

На правах рукописи



Карандеев Денис Юрьевич

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

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Абакан – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Хакасский государственный университет имени Н.Ф. Катанова», г. Абакан.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Дулесов Александр Сергеевич

Официальные
оппоненты: **Соколова Элеонора Станиславовна**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
профессор кафедры информатики и систем
управления

Лосев Василий Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
университет науки и технологий имени
академика М.Ф. Решетнева»,
заместитель первого проректора – начальник
управления программы развития

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский федеральный
университет»

Защита состоится «28» января 2022 года в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 24.2.403.01, созданного на базе ФГБОУ ВО
«Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика
М.Ф. Решетнева» по адресу: 660037 г. Красноярск, проспект имени газеты
Красноярский рабочий, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф.
Решетнева» и на сайте <https://www.sibsau.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Панфилов Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 надежность, связанная с необходимостью сохранять в установленных пределах значения параметров, характеризующих способность выполнять функции в условиях эксплуатации и технического обслуживания. Выполнение задачи обеспечения высокого уровня надежности 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 надежности, 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 расчета показателей структурной надежности. Среди них следует выделить аналитические методы, исследующие случайные события и случайные процессы, протекающие в сети и влияющие на изменчивость её структуры.

Системный анализ надежности структуры распределительной сети востребован при рассмотрении взаимодействия и взаимного влияния элементов. При известной схеме соединения элементов и параметрах надежности 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, применимая 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 следует считать применение такой области знаний, как 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, М. А. Басин, И. В. Прангишвили, А. М. Хазен, А. В. Мурыгин, Р. Л. Стратонович, В. Гагин, В. Widrow, K. Parthasarathy, B. Hogg, D. Nguyen, Q. Wu, G. Irwin и другие. Вопросами развития и применимости теории надежности распределительных сетей 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**:

- аналитический обзор существующих методов и моделей поиска наиболее эффективной архитектуры системы, соответствующей требованиям надежности (техничко-экономической целесообразности);
- разработка и апробация методики расчета, позволяющей выполнять оценку состояния и выбор структуры высоконадежной распределительной сети;
- 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, позволяющая 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 от методов анализа характеристик основных событий, позволяет использовать меру неопределенности информации для выявления неблагоприятных событий всех связей структуры;

- процедура расчета оптимального количества однотипных резервных элементов, которая, 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 задач 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 отдела 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.

2. Методика описания математических выражений расчета вероятностей и энтропии, применение которой связано с задачами оценки состояния и выбора эффективных структур распределительной сети.

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.

4. Вычислительные процедуры, в основу которых положена разработанная методика:

- 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: Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH и Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering (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 (IPDME) (г. Санкт-Петербург, 2017 г.); International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE), (г. Севастополь 2017–2018 гг.). Принято участие в Международных конференциях: «Перспектив Свободный» (г. Красноярск, 2017–2018 гг.), «На пути к информационному обществу» (г. Москва, 2017 г.), «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук» (г. Тольятти, 2018–2020 гг.). «Инженерное и технологическое образование: проблемы и решения» (г. Абакан, 2015–2019 гг.). «Интеллектуальные энергосистемы» (г. Томск, 2016 г.). За заслуги в научной деятельности в разные годы соискателю были присуждены стипендии Президента РФ, Правительства РФ, а также премия Правительства Республики Хакасия «Молодой исследователь». Кроме этого, получено более 10 дипломов I и II степеней в научных конкурсах различного уровня.

Публикации. По теме научного исследования было опубликовано 28 научных статей. Из них 6 – в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий 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 194 наименований и приложений. Текст работы изложен на 189 страницах, включая 18 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дана характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы, представлены: описание текущего состояния проблемы; основная цель и вытекающие из неё конкретные задачи; научная новизна; теоретическая и практическая значимость и результаты работы.

В первой главе рассматривается проблематика задачи построения распределительных сетей, относящихся к сложным техническим системам. При этом делается акцент на присутствии и необходимом учете 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.

Построение высоконадежной распределительной сети рассматривалось с позиции структурной надежности, когда задана структура сети и известны значения показателей надежности всех входящих в неё элементов. 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, а потому должны быть адаптированы к новым требованиям анализа надежности сложных объектов, например, таких как системы электроснабжения. Поскольку процессы в рассматриваемых сетях имеют случайную природу и описываются с точки зрения теории вероятностей, существует множество методов, исследующих случайные события. Но повышение требований к обеспечению высокого уровня надежности сетей указывает на необходимость разработки методов измерения неопределенности информации, присущей рассматриваемой системе. Их разработка и применение позволят снять неопределенность при принятии решений при проектировании и эксплуатации распределительных сетей.

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. Предварительный расчет вероятности и последующее вычисление энтропии с точки зрения разработки методики применимы в следующих случаях:

1. Процесс поиска наиболее вероятного макросостояния размещения элементов в структуре стохастической коммуникационной системы.

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:

$$\langle c, x \rangle \rightarrow \min ; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot \prod_j p_{ij} x_{ij} \cdot H(p_{ij}) \leq H_i^0 ; \quad (2)$$

$$\sum_j p_j = 1, \quad (3)$$

где c – стоимость элемента, выраженная в валюте; $H(p_{ij})$ 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; n и m – соответственно количество элементов и выделенных частей системы.

С позиции выбора эффективных структур при участии методов расчета вероятности и энтропии, наиболее перспективной является задача (1)–(3). Её выбор обусловлен возможностями построения системы ограничений (2), построенной на принципах теорий вероятности и информации.

Определение величины энтропии потребовало предварительной подготовки и обработки статистики для построения ансамбля данных о состояниях элементов сети при её эксплуатации. 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. Иными словами, 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.

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.

В конце первой главы представлена формальная постановка задачи исследования, содержательная сторона которого включает в себя вопросы:

- анализа структурного содержания и параметров надежности распределительной сети;
- обоснования применения методов определения энтропии рассматриваемых состояний элементов;
- вычисления энтропии для различных комбинаций состояний группы элементов;
- разработки методики выбора эффективной структуры сети;

– апробирования методики на тестовых примерах и реальных задачах.

Во второй главе предложена методика расчетов энтропии и представлена её апробация в сопоставлении с методом вычисления вероятностных характеристик задачи построения эффективной структуры распределительной сети.

В основу созданной методики положены, прежде всего, подходы Р. Хартли, К. 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 H послужили: формула Шеннона – $H = -\sum_i p_i \log p_i$; формула Хартли; модель Хинчина,

отражающая роль энтропии в реализации задач передачи информации – $H(AB) = -\sum_i \sum_j p_{ij} \log p_{ij}$, где p_{ij} – вероятность появления событий i и j в

ансамблях конечных состояний A и B . Формула Хинчина играет ключевую роль в задачах выбора из множества альтернатив, так как описывает полную систему состояний элементов сети (без учета направлений потоковых процессов).

Между теориями информации и вероятностей, о чем свидетельствовали К. Шеннон и А. Я. Хинчин, существует связь, обусловленная наличием измерения состояний и событий. Поэтому с точки зрения анализа структурной надежности разграничение состояний на работоспособное и неработоспособное с целью расчета энтропии можно считать обоснованным. Тогда вычисление количества энтропии системы в случае независимости событий определяется по формуле:

$$H_{\Sigma} = -\left(\sum_{i=1}^{N_1} p_i \log_2 p_i + \sum_{j=1}^{N_0} q_j \log_2 q_j\right), \text{ при условии } \sum_{i=1}^{N_1} p_i + \sum_{j=1}^{N_0} q_j = 1, \quad (4)$$

где p_i , q_j – вероятности событий, приводящие элементы сети в работоспособное i

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

N_0 – число элементов сети; n_i – число элементов, находящихся в неработоспособном состоянии на интервале времени Δt ; t – время, для которого определяется вероятность; $N(t)$ – число элементов, исправно работающих на интервале $[0; t]$.

Выражение (4) формализует возможности в получении конечного результата измерения неопределенности информации и её последующем снятии. Одним из подходов к снятию неопределенности является выявление слабых звеньев сети.

В процессе разработки и последующем применении методики, 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 применимы классический подход Шеннона и модель Хинчина; 7) выражение (4) является основополагающим; 8) рассматриваются только закрытые системы; 9) энтропия всех пересекающихся состояний элементов структуры равна сумме энтропий её независимых элементов.

Согласно данным условиям выражение (4) преобразовано к следующему обобщенному виду:

$$H_{\Sigma} = - \sum_{i=1}^N [H(p_i) + H(q_i)] = - \sum_{i=1}^N (p_i \log_2 p_i + q_i \log_2 q_i), \quad (5)$$

где N – число элементов в структуре системы; p_i и q_i – вероятности несовместных событий элемента i ($p_i + q_i = 1$); $H(p_i)$ и $H(q_i)$ – энтропии несовместных состояний элемента i . Выражение (5) (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. Строится структура сети и на основе показателей формируется статистический ансамбль с вероятностями работоспособного и неработоспособного состояний элементов.

2. Выделяются источник k и потребитель l , строится связь $k-l$, состоящая из множества элементов. Относительно данной связи, согласно методу минимальных путей и сечений, строится m_n путей или m_c сечений.

Далее представлены математические выражения отдельно для сформированных путей и сечений.

3. Эквивалент вероятности пути и сечения:

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

$$P_j = \prod_{k=1}^{n_n} p_k; \quad (6)$$

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

$$Q_j = \prod_{k=1}^{n_c} q_k, \quad (7)$$

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:

$$Q_j = 1 - P_j; \quad (8)$$

$$P_j = 1 - Q_j. \quad (9)$$

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 :

$$H(P_j) = \sum_{i=1}^{n_n} [(\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n_n} p_k) H(p_i)]; \quad (10)$$

– то же для неработоспособного состояния:

$$H(Q_j) = \sum_{k=1}^{n_c} [H(p_k) + H(q_k)] - H(P_j); \quad (11)$$

– неработоспособного состояния элементов сечения j с порядковым номером элементов i и вероятностью k :

$$H(Q_j) = \sum_{i=1}^{n_c} [(\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n_c} q_k) H(q_i)]; \quad (12)$$

– то же работоспособного состояния:

$$H(P_j) = \sum_{k=1}^{n_c} [H(p_k) + H(q_k)] - H(Q_j); \quad (13)$$

6. Энтропия совокупности всех рассматриваемых путей:
– работоспособного состояния m_n путей:

$$H(P) = \sum_{j=1}^{m_n} [H(P_j) + (1 - \prod_{j=1}^{m_n} Q_j) H(Q_j)]; \quad (14)$$

– то же неработоспособного состояния:

$$H(Q) = \sum_{i=1}^N [H(p_i) + H(q_i)] - H(P) = H_\Sigma - H(P); \quad (15)$$

7. Энтропия совокупности всех рассматриваемых сечений:
– неработоспособного состояния m_c сечений:

$$H(Q) = \sum_{j=1}^{m_c} [H(Q_j) + (1 - \prod_{j=1}^{m_c} P_k) H(P_j)]; \quad (16)$$

– то же работоспособного состояния:

$$H(P) = H_\Sigma - H(Q). \quad (17)$$

Данная методика (6)–(17) 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 (1)–(3) (левая часть выражения (2)).

Методика расчета энтропии не исключает дальнейшей модернизации, разработки новых алгоритмов решения задач оценки состояния и построения структур распределительных сетей различного назначения.

Посредством перебора всех пересекающихся состояний элементов структуры малой размерности подтверждена достоверность выполненных расчетов энтропии по разработанной методике. Кроме этого, обоснованность применения методики в задаче (1)–(3) выбора эффективных структур подтверждена на тестовой структуре вида «мостик». Для этой цели предложено решение оптимизации структуры распределительной сети с применением меры вероятности:

$$\sum_{i=1} c_i x_i \rightarrow \min; \quad (18)$$

$$P(k, l) \geq P_l; \quad (19)$$

$$x_i \in [0; 1], \quad (20)$$

где l – номер потребителя энергии; k – номер источника питания; $P(k, l)$ – вероятность работоспособного состояния цепи элементов, по которой потребитель l снабжается энергией; P_l – значение вероятности в обеспечении бесперебойного снабжения потребителя l энергией, учитывающее максимально

возможное количество часов отсутствия энергоснабжения с учетом категории надежности потребителя l .

Реализация задачи (18)–(20) 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 k с потребителем l , тем самым отражая её структурную надежность.

Порядок решения 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:

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

- матрица инцидентности V возводится в квадрат на основе теорем о сложении и умножении вероятностей;

- полученная матрица V возводится в степень g ;

- возведение в степень матрицы прекращается тогда, когда данное возведение перестанет менять свой состав. При этом вероятность p_{kl} , присущая пути π от элемента k к l , определяется вероятностями элементов $p_i \in \pi$ и описывается обобщенным выражением:

$$P(k, l) = \sum_{i \in \pi} P(A_i) - \sum_{(i \leq f) \in \pi} P(A_i \cap A_f) + \sum_{(i \leq f \leq h) \in \pi} P(A_i \cap A_f \cap A_h) - \dots + (-1)^{w-1} P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_w), \quad (21)$$

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

В итоге матрица позволяет получить левые части системы (19), как функции вероятности путей графа.

4. Поиск решения задачи осуществлялся методом ветвей и границ.

Апробация задачи (18)–(20) осуществлялась на тестовом примере. Порядок вычислений и получение конечного результата имеет свои ограничения: для сложных и многоэлементных структур невозможно получить адекватные

условиям функции матрицы инцидентности V ; наличие громоздких нелинейных левых частей системы (19); 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. Таким образом, применение данного порядка вычислений (в противовес разработанной методике) уместно только при наличии малого числа элементов в структуре из-за проблемы «проклятия» размерности.

В третьей главе на основе впервые созданной методики 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.

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: ветви – элементы сети (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 (ветвей): $q_i = 1 - p_i$ и рассчитывается 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. Строится целевая функция минимума затрат линейного вида:

$$\sum_{i=1} c_i x_i \rightarrow \min, \quad (22)$$

где c_i – стоимость затрат i -го 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: $p_l^0 = \frac{M_{pl}}{T}$;

$q_l^0 = \frac{M_{ql}}{T}$. Полученные вероятности позволяют вычислить граничные значения энтропии работоспособного и неработоспособного состояний вершин: $H^0(P_l) = -p_l^0 \log_2 p_l^0$; $H^0(Q_l) = -q_l^0 \log_2 q_l^0$.

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. Для всех рассматриваемых участков графа строятся левые части ограничений и правые части граничного значения энтропии вершины графа.

Имея ограничения, согласно п. 6, в процессе решения задачи возможны следующие условия: 1) если $H(P_{0l}) \leq H^0(P_{0l})$ – условия обеспечения требуемого уровня надежности участка выполняются; 2) когда $H(P_{0l}) \geq H^0(P_{0l})$ – условия не выполняются. Последнее условие свидетельствует о необходимости принятия мер, направленных на повышение уровня надежности, например, замена элемента на более надежный или обеспечение резервирования ненадежных элементов участков сети.

Представленная вычислительная процедура является результатом построения задачи выбора эффективной структуры с учетом резервирования однотипных элементов между собой. В данной задаче целевая функция имеет вид (22), а ограничения:

$$\left\{ \begin{array}{l} H(P_{01}) \leq H^0(P_{01}); \\ H(P_{02}) \leq H^0(P_{02}); \\ \dots\dots\dots \\ H(P_{0l}) \leq H^0(P_{0l}); \\ \dots\dots\dots \\ H(P_{0L}) \leq H^0(P_{0L}); \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{n_1} x_{li} q_{li}^{x_{li}} \cdot (-\log_2 q_{li}) \leq H^0(Q_{01}); \\ \sum_{i=1}^{n_2} x_{2i} q_{2i}^{x_{2i}} \cdot (-\log_2 q_{2i}) \leq H^0(Q_{02}); \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^{n_l} x_{li} q_{li}^{x_{li}} \cdot (-\log_2 q_{li}) \leq H^0(Q_{0l}); \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^{n_L} x_{Li} q_{Li}^{x_{Li}} \cdot (-\log_2 q_{Li}) \leq H^0(Q_{0L}), \end{array} \right. \quad (23)$$

где x_{li} – количество *i*-х однотипных резервирующих друг друга элементов на участке 0-*l*, где 0 – обозначение источника питания; n_l – количество элементов, принадлежащих участку 0-*l*; $H^0(Q_{0l}) = -q_l^0 \log_2 q_l^0$ – граничная величина энтропии неработоспособного состояния 0-*l* (при несоблюдении которой нарушается

условие достижения требуемого числа резервных элементов); q_i^0 – вероятность отказа (вычисленная через M_{qi}); q_{li} – вероятность неработоспособного состояния элемента i , принадлежащего участку 0- l . Систему ограничений (23), 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.

Данная вычислительная процедура задачи (22)–(23) применена для выбора распределительной сети. Решение (в виде нецелочисленных значений x_{li}) получено на основе метода неопределенных множителей Лагранжа. Поиск целочисленных значений достигается методом ветвей и границ, получившим применение в решении задачи (18)–(20).

Еще одна задача выбора, с использованием предложенной в работе методики, касалась построения замкнутой структуры сети. В качестве контрольного примера принята известная в теории надежности тестовая структура типа «мостик» замкнутого вида без резервирования элементов. Поиск решения осуществляется согласно следующей вычислительной процедуре:

1. Строится замкнутый граф. Методом минимальных путей и сечений, согласно выделенной связи «источник–потребитель» 0- l , состоящей из множества путей и сечений, он преобразуется к последовательно-параллельному виду для путей и параллельно-последовательному – 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 – вероятности 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- l преобразованного графа.

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

$$H(P_{0l}) = \sum_{j=1}^N [H(P_j) + (1 - \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^N Q_k) H(Q_j)], \quad (24)$$

где N – количество путей последовательно-параллельного графа. В формуле (24) обозначение Q_k наделено 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 0-1 будет вычисляться по формуле:

$$H(Q_{0l}) = \sum_{j=1}^N [(\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^N Q_k) H(Q_j)] = H_{0l} - H(P_{0l}). \quad (25)$$

Данная вычислительная процедура справедлива при рассмотрении замкнутых систем, в которых суммарная величина энтропии связи 0-1 или всей сети определяется по выражению:

$$H_{0l} = H(Q_{0l}) + H(P_{0l}). \quad (26)$$

Выражения (24) и (25) 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.

Сопоставляя энтропию элемента H_i с энтропией сети H_Σ , через индекс H_i / H_Σ можно судить о роли каждого из элементов в обеспечении надежности.

В заключении подведены итоги диссертационного исследования, изложены его основные выводы и обобщающие результаты.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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 и построения расчетных процедур, применяемых в оценке состояния и выборе эффективных структур, не исключая при этом проблем снятия неопределенности информации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Карандеев, Д. Ю. Вычислительная процедура выбора структуры распределительной сети на основе моделей Клода Шеннона и А.Я. Хинчина // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – № 4. – С. 38-40.
2. Карандеев, Д. Ю. Оптимизация сетей технического назначения при заданных условиях соблюдения уровня структурной надежности / А. С. Дулесов, Д. Ю. Карандеев, Д. А. Калугин // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 2. – С. 47-51. DOI: 10.17513/snt.37407.
3. Карандеев, Д. Ю. Построение оптимальной структуры технической системы методом «ветвей и границ» с учетом критериев экономичности и надежности / А. С. Дулесов, Д. Ю. Карандеев // Надежность и безопасность энергетики. – 2016. – №2(33). – С.56-59.
4. Карандеев, Д. Ю. Определение количества информационной энтропии в структуре технической системы методом минимальных путей / А. С. Дулесов, Д. Ю. Карандеев, Н. Н. Кондрат // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 2(3). – С. 425-429.
5. Карандеев, Д. Ю. Показатель разграничения уровня надежности технической системы по качественному признаку: энтропийный подход / А. С. Дулесов, Н. В. Дулесова, Д. Ю. Карандеев // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 2(3). – С. 477-481.
6. Карандеев, Д. Ю. Определение количества информационной энтропии в структуре технической системы методом минимальных сечений / А. С. Дулесов, Д. Ю. Карандеев, Н. Н. Кондрат // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 3 (часть 3). – С. 472-476.

**Статьи в научных изданиях, индексируемых в международных
научнометрических базах Web of Science и Scopus**

7. 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, I. J. Karandeeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862. – P. 1-6. DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062026.

8. Karandeev, D. J. 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, T. G. Krasnova // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. – P. 1-7. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055030.

9. Karandeev, D. J. Determination of the amount of entropy of non-recoverable elements of the technical system / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, N. V. Dulesova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 450(7). – P. 1-6. DOI: 10.1088/1757-899X/450/7/072004.

10. Karandeev, D. J. Improving the operation quality of technical systems using information theory models / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, N. V. Dulesova // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 224. P. 1-7. DOI: 10.1051/mateconf/201822404006.

11. Karandeev, D. J. Optimal redundancy of radial distribution networks by criteria of reliability and information uncertainty / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, N. V. Dulesova // IEEE: 3rd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM-2017. – 2017. – P. 1-4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076467.

12. Karandeev, D. J. 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 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87(3). – P. 1-5. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032008.

13. Karandeev, D. J. The evaluation of the correlation between entropy and negentropy in the structure of a technical system / A. S. Dulesov, D. J. Karandeev, T. G. Krasnova // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 1-4. DOI: 10.1051/mateconf/201712903005.

**Статьи в российских изданиях, материалы международных, всероссийских
и региональных конференций**

14. Карандеев, Д. Ю. Представление показателей надежности оборудования инженерно-технических сетей через меру неопределенности информации /

Д. Ю. Карандеев, А. С. Дулесов, И. Ю. Карандеева // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 2. – С. 30-34. DOI: 10.17513/snt.37910.

15. Карандеев, Д. Ю. Подходы к решению задач анализа структурной надежности и поиска оптимальной структуры технической системы // Вестник ХГУ им. Н.Ф. Катанова. – 2019. – № 27. – С. 17-20.

16. Карандеев, Д. Ю. Анализ методов оптимизации для решения задачи построения оптимальных структур технических систем // 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.

17. Карандеев, Д. Ю. Учет количества информации в задачах построения оптимальных структур распределительных сетей с резервированием // Вестник ХГУ им. Н.Ф. Катанова. – 2017. – № 20. – С. 16-19.

18. Карандеев, Д. Ю. Анализ показателей эффективности в задачах построения структур технических систем // 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.

19. Карандеев, Д. Ю. Развитие концепции Smart Grid в области проектирования систем электроснабжения при поддержке теории информации // Интеллектуальные энергосистемы : материалы IV Международного молодежного форума, 10–14 октября 2016 г. – В трех частях. – Томск, – 2016. – № 2. – С. 277–280.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

20. 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. – Москва : Роспатент, 2020.