир. – 1984. – 318 с. – Текст : непосредственный.

27. Додонов, А. Г. Живучесть информационных систем / А. Г. Додонов, Д. В. Ландэ. – Киев : Наук. Думка, 2011. – 256 с. – Текст : непосредственный.

28. Дулесов, А. С. «Дерево информации» и его построение на основе последовательности случайных событий / А. С. Дулесов, Н. Н. Кондрат, М. А. ПрUTOвых. – Текст : непосредственный // Вестник Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова. – 2013. – № 4. – С. 8–11.

29. Дулесов, А. С. Возможности применения выражения Шеннона при определении количества информации / А. С. Дулесов, Д. Ю. Карандеев, Н. Н. Кондрат. – Текст : непосредственный // Вестник Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова. – 2016. – № 15.

30. Дулесов, А. С. Выбор структуры системы управления на основе меры неопределенности информации / А. С. Дулесов [и др.]. – Текст : непосредственный // *Moderní vymoženosti vedy* – 2013 : materialy IX mezinárodní vědecko-praktické conference. – Díl 71. Moderní informační technologie : Praha. – P. 37–40.

31. Дулесов, А. С. Информационно-факторный подход к анализу состояния технических объектов / А. С. Дулесов, А. В. Лобачева, Т. В. Карпушева. – Текст : непосредственный // *Перспективы науки*. – 2011. – № 6 [21]. – С. 111–114.

32. Дулесов, А. С. Информационные взаимосвязи в технических системах и оценка качества информации / А. С. Дулесов, Т. В. Карпушева, В. И. Хрусталев. – Текст : непосредственный // В мире научных открытий. – 2010. – № 6 (12). – С. 56–61.

33. Дулесов, А. С. Как определить количество информации для простейшей структуры системы / А. С. Дулесов, Д. Ю. Карандеев, Н. Н. Кондрат. – Текст : непосредственный // Вестник Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова. 2016. – № 15.

34. Дулесов, А. С. Количество информации при наложении и пересечении элементарных событий / А. С. Дулесов, Н. Н. Кондрат. – Текст : непосредственный // Научное обозрение. – 2014. – № 12. – С. 146–150.

35. Дулесов, А. С. Логарифмическая мера информации состояния технического объекта / А. С. Дулесов, Е. В. Кабаева. – Текст : непосредственный // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1.

36. Дулесов, А. С. Мера информации в задаче оценки бесперебойной работы технической системы / А. С. Дулесов, П. А. Агеева. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 12, (часть 1). – С. 102–107.

37. Дулесов, А. С. Мера неопределенности информации и её свойства применительно к оценке случайного поведения технического объекта / А. С. Дулесов, Н. Н. Кондрат. – Текст : непосредственный // Научное обозрение. – 2014. – № 7. – С. 258–264.

38. Дулесов, А. С. Модели управления развитием предприятий электроэнергетики : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.13.01 / Дулесов Александр Сергеевич. – Красноярск, 2003. – 40 с. – Текст : непосредственный.

39. Дулесов, А. С. Определение величины информации о структурном содержании технической системы из последовательно соединенных взаимозависимых элементов / А. С. Дулесов, Е. А. Ускова. – Текст : непосредственный // Вопросы современной науки и техники. Университет им. В. И. Вернадского. Сер. «Технические науки». – 2009. – № 8 (22).

40. Дулесов, А. С. Определение для простейшей структуры технической системы количества информационной энтропии посредством её нормировки / А. С. Дулесов, Н. Н. Кондрат. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2, (часть 20). – С. 4408–4412.

41. Дулесов, А. С. Определение количества информации в структуре технической системы / А. С. Дулесов // Информационные технологии : приоритетные направления развития : Книга 5 : [монография] / О. О. Вильчинская, И. Н. Гатауллин, С. О. Головинов [и др.]. – Новосибирск : СИБПРИНТ, 2011. – 261 с. – Текст : непосредственный.

42. Дулесов, А. С. Определение количества информационной энтропии в структуре технической системы методом минимальных путей / А. С. Дулесов, Д. Ю. Карандеев, Н. Н. Кондрат. – Текст : непосредственный // Журнал «Современные наукоемкие технологии». – 2016. – № 2, (часть 3). – С. 425–429.

43. Дулесов, А. С. Определение количества информационной энтропии в структуре технической системы методом минимальных сечений / А. С. Дулесов, Д. Ю. Карандеев, Н. Н. Кондрат. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 3 (часть 3). – С. 472–476.

44. Дулесов, А. С. Определение количества информационной энтропии в структуре технической системы методом перебора состояний / А. С. Дулесов, Н. Н. Кондрат. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7, (часть 4). – С. 745–748.

45. Дулесов, А. С. Определение меры неопределенности информации в задаче бесперебойной поставки ресурсов потребителям / А. С. Дулесов,

Е. А. Ускова. – Текст : непосредственный // Перспективы науки. Science prospects. – 2012. – № 5 (32). – С. 54–60.

46. Дулесов, А. С. Оптимизация сетей технического назначения при заданных условиях соблюдения уровня структурной надежности / А. С. Дулесов, Д. Ю. Карандеев, Д. А. Калугин. – DOI 10.17513/snt.37407. – Текст : электронный // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 2. – С. 47–51. – URL : top-technologies.ru/ru/article/view?id=37407 (дата обращения: 10.03.2020).

47. Дулесов, А. С. Показатель разграничения уровня надежности технической системы по качественному признаку : энтропийный подход / А. С. Дулесов, Н. В. Дулесова, Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 2 (часть 3). – С. 477–481.

48. Дулесов, А. С. Построение оптимальной структуры технической системы методом «ветвей и границ» с учетом критериев экономичности и надежности / А. С. Дулесов, Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Надежность и безопасность энергетики. – 2016. – № 2 (33). – С. 56–59.

49. Дулесов, А. С. Применение подходов Хартли и Шеннона к задачам определения количества информации технических систем / А. С. Дулесов, Е. А. Ускова. – Текст : непосредственный // Вопросы современной науки и практики ; Университет им. В. И. Вернадского. – 2009. – № 2 (16). – С. 46–50.

50. Дулесов, А. С. Применение статистической меры информации в задаче потребления энергии / А. С. Дулесов, Е. А. Ускова. – Текст : непосредственный // Перспективы науки. – 2010. – № 1 [03].

51. Дулесов, А. С. Применение формулы Хартли для оценки структурных связей элементов в задаче обеспечения надежного функционирования технических систем / А. С. Дулесов, Е. А. Ускова. – Текст : непосредственный // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2009. – № 6 (20). – С. 37–41.

52. Дулесов, А. С. Свойства энтропии технической системы / А. С. Дулесов, М. Ю. Семенова, В. И. Хрусталева. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 8 (часть 3). – С. 631–636.

53. Дулесов, А. С. Субъективная вероятность в определении меры неопределенности состояния объекта / А. С. Дулесов, М. Ю. Семенова. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 3. – С. 81–86.

54. Дулесов, А. С. Эквивалентирование количества информационной энтропии в структуре технической системы / А. С. Дулесов, Н. Н. Кондрат. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6 (часть 1). – С. 14–19.

55. Захарова, Е. М. Обзор методов многомерной оптимизации / Е. М. Захарова, И. К. Минашина. – Текст : непосредственный // Информационные процессы. – 2014. – № 3(14). – С. 256–274.

56. Зеленский, В. А. Проектирование сложных систем. учеб. пособие / В. А. Зеленский ; Минобрнауки России. Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2012. – Текст : непосредственный.

57. Землянухин, В. Н. Задачи оптимизации на графах : учеб. пособие / В. Н. Землянухин, Л. Н. Землянухина. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2009. – 130 с. – Текст : непосредственный.

58. Землянухина, Л. Н. Алгоритмы оптимизации на графах : учебное пособие / Л. Н. Землянухина. – Ростов-на-Дону. – 2008. – 87 с. – Текст : непосредственный.

59. Зорин, Д. А. Синтез архитектур вычислительных систем реального времени с учетом ограничений на время выполнения и требований к надежности : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.13.01 / Зорин Даниил Александрович. – Москва, 2014. – 18 с. – Текст : непосредственный.

60. Карандеев Д. Ю. Повышение надежности распределительной сети электроснабжения посредством инструментов теории информации / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Катановские чтения – 2017 : сборник научных трудов студентов. – Абакан. Издательство Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова, 2017. – С. 243–244.

61. Карандеев Д. Ю. Повышение эффективности построения структур технических систем на базе использования языка C++ / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Инженерное и технологическое образование : проблемы и решения : материалы межрегиональной научно-практической конференции. 11 ноября 2016 г., г. Абакан. – Абакан : Изд-во Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова, 2016. – С. 93–94.

62. Карандеев, Д. Ю. Анализ альтернативных способов реализации концепции Smart Grid на основе теории информации и искусственного интеллекта / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Катановские чтения – 2016 : сборник научных трудов студентов – Абакан : Издательство Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова, 2016. – С. 265–266.

63. Карандеев, Д. Ю. Анализ методов оптимизации для решения задачи построения оптимальных структур технических систем / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Прикладная математика и информатика : современные исследования в области естественных и технических наук : сборник научных статей IV научно-практической Международной конференции (школы-семинара) молодых ученых : 23–25 апреля 2018 г. – В двух частях. – Тольятти, 2018. – Ч. 1. – С. 53–59.

64. Карандеев, Д. Ю. Анализ перспектив использования меры неопределенности информации в целях повышения качества проектирования сложных технических систем / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Инновационная наука. – 2015. – № 12 (2).

65. Карандеев, Д. Ю. Анализ показателей эффективности в задачах построения структур технических систем / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Информационные технологии в моделировании и управлении : подходы, методы, решения : сборник научных статей I Всероссийской научной конференции : 12–14 декабря 2017 г. – В двух частях. – Тольятти, 2017. – Ч. 2. – С. 119–124.

66. Карандеев, Д. Ю. Анализ программных обеспечений, позволяющих моделировать сложные технические системы / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Современная техника и технологии. – 2015. – № 12 (52).

67. Карандеев, Д. Ю. Инструменты теории информации в задачах повышения надежности распределительных электрических сетей / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Проспект Свободный – 2017 : материалы научной конференции, посвященной Году экологии в Российской Федерации ; ХТИ – филиал СФУ, 17–21 апреля 2017 г. – С. 9–13.

68. Карандеев, Д. Ю. Оптимизация сетей технического назначения при заданных условиях соблюдения уровня структурной надежности / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Вестник Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова. – 2019. – № 2. – С. 47–51.

69. Карандеев, Д. Ю. Оптимизация структуры технической системы по критериям экономичности и надежности, выраженной через меру неопределенности информации / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // На пути к информационному обществу : сборник статей Международной научно-практической конференции (27.10.2017, г. Москва). – Москва : Импульс, 2017. – С. 396–399.

70. Карандеев, Д. Ю. Подходы к решению задач анализа структурной надёжности и поиска оптимальной структуры технической системы / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Вестник Хакасского

государственного университета им. Н. Ф. Катанова. – 2019. – № 27. – С. 17–20.

71. Карандеев, Д. Ю. Подходы к решению задачи поиска оптимальной структуры распределительной сети на основе инструментов теории информации / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Проспект Свободный – 2018 : Международная научно-практическая конференция, 23–27 апреля 2018 г. – Красноярск : Сибирский федеральный университет. – 2018. – С. 1461–1463.

72. Карандеев, Д. Ю. Поиск оптимального количества резервирующих элементов посредством метода множителей Лагранжа с учетом меры неопределенности информации / Д. Ю. Карандеев, Д. А. Калугин // Постулат. – 2018. – № 9 (35). – С. 10. – Текст : непосредственный.

73. Карандеев, Д. Ю. Представление показателей надежности оборудования инженерно-технических сетей через меру неопределенности информации / Д. Ю. Карандеев, А. С. Дулесов, И. Ю. Карандеева. – DOI: 10.17513/snt.37910. – Текст : электронный // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 2. – С. 30–34.

74. Карандеев, Д. Ю. Преимущества применения меры неопределенности информации в расчете структурной надежности инженерно-технической системы / Д. Ю. Карандеев, И. Ю. Карандеева. – Текст : непосредственный // Вестник Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова. – 2019. – № 30.

75. Карандеев, Д. Ю. Преимущества среды Qt Creator как площадки для разработки на языке C++ импортозамещающих программных обеспечений на примере реализации метода «ветвей и границ» / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Катановские чтения – 2016 : сборник научных трудов студентов. – Абакан : Изд-во Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова, 2016.

76. Карандеев, Д. Ю. Применение инструментов теоретической информатики в задачах проектирования оптимальных структур сложных технических систем / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Катановские чтения – 2016 : сборник научных трудов студентов – Абакан : Изд-во Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова, 2016. – С. 266–267.

77. Карандеев, Д. Ю. Проблематика осуществления имитационного моделирования распределительной сети / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Прикладная математика и информатика : современные исследования в области естественных и технических наук : сборник научных статей IV научно-практической международной конференции (школы-семинара) молодых ученых : 23–25 апреля 2018 г. В двух частях. – Тольятти, 2018. – Ч. 1. – С. 352–358.

78. Карандеев, Д. Ю. Программа для поиска оптимальной структуры распределительной сети на этапах проектирования. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610366 от 13.01.2020 / Д. Ю. Карандеев. – Москва : РОСПАТЕНТ, 2020. – Текст : непосредственный.

79. Карандеев, Д. Ю. Прямое управление моментом асинхронного двигателя с использованием адаптивного нейроконтроллера в условиях неопределенности / Д. Ю. Карандеев, Е. А. Энгель. – Текст : непосредственный // Науковедение. – 2015. – № 5 (7).

80. Карандеев, Д. Ю. Пути реализации сквозных технологий цифровой экономики на базе подходов из теории информации / Д. Ю. Карандеев, И. Ю. Карандеева – Текст : непосредственный // Цифровой регион : опыт, компетенции, проекты : сборник статей Международной научно-практической конференции, г. Брянск. – 2018. – С. 208–212.

81. Карандеев, Д. Ю. Развитие концепции SMART GRID в области проектирования систем электроснабжения при поддержке теории

информации / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные энергосистемы: материалы IV Международного форума. – 2016. – № 2. – С. 277–280.

82. Карандеев, Д. Ю. Разработка интерфейса программного обеспечения по поиску оптимальных структур распределительных сетей / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Прикладная математика и информатика : современные исследования в области естественных и технических наук : материалы V Международной научно-практической конференции (школы-семинара) молодых ученых : 22–24 апреля 2019 г. – С. 548–551.

83. Карандеев, Д. Ю. Расширение области применения теории информации как одно из перспективных направлений развития информационных технологий / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Новые информационные технологии в образовании и аграрном секторе экономики : сборник материалов I Международной научно-практической конференции, г. Брянск. – 2018. – С. 179–184.

84. Карандеев, Д. Ю. Реализация виртуального стенда асинхронного двигателя на базе адаптивного нейроконтроллера в условиях неопределенности / Д. Ю. Карандеев, Е. А. Энгель. – Текст : непосредственный // Научное обозрение. – 2015. – № 22. – С. 276–280.

85. Карандеев, Д. Ю. Реализация метода ветвей и границ в статистической среде R / Д. Ю. Карандеев, А. С. Голубничий. – Текст : непосредственный // Науковедение. – 2015. – № 6 (7).

86. Карандеев, Д. Ю. Реализация мультимедийного приложения на языке программирования C++ посредством использования библиотеки SFML / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 12.

87. Карандеев, Д. Ю. Реализация программного обеспечения для построения графов с целью решения задачи проектирования оптимальных

структур инженерно-технических систем / Д. Ю. Карандеев, И. Ю. Карандеева. – Текст : непосредственный // Вестник Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова. – 2019. – № 29.

88. Карандеев, Д. Ю. Сравнительный анализ инструментов обработки статистических данных в сфере Data Science / Д. Ю. Карандеев, И. Ю. Карандеева. – Текст : непосредственный // Прикладная математика и информатика : современные исследования в области естественных и технических наук : материалы V Международной научно-практической конференции (школы-семинара) молодых ученых : 22–24 апреля 2019. – С. 398–402.

89. Карандеев, Д. Ю. Учёт количества информации в задачах построения оптимальных структур распределительных сетей с резервированием / Д. Ю. Карандеев. – Текст : непосредственный // Вестник Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова. – 2017. – № 20. – С. 16–19.

90. Карандеева, И. Ю. Рейтинг языков программирования RedMonk как оптимальный инструмент для выявления тенденций в популярности языков программирования / И. Ю. Карандеева, Д. Ю. Карандеев. – Текст : электронный // E-Scio : Электронное периодическое издание «E-Scio.ru». – Эл № ФС77-66730. – 2020. – № 1. – С. 1–7.

91. Киселев, Д. В. Задачи многокритериального выбора при синтезе технических систем / Д. В. Киселев, Чжо Тин. – Текст : непосредственный // Вестник евразийской науки. – 2014. – № 4 (23).

92. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. – Москва : ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с. – Текст : непосредственный.

93. Колмогоров А. Н. Три подхода к определению понятия «количество информации» / А. Н. Колмогоров. – Текст : непосредственный // Проблемы передачи информации. – 1965. – № 1 (1). – С. 3–11.

94. Колмогоров, А. Н. К логическим основам теории информации и теории вероятностей / А. Н. Колмогоров. – Текст : непосредственный // Проблемы передачи информации и теории вероятностей. – 1969. – № 3 (5). – С. 3–7.

95. Колпаков, Р. М. Верхняя и нижняя оценки трудоемкости метода ветвей и границ для задачи о ранце / Р. М. Колпаков, М. А. Посыпкин. – Текст : непосредственный // Дискретная математика. – 2010. – № 1 (22). – С. 58–73.

96. Кольцов, Ю. В. Сравнительный анализ методов оптимизации для решения задачи интервальной оценки потерь электроэнергии / Ю. В. Кольцов, Е. В. Бобошко. – Текст : непосредственный // Компьютерные исследования и моделирование. – 2013. – № 2 (5) – С. 231–239.

97. Конесев, С. Г. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем / С. Г. Конесев, Р. Т. Хазиева. – Текст : непосредственный // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1 (1).

98. Костин, В. Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики : учебное пособие / В. Н. Костин. – СПб. : СЗТУ, 2003. – 120 с. – Текст : непосредственный.

99. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий : учебник / Б. И. Кудрин. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с. – Текст : непосредственный.

100. Кузнецов, Н. А. Информационное взаимодействие в технических и живых системах / Н. А. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Информационные процессы. – 2001. – № 1 (1). – С. 1–9.

101. Куницына, Н. Н. Экономическая динамика и риски / Н. Н. Куницына. – Москва : Редакция журнала «Экономика

сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий», 2002. – 288 с. – Текст : непосредственный.

102. Лидовский, В. В. Теория информации : учебное пособие / В. В. Лидовский. – М. : Спутник+, 2004. – 111 с. – Текст : непосредственный.

103. Литвиненко, Р. С. Практическое применение непрерывных законов распределения в теории надежности технических систем / Р. С. Литвиненко, П. П. Павлов, Р. Г. Идиятуллин. – DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-4-17-23. – Текст : электронный // Надежность. – 2016. – 16 (4). – С. 17–23.

104. Львович, Я. Е. Метод ветвей и границ для многокритериальной задачи повышения надежности резервирования / Я. Е. Львович, И. Л. Каширина. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–15. – С. 3352–3357.

105. Макоклюев, Б. И. Анализ и планирование электропотребления / Б. И. Макоклюев. – Москва : Энергоатомиздат, 2008. – 295 с. – Текст : непосредственный.

106. Малышев, В. П. Информационные оценки технологических переделов в цветной металлургии / В. П. Малышев, С. Ш. Кажикенова. – Текст : непосредственный // Вестник Национальной инженерной академии наук. – 2009. – № 2 (32). – С. 126–131.

107. Матвеевский В. Р. Надежность технических систем: учебное пособие / В. Р. Матвеевский ; Московский государственный институт электроники и математики. – Москва, 2002. – 113 с. – Текст : непосредственный.

108. Матренин, П. В. Обзор методов оптимизации в комбинаторных задачах класса Job-Shop Scheduling / П. В. Матренин. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 4 (78). – С. 113–124.

109. Меламедов, И. М. Физические основы надежности / И. М. Меламедов. – Ленинград : Энергия, 1970. – 152 с. – Текст : непосредственный.

110. Мурыгин А. В. Теория информации и кодирования : лабораторный практикум / А. В. Мурыгин, А. Н. Бочаров ; Сибирский государственный аэрокосмический университет. – Красноярск, 2007. – 27 с. – Текст : непосредственный.

111. Охорзин, В. А. Оптимизация экономических систем. Примеры и алгоритмы в среде Mathcad : учеб. пособие / В. А. Охорзин. – Москва : Финансы и статистика, 2005. – С. 144. – Текст : непосредственный.

112. Панченков А. Н. Энтропия физических и кибернетических систем / А. Н. Панченков. – Текст : непосредственный // Методы управления большими системами. – Иркутск. – 1970. – С. 113–120.

113. Панченков, А. Н. Трактат : Энтропийный Мир. Второй мемуар : Энтропийная парадигма Естествознания / А. Н. Панченков. – URL : <http://www.entropyworld.narod.ru/> (дата обращения : 02.08.2018). – Текст : электронный.

114. Пикин, Д. Г. Анализ статистики аварий и отказов в электрических сетях Мурманска / Д. Г. Пикин. – Текст : непосредственный // Cloud of science. – 2013. – № 4. – С. 26–30.

115. Попков, А. Ю. Энтропийная модель инвестиционного портфеля / А. Ю. Попков. – Текст : непосредственный // Автомат и телемех. – 2006. – № 9. – С. 179–190.

116. Поплавский, Р. П. Демон Максвелла и соотношения между информацией и энтропией / Р. П. Поплавский // УФН. – 1979. – № 1 (128). – С. 165–176.

117. Попов, В. А. Теория вероятностей. Часть 2. Случайные величины : учебное пособие / В. А. Попов. – Казань : Казанский университет, 2013. – 45 с. – Текст : непосредственный.

118. Попова, О. А. Анализ новых подходов к представлению неопределенности в данных для крупномасштабных систем / О. А. Попова. – Текст : непосредственный // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015. – 2015. – С. 385–388.

119. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – [Изд. 7]. – 2001–2004 гг. – Текст : непосредственный.

120. Прангишвили, И. В. Энтропийные и другие системные закономерности : Вопросы управления сложными системами / И. В. Прангишвили. – Текст : непосредственный / Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова. – М. : Наука, 2003. – 428 с.

121. Райфа, Г. Анализ решений. Введение в проблему выбора в условиях неопределенности / Г. Райфа. – М. : Наука, 1977. – 408 с. – Текст : непосредственный.

122. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г.

123. Розенберг, Г. С. Информационный индекс и разнообразие : Больцман, Котельников, Шеннон, Уивер / Г. С. Розенберг. – Текст : непосредственный // Самарская Лука : проблемы региональной и глобальной экологии. – 2010. – № 2 (19). – С. 4–25.

124. Российская Федерация. Законы. О внесении изменений в Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» и статью 9.16 Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях» : Федеральный закон от 19.07.2018 г. № 221-ФЗ. – URL : <http://kremlin.ru/acts/bank/43342> (дата обращения : 02.08.2018). – Текст : электронный.

125. Рутковский, Л. Методы и технологии искусственного интеллекта / Л. Рутковский. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2010. – С. 520. – Текст : непосредственный.

126. Саночкин В. В. Что такое информация / В. В. Саночкин. – Текст : непосредственный // Эволюция. – 2005. – № 2. – С. 110–113.

127. Сафронов, В. В. Методика оптимизации структуры сложных технических систем в условиях риска / В. В. Сафронов, Ю. В. Ведерников, В. В. Матросов [и др.]. – Текст : непосредственный // Информационно-управляющие системы. – 2007. – № 1. – С. 40–45.

128. Седов, Е. А. Одна формула и весь мир : кн. об энтропии / Е. А. Седов. – М. : Знание, 1982. – 175 с. – Текст : непосредственный.

129. Семёнов, А. С. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB / А. С. Семёнов, И. А. Якушев, А. Н. Егоров. – Текст : непосредственный // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 8. – С. 56–64.

130. Смирнова К. А. Понятие неопределенности экономических систем и подходы к ее оценке – Текст : непосредственный. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2008. – № 2 (11). – С. 241-246.

131. Сугак, Е. В. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие. – В 3 ч. / Е. В. Сугак, А. Г. Кучкин, Е. Н. Окладникова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2011. – Ч. 1. Техногенная безопасность – 260 с. – Текст : непосредственный.

132. Сурмин, Ю. П. Теория систем и системный анализ : учеб. пособие / Ю. П. Сурмин. – Киев : МАУП, 2003. – 368 с. – Текст : непосредственный.

133. Уемов, А. И. Системный подход и общая теория систем / А. И. Уемов. – М. : Мысль, 1978. – 272 с. – Текст : непосредственный.

134. Урсул, А. Д. Природа информации : философский очерк / А. Д. Урсул – Текст : непосредственный ; Челяб. гос. акад. культуры и искусств; Науч.-образоват. центр «Информационное общество»; Рос. гос. торгово-эконом. ун-т; Центр исслед. глоб. процессов и устойчивого развития. – [2-е изд.]. – Челябинск, 2010. – 231 с.

135. Файбисовича Д. Л. Справочник по проектированию электрических сетей / Д. Л. Файбисовича. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : ЭНАС, 2012. – 376 с. – Текст : непосредственный.

136. Федотов, А. В. Основы теории надежности и технической диагностики : конспект лекций / А. В. Федотов, Н. Г. Скабкин. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. – 64 с. – Текст : непосредственный.

137. Филимонов, Н. Б. Мифологизация вероятностно-статистической методологии учета факторов неопределенности в задачах управления и наблюдения / Н. Б. Филимонов. – Текст : непосредственный // Современные проблемы прикладной математики информатики, автоматизации и управления : материалы международного семинара. – Севастополь : Издательство СевНТУ. – 2012. – С. 83–94.

138. Хармут, Х. Применение методов теории информации в физике / Х. Хармут. – М. : Мир, 1989. – 334 с. – Текст : непосредственный.

139. Хенли, Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото ; пер. с англ. В. С. Сыромятникова, Г. С. Деминой; под общей редакцией В. С. Сыромятникова. – М. : Машиностроение, 1984. – 528 с. – Текст : непосредственный.

140. Хинчин, А. Я. Понятие энтропии в теории вероятностей / А. Я. Хинчин. – Текст : непосредственный // УМН. – 1953. – № 3 (55). – С. 3–20.

141. Хрусталева, В. И. Мера неопределенности информации в задаче выбора прогнозных решений : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.13.01 / Хрусталева Виталий Игоревич. – Абакан, 2012. – 23 с. – Текст : непосредственный.

142. Чернавский, Д. С. Синергетика и информация (динамическая теория информации) / Д. С. Чернавский. – [Изд. 2-е, испр. и доп.]. – Москва : Едиториал УРСС, 2004. – 288 с. – Текст : непосредственный.

143. Чумак, О. В. Энтропии и фракталы в анализе данных / О. В. Чумак. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. – 164 с. – Текст : непосредственный.

144. Шамбадаль, П. Развитие и приложение понятия энтропии / П. Шамбадаль. – М. : Наука, 1967. – 280 с. – Текст : непосредственный.

145. Шарапов, В. И. Проблемы оптимизации работы городских теплофикационных систем / В. И. Шарапов, М. М. Замалеев, П. Е. Чаукин. – Текст : непосредственный // Надежность и безопасность энергетики. – 2015. – № 1 (28). – С. 76–79.

146. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М. : Изд. иностр. лит., 1963. – 830 с. – Текст : непосредственный.

147. Шипунов, А. Б. Наглядная статистика. Используем R! / А. Б. Шипунов, Е. М. Балдин, П. А. Волкова [и др.]. – Москва : ДМК Пресс, 2012. – 298 с. – Текст : непосредственный.

148. Cover, T. M. Elements of Information Theory, second edition / T. M. Cover, J. A. Thomas. – New Jersey : Wiley and Sons, 2006. – P. 748. – Текст : непосредственный.

149. Dulesov, A. S. A comparison of the expected and statistical probability distribution of system failures / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, R. I. Bazhenov [et al.]. – DOI : 10.1088/1757-899X/537/6/062027. – Текст : электронный // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering, MIP Engineering. – 2019. – Vol. 537. – P. 1–6.

150. Dulesov, A. S. Analytical notes on growth of economic indicators of the enterprise / A. S. Dulesov, O. S. Eremeeva, D. J. Karandeev, T. G. Krasnova. – DOI : 10.2991/iscfec-18.2019.81. – Текст : электронный // Advances in Economics, Business and Management Research. – 2018. – Vol. 47. – P. 327–332.

151. Dulesov, A. S. Approaches to Information Measurement of the Structure State of Technical Systems / A. S. Dulesov, O. S. Ereemeeva, D. J. Karandeev, N. V. Dulesova. – DOI : 10.1109/FarEastCon.2018.8602799. – Текст : электронный // IEEE 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2018. – P. 1–6.

152. Dulesov, A. S. Comparative Assessment of Planned and Actual Production Indicators Based on the Measure of Information Uncertainty / A. S. Dulesov, O. S. Ereemeeva, D. J. Karandeev, T. G. Krasnova (2020). – DOI: 10.1007/978-981-15-2244-4_14. – Текст : электронный // Proceeding of the International Science and Technology Conference «FarEastCon 2019». Smart Innovation, Systems and Technologies, Vladivostok, 01–04 October 2019. – Singapore : Springer, 2020. – Vol. 172. – P. 165–176.

153. Dulesov, A. S. Determination of the amount of entropy of non-recoverable elements of the technical system / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, N. V. Dulesova. – DOI : 10. 1088/1757-899X/450/7/072004. – Текст : электронный // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering, MISTAerospace. – 2018. – Vol. 450 (7). – P. 1–6.

154. Dulesov, A. S. Determining the number of redundant elements of the distribution network in compliance with the specified amount of information entropy / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, V. I. Khrustalev, N. V. Dulesova and T. G. Krasnova. – DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055030. – Текст : электронный // Journal of Physics : Conference Series, APITECH. – 2019. – Vol. 1399. – P. 1–6.

155. Dulesov, A. S. Entropy approach to the evaluation of the integration processes in agro-industrial complex / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, T. G. Krasnova [et al.]. – DOI: 10.1088/1755-1315/315/3/032007. – Текст : электронный // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science (EES), AGRITECH. – 2019. – Vol. 315. – P. 1–6.

156. Dulesov, A. S. Improving the operation quality of technical systems using information theory models / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, N. V. Dulesova. – DOI: 10.1051/matecconf/201822404006. – Текст : электронный // MATEC Web Conf., International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE). – 2018. – Vol. 224. – P. 1–7.

157. Dulesov, A. S. Optimal redundancy of radial distribution networks by criteria of reliability and information uncertainty / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, N. V. Dulesova. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076467. – Текст : электронный // IEEE 3rd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2017. – P. 1–4.

158. Dulesov, A. S. Reliability analysis of distribution network of mining enterprises electrical power supply based on measure of information uncertainty / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, N. V. Dulesova. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032008. – Текст : электронный // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science, Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 87. – P. 1–6.

159. Dulesov, A. S. The Analysis of Economic Indicators Based on the Information Model of N. Wiener / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, O. S. Ereemeeva and T. G. Krasnova. – DOI: 10.1088/1757-899X/753/5/052053. – Текст : электронный // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering, FarEastCon. – 2020. – Vol. 753. – P. 1–9.

160. Dulesov, A. S. The evaluation of the correlation between entropy and negentropy in the structure of a technical system. 2017 / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, T. G. Krasnova. – DOI: 10.1051/matecconf/201712903005. – Текст : электронный // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE). – 2017. – Vol. 129. – Pp. 1–4.

161. Dulesov, A. S. The logarithmic basis to measure the amount of information related to the assessment of reliability of elements of the technical

system / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, O. S. Eremeeva [et al.]. – DOI: 10.1088/1757-899X/537/5/052003. – Текст : электронный // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering, MIP Engineering. – 2019. – Vol. 537. – P. 1–6.

162. Dulesova, N. V. Application of the information uncertainty measure when comparing planned and actual commercial losses of electricity / N. V. Dulesova, A. S. Dulesov, D. J. Karandeev and A. V. Malykhina. – DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062019. – Текст : электронный // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering, MIP Engineering. – 2020. – Vol. 862. – P. 1–6.

163. Ebeling, C. E. An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering / C. E. Ebeling. – Текст : непосредственный // McGraw-Hill Companies, Inc., Boston. – 1997. – P. 512.

164. Engel, E. A. Energy-saving technology of vector controlled induction motor based on the adaptive neuro-controller / E. A. Engel, D. J. Karandeev, I. V. Kovalev. – DOI: 10.1088/1757-899X/94/1/012008. – Текст : электронный // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 94. – P. 1–6.

165. Europe's Electricity Networks of the Future. – Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2006. – P. 44. – Текст : непосредственный.

166. Farag, Reda A novel reliability evaluation method for large engineering systems / Reda Farag, Halidar Achintya. – Текст : непосредственный // Ain Shams Engineering Journal. – 2016. – P. 1–13.

167. Godsey, B. Think Like a Data Scientist : Tackle the data science process step-by-step / B. Godsey ; Shelter Island. – New York : Manning Publ.Co. – 2017. – P. 306. – Текст : непосредственный.

168. Guerriero, V. Power Law Distribution : Method of Multi-scale Inferential Statistics / V. Guerriero. – Текст : непосредственный // Journal of Modern Mathematics Frontier. – 2012. – Vol. 1. – P. 21–28.

169. Hartley, R. V. L. Transmission of Information / R. V. L. Hartley. – Текст : непосредственный // Bell System Technical Journal. – 1928. – Vol. 7(3). – P. 535–563.
170. Haykin, S. Neural networks and learning machines / S. Haykin. – Текст : непосредственный // 3rd ed. Prentice Hall. – 2009. – P. 906.
171. Kabacoff, R. I. R in action. Data analysis and graphics with R / R. I. Kabacoff. – Текст : непосредственный // Manning Publications, – 2011. – P. 474.
172. Karandeev, D. J. Calculation of the optimal number of redundant elements of power systems using the Lagrange multipliers method and information theory / D. J. Karandeev, A. S. Dulesov, R. I. Bazhenov and I. J. Karandeeva. – DOI : 10.1088/1757-899X/862/6/062026. – Текст : электронный // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering, MIP Engineering. – 2020. – Vol. 862. – P. 1–6.
173. Karandeev, D. J. The solution to the problem of finding the optimal structure of the distribution network based on information theory tools / D. J. Karandeev. – Текст : непосредственный. // Информационные технологии в моделировании и управлении : подходы, методы, решения : сборник научных статей II Всероссийской научной конференции с международным участием : 22–24 апреля 2019 г. – С. 456–460.
174. Kirkpatrick, S. Optimization by Simulated Annealing / S. Kirkpatrick, Jr. C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi. – Текст : непосредственный // Science. – 1983. – Vol. 220. – P. 671–680.
175. Kobayashi, K. A new algorithm in enumerating all minimal paths in a sparse network / K. Kobayashi, H. Yamamoto. – Текст : непосредственный. // Reliability Engineering & System Safety. – 1999. – Vol. 65(1). – P. 11–15.
176. Kossiakoff, A. Systems Engineering Principles and Practice / A. Kossiakoff, W. N. Sweet, S. J. Seymour [et al.] ; Second edition – Hoboken,

New Jersey : A John Wiley & Sons, – 2011. – P. 599. – Текст : непосредственный.

177. Land, A. H. An automatic method of solving discrete programming problems / A. H. Land, A. G. Doig. – Текст : непосредственный // *Econometrica*. – 1960. – Vol. 28. – P. 497–520.

178. Leff, H. S. Maxwell's Demon : Entropy, Information, Computing / H. S. Leff, A. F. Rex. – Текст : непосредственный // Princeton University Press, Princeton, New Jersey. – 1990. – P. 362.

179. Lior, R. Data Mining with Decision Trees : Theory and Applications / R. Lior, M. Oded. – Текст : непосредственный // World Scientific. – 2008. – P. 244.

180. Little, J. D. C. An algorithm for the Traveling Salesman Problem / J. D. C. Little, K. G. Murty, D. W. Sweeney. – Текст : непосредственный // *Operations Research*. – 1963. – Vol. 11. – P. 972–989.

181. MacKay, D. Information Theory, Inference, and Learning Algorithms / D. MacKay. – Текст : непосредственный // Cambridge University Press. – 2003. – P. 640.

182. Malyshev, V. P. Information-entropy analyses of the quality of manufacturing process of technological products / V. P. Malyshev, S. Sh. Kazhikenova. – Текст : непосредственный // *Eurasian PHYSICAL Technical journal*. – 2009. – Vol. 6 (11). – P. 38–45.

183. Mi, J. Reliability assessment of complex electromechanical systems under epistemic uncertainty / J. Mi, Y. Li, Y Yang [et al.]. – Текст : непосредственный // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2016. – Vol. 152. – P. 1–15.

184. Muraleedharan, G. Characteristic and Moment Generating Functions of Generalised Pareto (GP3) and Weibull Distributions / G. Muraleedharan, C. G. Soare. – Текст : непосредственный // *Journal of Scientific Research and Reports*. – 2014. – Vol. 3 (14). – P. 1861–1874.

185. Naur, P. A Basic Principle of Data Science / P. Naur. – Текст : непосредственный // Concise Survey of Computer Methods. Lund. – 1974. – P. 397.
186. O'Connor Patrick, D. T. Practical Reliability Engineering / D. T. O'Connor Patrick. – Текст : непосредственный // 4th ed, John Wiley & Sons. – 2002. – P. 512.
187. Renyi, A. On Measures of Entropy and Information / A. Renyi. – Текст : непосредственный // Proc. Fourth Berkeley Symposium. – V. 1. – Berkeley, Calif.: University of California Pres, 1961. – P. 547–561.
188. Reza, Fazlollah M. An Introduction to Information Theory/ M. Reza Fazlollah. – New York : McGraw-Hill 1961 ; New York : Dover Publications, Inc., 1994. – P. 528. – Текст : непосредственный.
189. Saleh, J. H. Highlights from the Early (and pre-) History of Reliability Engineering / J. H. Saleh, K. Marais. – Текст : непосредственный // Reliability Engineering and System Safety. – 2006. – Vol. 91(2). – P. 249–256.
190. Schrödinger, E. What Is Life? & Mind and Matter / E. Schrödinger. – Текст : непосредственный // Cambridge University Press. – 1974. – P. 88.
191. Shannon, C. E. Communication Theory of Secrecy Systems / C. E. Shannon. – Текст : непосредственный // Bell System Tech. J. – 1949. – Vol. 28. – P. 656–715.
192. Shannon, C. E. Mathematical Theory of Communication / C. E. Shannon. – Текст : непосредственный // Bell System Tech. J. – 1948. – Vol. 27(1). – P. 379–423.
193. Ushakov, I. A. Solving of optimal redundancy problem by means of a generalized generating function / I. A. Ushakov. – Текст : непосредственный // Journal of Information Processing and Cybernetics archive. – 1988. – Vol. 24. – P. 219–222.

**Приложение А. Акт об использовании результатов
диссертационного исследования**



ФИЛИАЛ ПАО «МРСК СИБИРИ» - ХАКАСЭНЕРГО
Россия, 655000, г. Абакан, ул. Пушкина, д. 74
ОГРН 1052460054327 ИНН 2460069527
тел.: (3902) 24-00-01, факс: (390) 23-83-28
e-mail: info@ab.rosseti-sib.ru, сайт: www.rosseti-sib.ru

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Карандеева Дениса Юрьевича

Настоящий акт свидетельствует о том, что материалы диссертационной работы Карандеева Д.Ю., в частности, изложенные положения, разработанный алгоритм расчета структурной надежности через меру неопределенности информации, метод структурной оптимизации распределительной сети и результаты исследования были внедрены в деятельность филиала ПАО "МРСК Сибири" - "ХАКАСЭНЕРГО" в отделе проектирования департамента инвестиций и капитального строительства и в настоящее время используются в учетно-аналитической работе.

Разработанный в диссертационной работе метод структурной оптимизации позволяет повысить качество экспертного выбора оптимальных структур распределительных сетей на этапе проектирования путем использования разработанного метода в качестве системы поддержки принятия решения с учетом снятия неопределенности информации о содержании структуры сети. В результате применения данного метода на практике удастся среди перечня всевозможных вариаций структур отбирать самые экономически выгодные структуры распределительных сетей среди структур, отвечающих требуемому уровню надежности электроснабжения каждого потребителя.

Начальник отдела проектирования
департамента инвестиций и капитального
строительства филиала ПАО «МРСК
Сибири» - ХАКАСЭНЕРГО



Коровников Д.А. /

«25» мая 2020 г.

Приложение Б. Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020610366

Программа для поиска оптимальной структуры
распределительной сети на этапах проектирования

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Хакасский
государственный университет им. Н.Ф. Катанова» (RU)*

Автор: *Карандеев Денис Юрьевич (RU)*



Заявка № 2019667014

Дата поступления 19 декабря 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 13 января 2020 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев