

На правах рукописи



Сердюкова Екатерина Владимировна

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕПЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО  
ХАБА И ПОТОКОВЫХ МЕТОДОВ**

Специальность 05.14.01 - Энергетические системы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель: член-корр. РАН, доктор технических наук, профессор **Воропай Николай Иванович**

Официальные оппоненты: **Ахметова Ирина Гареевна**  
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», кафедра Экономики и организации производства, заведующая кафедрой

**Суворов Алексей Александрович**  
кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Защита состоится: «21» апреля 2022 года в 09:00 ч на заседании диссертационного совета Д003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к.355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к.407 и на сайте ИСЭМ СО РАН <https://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2022-1/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д003.017.01,  
доктор технических наук, профессор



Клер Александр Матвеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Энергетика является важнейшей отраслью, охватывающей добычу энергоресурсов, производство, преобразование, транспортировку и использование энергии потребителями. Энергоснабжение потребителей обеспечивается различными видами энергоресурсов, которые мало взаимосвязаны между собой. В качестве объединяющей системы выступает топливно-энергетический комплекс (ТЭК) России. ТЭК включает в себя основные три подсистемы: топливоснабжающие системы; системы электро- и теплоснабжения; система ядерной энергетики. На этапе планирования развития ТЭК рассматриваются все отрасли энергетики, но вопросам комплексного использования различных видов энергии не уделяется должного внимания.

В последнее время развивается комплексный подход, рассматривающий совместное развитие и функционирование нескольких отдельных систем (электро- и теплоснабжения, электро-, тепло- и газоснабжения и др.) в составе интегрированных энергетических систем (ИЭС). При этом под интегрированной энергетической системой понимается система, включающая совокупность индивидуальных систем энергетики, взаимосвязанных посредством общих взаимозависимых режимов функционирования при производстве, потреблении и транспортировке соответствующих видов энергии, а также комплексном развитии этих систем.

В результате комплексного использования различных видов энергии повышается эффективность интегрированной энергетической системы.

Под влиянием интереса к интегрированным энергетическим системам возникло понятие энергетического хаба. Энергетический хаб представляет объект с несколькими входами и несколькими выходами по энергии, внутри которого происходит, преобразование, накопление различных видов энергии. Примером энергетического хаба может быть ТЭЦ на газе, входным видом энергии которой является газ, внутри он преобразуется в электроэнергию и тепло, которые являются выходными видами энергии.

Концепция энергетического хаба оказалась привлекательной ввиду его наглядности и простой интерпретации физических взаимосвязей составляющих интегрированной энергетической системы. Этот подход активно развивается наряду с традиционным математическим моделированием интегрированных энергетических систем. Однако существующие версии этого подхода имеют существенный недостаток, связанный с проблемами описания взаимосвязей между входами и выходами энергетического хаба. Поэтому требуется разработка альтернативного подхода к моделированию интегрированных энергетических систем, органично сочетающего элементы концепции энергетического хаба и другие необходимые средства анализа. При этом

представляется привлекательной технология имитационного моделирования как методологическая база для исследования проблем интегрированных энергетических систем. Учитывая сетевую структуру интегрированных энергетических систем, возникает необходимость использования соответствующих методов математического анализа, в качестве которых можно рассматривать потоковые методы.

**Объектом исследования** является интегрированная энергетическая система. **Предметом исследования** является технология имитационного моделирования интегрированной энергетической системы с применением концепции энергетического хаба и потоковых методов.

**Цель работы** – Разработать методические основы и методы имитационного моделирования интегрированных энергетических систем на основе концепции энергетического хаба и использования потоковых методов и продемонстрировать на примерах различных задач технологию имитационного моделирования этих систем.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было **решить следующие задачи:**

– Выполнить анализ состояния исследований интегрированных энергетических систем.

– Выполнить анализ существующих подходов, моделей и методов для решения различных задач развития и функционирования интегрированных энергетических систем.

– Разработать методические принципы имитационного моделирования и конструирования имитационной модели интегрированных энергетических систем с использованием концепции энергетического хаба и потоковых методов.

– Разработать алгоритмы моделирования электрических и трубопроводных сетей в составе интегрированных энергетических систем с использованием методов потоков в сетях.

– Разработать топологический метод оценки структурной надежности радиальных электрических и трубопроводных сетей.

– Разработать метод имитационной оптимизации для реализации преобразования электроэнергии в тепло в интегрированной энергетической системе с использованием дифференцированных в течение суток тарифов на электроэнергию.

– Рассмотреть на примере различных задач имитационного моделирования интегрированных энергетических систем особенности использования предложенных подходов.

#### **Достоверность полученных результатов работы**

Уровень достоверности научных положений и рекомендаций, изложенных в диссертационной работе, определяется их корректностью с точки зрения математических моделей и методов исследования систем энергоснабжения. Обоснованность обеспечивается расчетными методами,

применением фундаментальных физических принципов функционирования систем энергоснабжения, а также проверкой и сопоставлением расчетов с классическими расчетами на традиционных моделях.

**Научная новизна.** В результате выполнения работы получены следующие новые научные результаты:

– Разработаны методические принципы и технология имитационного моделирования и конструирования имитационной модели интегрированной энергетической системы в программной среде MATLAB/Simulink с использованием концепции энергетического хаба и потоковых методов.

– Разработаны алгоритмы моделирования электрических и трубопроводных сетей в составе интегрированной энергетической системы с использованием методов потоков в сетях.

– Разработан топологический метод оценки структурной надежности радиальных электрических и трубопроводных сетей.

– Разработан имитационный метод оптимизации процесса преобразования электроэнергии в тепло при использовании дифференцированных тарифов на электроэнергию в течение суток.

– На примерах различных задач имитационного моделирования интегрированных энергетических систем показана эффективность разработанного методического подхода, моделей, методов и алгоритмов.

**Практическая значимость и результаты внедрения.** Разработан программный инструмент для исследования интегрированных энергетических систем на основе имитационного моделирования, который может быть использован для дальнейших практических исследований.

Получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре электроснабжения и электротехники ИРНИТУ. Отдел главного энергетика ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» рассматривает возможности использования результатов при проектировании и развитии систем энергоснабжения Университета.

Выполненные в диссертационной работе исследования структурной надежности отдельного района города, а также преобразования электроэнергии в тепловую энергию при использовании льготных ночных тарифов на электроэнергию будут проанализированы при выработке решений по повышению надежности и эффективности работы системы энергоснабжения кампуса ИРНИТУ.

**Связь работы с научными программами, планами, темами, грантами.** Исследования выполнялись в рамках проектов:

1. Научный проект РФФИ № 19-38-90198 «Разработка имитационной модели интегрированной энергетической системы на базе концепции

энергетического хаба», (РФФИ).

2. Проект государственного задания Министерства науки и высшего образования России (проект № FZZS-2020-0039), (ИРННТУ).

3. Проект государственного задания (№ FWEU-2021-0002) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг., (ИСЭМ СО РАН).

**Методология и методы исследования.** В работе использовались методы моделирования и исследования систем энергоснабжения, математическое моделирование с использованием системы MATLAB, графическая среда для имитационного моделирования Simulink и ее подсистемы блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств SimPowerSystems, программное обеспечение Microsoft Office Excel, метод поиска путей и сечений, методы оценки структурной надежности систем энергоснабжения. Применялась концепция энергетических хабов.

**Основные положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся результаты работы, составляющие научную новизну и относящиеся к специальности 05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы» в части пунктов «Разработка научных основ исследования общих свойств, создания и принципов функционирования энергетических систем и комплексов, фундаментальные и прикладные системные исследования проблем развития энергетики городов, регионов и государства, топливно-энергетического комплекса страны» (п. 1 паспорта специальности), «Использование на этапе проектирования и в период эксплуатации методов математического моделирования с целью исследования и оптимизации структуры и параметров энергетических систем и комплексов и происходящих в системах энергетических процессов» (п. 3):

1. Методические принципы и технология имитационного моделирования и конструирования имитационной модели интегрированных энергетических систем в программной среде MATLAB/Simulink с использованием концепции энергетического хаба и потоковых методов.

2. Алгоритмы моделирования электрических и трубопроводных сетей на основе методов потоков в сетях.

3. Топологический метод для оценки структурной надежности радиальных сетей энергоснабжения.

4. Имитационный метод оптимизации (максимизации) предела преобразования электроэнергии в тепло при использовании дифференцированных тарифов на электроэнергию в течение суток.

5. Результаты исследований структурной надежности интегрированной энергетической системы, а также эффективности преобразования электрической энергии в тепловую энергию при использовании льготных ночных тарифов на электроэнергию.

**Апробация работы.** Основные теоретические положения и научные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-практических конференциях и семинарах:

Коллоквиум исследовательского комитета D2 CIGRE (Россия, Москва, 2017), Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (Самара, 2017, Казань, 2018, Иркутск, 2019), XII Международная молодежная научная конференция «Гинчуринские чтения» (Казань, 2017), Всероссийская научно-практическая конференция «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (Иркутск, 2017, 2018), XIII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия - 2018» (Иваново, 2018), Всероссийская молодежная конференция с международным участием «Системные исследования в энергетике» (Иркутск, 2018, 2019), Всероссийский форум научной молодёжи «Богатство России» (Москва, 2018, 2019), 2019 Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe) (Bucharest, 2019), 13th IEEE PES PowerTech (Milan, 2019), Заседания семинара «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Казань, 2020, Волжский, 2021), III Всероссийская научно-техническая конференция «Борисовские чтения» (Красноярск, 2021)

**Публикации.** По теме исследования опубликовано 25 печатных работ (включая сборники статей конференций), из них 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 5 – в изданиях, включенных в базы Scopus и Web of Science, 16 – включённых в российскую научную электронную библиотеку, 1 – глава в книге. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация содержит введение, 3 главы, заключение и приложения, изложенные на 154 страницах, и включает в себя 17 таблиц, 55 рисунков, список литературы из 100 наименований, расположенных в алфавитном порядке.

**Личный вклад.** Постановка задач и анализ результатов работы обсуждались с научным руководителем. Разработка и реализация методов и моделей выполнялись лично автором. В коллективных публикациях автору принадлежат результаты, которые непосредственно относятся к теме диссертации. Исследования по решению практических задач выполнялись лично автором.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** изложены актуальность темы работы, ее цель и задачи, отражена научная новизна, практическая значимость полученных результатов.

**Первая глава** посвящена анализу зарубежного и отечественного опыта развития и функционирования интегрированных энергетических систем.

Рассмотрены традиционные модели, а также особенности и условия их применения исследования интегрированных энергетических систем.

Первые исследования с использованием понятия энергетического хаба и интегрированных энергетических систем выполнили Andersson G., Bakken B.H., Geidl M., Favreperrod P., Klöckl B., Koepfel G. и др. Вопросы оптимизации и моделирования интегрированных энергетических систем рассматривались в работах Almassalkhi M., Becuti G., Duan Q., Hiskens I., Li Q., Li P., Sheng W., Li Z., Zhu C., Zhang X. и др. Исследования интегрированных интеллектуальных энергетических систем основываются на работах Воропая Н.И., Стенникова В.А., Барахтенко Е.А., Войтова О.Н., Husmann H.J., Tantau H.J., Gore B.J., Delpont W. и др. Вопросы моделирования и базовые положения энергетического хаба рассматривались в работах Герасимова Д.О., Сулова К.В., Alvarado F., Hu Y., Adapa R., Gil E.M., Quelhas A.M., McCalley J.D. и других.

Обоснованы необходимость и направления исследований диссертации, методы и принципы моделирования интегрированных систем энергоснабжения на основе концепции энергетического хаба с использованием потоковых методов.

**Во второй главе** представлены методические принципы построения имитационной модели интегрированной энергетической системы.

Концепция энергетического хаба является конструктивным подходом к имитационному моделированию комплексных интегрированных энергетических систем. Подход имитационного моделирования может быть использован в качестве базовой технологии для построения интегрированной модели энергосистемы с несколькими видами энергии. Предлагается использовать возможности программного обеспечения MATLAB/Simulink для разработки предлагаемой технологии.

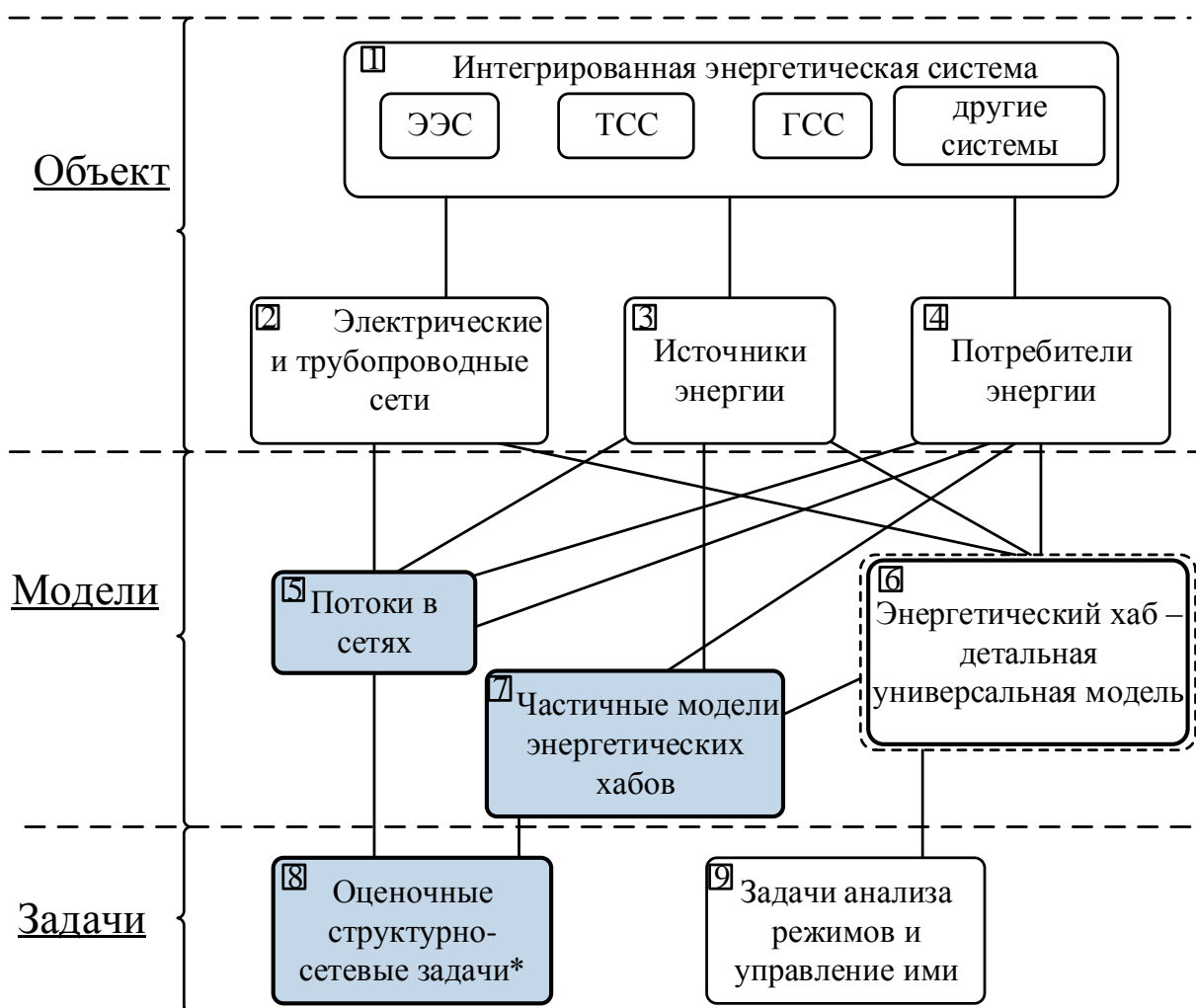
На рисунке 1 показана обобщенная схема методического подхода к имитационному моделированию интегрированных энергетических систем.

В позициях 1 – 4 представлен объект исследования – интегрированная энергетическая система, сформированная из индивидуальных систем – электроэнергетическая система (ЭЭС), теплоснабжающая система (ТСС), газоснабжающая система (ГСС) и возможно других. Каждая из индивидуальных систем включает источники энергии, потребителей энергии и электрические или/и трубопроводные сети (см. позиции 2 – 4).

Следующий уровень рассмотрения (позиции 5 – 7) представляет основные составляющие имитационной модели интегрированной энергетической системы при различной степени детализации рассмотрения элементов. При необходимости рассмотрения детальной универсальной модели используется технология моделирования энергетического хаба средствами программной среды MATLAB/Simulink (позиция 6) и представляющая детальные модели источников энергии, потребителей и



сетевых элементов. Соответствующая необходимая информация для конструирования модели энергетического хаба поступает в позицию 6 из позиций 2 – 4. При этом, для реализации, разработанной автором методологии, с учетом необходимых допущений на основании детальной универсальной модели энергетического хаба, получаются частичные упрощенные модели энергетических хабов отдельно для источников энергии и отдельно для потребителей. В случаях упрощенного моделирования интегрированной энергетической системы в позиции 7 формируются упрощенные модели энергетических хабов для источников и потребителей отдельно на базовом языке программной среды MATLAB независимо от универсальной модели энергетического хаба (см. связи 3 – 7 и 4 – 7).



\* Оптимизация преобразования электроэнергии в тепло

\* Оценка структурной надежности ИЭС

\* Оценка существования режима ИЭС

\* и др.

Рисунок 1 – Обобщенная схема методического подхода к имитационному моделированию интегрированных энергетических систем

В дополнение к изложенному упрощенному представлению источников и потребителей на базовом языке программной среды MATLAB реализуются модели электрической или/и трубопроводной сетей на уровне представления их элементов (электрических линий, участков трубопроводов) пропускными способностями. Это представление сетевых элементов (позиция 5) позволяет решать оценочные структурно-сетевые задачи с использованием методологии потоков в сетях, в частности методом путей и сечений, а также с помощью разработанного автором топологического метода анализа путей энергоснабжения (позиция 8).

Далее рассмотрен вопрос имитационного моделирования энергетического хаба интегрированной энергетической системы. Процесс моделирования средствами Simulink можно разделить на нескольких этапов. Первым из них является этап составления расчетной схемы сети. Под расчетной схемой понимается схема исследуемого участка сети с нанесенными на ней параметрами, которые должны быть учтены при моделировании. Вторым этапом является компоновка модели, которая заключается в выборе из библиотек Simulink необходимых блоков, их размещение в специальном окне и соединение между собой.

Представлен метод поиска путей и сечений. Алгоритм метода предполагает введение дополнительного узла суммарной нагрузки и введение дополнительных связей до этого узла. На этой основе составляется матрица путей, а затем используя правило логического сложения – матрица сечений и матрица пропускных способностей связей схемы. Далее можно выполнить оценку структурной надежности сети и другие задачи.

Для оценки достаточности пропускной способности от источника питания (ИП) до нагрузки (Н) необходимо проверить условие:

$$\forall Ck : k \in K \left| \sum_{i,j \in I} P_{ij}^k \geq P_H, \right. \quad (1)$$

где  $K$  – число сечений;  $k$  – номер сечения,  $Ck$  – сечение;  $i, j$  – номера узлов,  $P_{ij}$  – пропускная способность связи;  $P_H$  – суммарная нагрузка сети,  $I$  – число узлов.

Если условие выполняется, то сеть работоспособна.

Изложенные положения представляют основные составляющие разработанного методического подхода к построению имитационной модели интегрированной энергетической системы. Для подтверждения работоспособности имитационного подхода проведена его верификация. Верификация имитационной модели ИЭС рассмотрена для двух классов задач: 1) процедуре верификации подвергаются модели, в которых имитационные эксперименты выполняются на расчётных моделях (например, оценка структурной надежности ИЭС; оценка допустимости потокораспределения в ИЭС в нормальном режиме); 2) процедуре

верификации подвергаются модели, в которых имитационные эксперименты выполняются с использованием оптимизационной модели.

Первый случай реализован путем решения ряда задач оценки структурной надежности с использованием двух методов: метода путей и сечений при адаптации этого подхода, разработанного Ю.А. Фокиным, к рассматриваемому комплексу задач, топологического метода анализа путей энергоснабжения, разработанного автором диссертации.

Для верификации имитационного подхода применительно к случаю имитационных экспериментов с использованием оптимизационной модели как базовой, рассмотрена задача преобразования электроэнергии в тепло с использованием дифференцированных в течение суток тарифов на электроэнергию.

### ***Оценка структурной надежности ИЭС***

Оценка структурной надежности схемы по критерию  $n-I$  методом путей и сечений:

$$P_d^n = P_H - \left\{ \forall C_k^n : k^n \in K^n \left| \sum_{i,j \in I} P_{ij}^{kn} \right. \right\}, \quad n = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где  $P_d^n$  – дефицит мощности при отказе связи  $n$ ,  $K$  – число сечений,  $N$  – число связей,  $I$  – число узлов.

Суммарный показатель структурной надежности по критерию  $n-I$ :

$$P_d = \sum_{n=1}^N P_d^n. \quad (3)$$

Средняя частота отказов системы равна сумме частот отказов ее элементов:

$$\omega = \sum_{n=1}^N \omega_n \quad (4)$$

где  $\omega$  – частота устойчивых отказов,  $n$  – элементы системы.

Риск отказа связей системы рассчитывается по формуле:

$$R = \sum_{n=1}^N \omega_n \cdot \sum_{n=1}^N P_d^n \quad (5)$$

$R$  – риск отказа связей системы.

Топологический алгоритм анализа путей энергоснабжения для оценки надежности радиальной энергетической сети по критерию  $n-i$  заключается в определении топологии связей схемы для дальнейшего определения места, где образуется дефицит мощности в системе при отказе линии.

Необходимо учесть следующее:

1. Нумерация связей от источника питания к нагрузкам от 1 до  $n$ .
2. Если есть два и более повторяющихся номера в связи, то принять это место за разветвление схемы.
3. Производить анализ в сторону увеличения нумерации узлов.

Необходимо пронумеровать узлы от источника питания до нагрузки ( $n = \overline{1, N}$ ), где  $n$  – число элементов сети. Когда все узлы пронумерованы, необходимо составить топологию связей сети. Для этого необходимо взять ближайшие два номера узлов связи, где первый номер принять за  $i$ , второй за  $j$ . Проверить условие существования связи; если связь существует, проверить наличие нагрузки и зафиксировать ее. Далее определить, отключена ли данная линия. Если отключения нет, перебором выполняется поиск всех возможных связей при прибавлении в каждой последующей итерации  $i+1$  и  $j+1$ . Работа алгоритма считается законченной, когда  $i, j$  будут равны последнему элементу системы  $N$ . Если обнаруживается отключение линии, то тогда суммируются все зафиксированные нагрузки после этой связи. Также необходимо учесть, что есть два случая определения дефицитов нагрузки в радиальной схеме:

1. Если отключения линий определены до разветвления линии, то дефицит мощности определяется суммой нагрузки после разветвления.

2. Если отключения линий определены после разветвления линии, то тогда дефицит мощности определяется суммой нагрузки после каждого обрыва.

Топологический алгоритм анализа путей энергоснабжения определяет топологию сети и дефициты мощности сети в радиальной схеме и может быть альтернативным подходом определения мест дефицитов методом путей и сечений для радиальной схемы.

### **Оптимизация использования потенциала преобразования электроэнергии в тепло**

Формализуем задачу оптимизации следующим образом:

целевая функция:

$$\Delta P_{FS} \rightarrow \max, \quad (6)$$

при ограничениях:

$$\Delta P_{FS} \leq \Delta P_{FS \text{ lim}}, \quad (7)$$

$$P_{ij} \leq P_{ij \text{ lim}}, \quad (8)$$

$$P_{kheat} \leq P_{kheat \text{ lim}}, \quad (9)$$

$$\Delta P_{FS}^{l+1} = \Delta P_{FS}^l + h \frac{\Delta P_{FS}^l}{1 / \Delta P_{ij}}, \quad (10)$$

$$\Delta P_{ij} = P_{ij \text{ lim}} - P_{ij}, \quad (11)$$

где  $\Delta P_{FS}$  – дополнительная электрическая мощность для преобразования в тепловую;  $P_{ij \text{ lim}}$  – пропускная способность ветви  $ij$ ;  $P_{kheat \text{ lim}}$  – пересчитанный в электрическую мощность уровень тепла для потребителя  $k$ ;  $h$  – шаг оптимизации;  $l$  – номер итерации. Второй член в правой части (10)

аналогичен градиенту целевой функции.

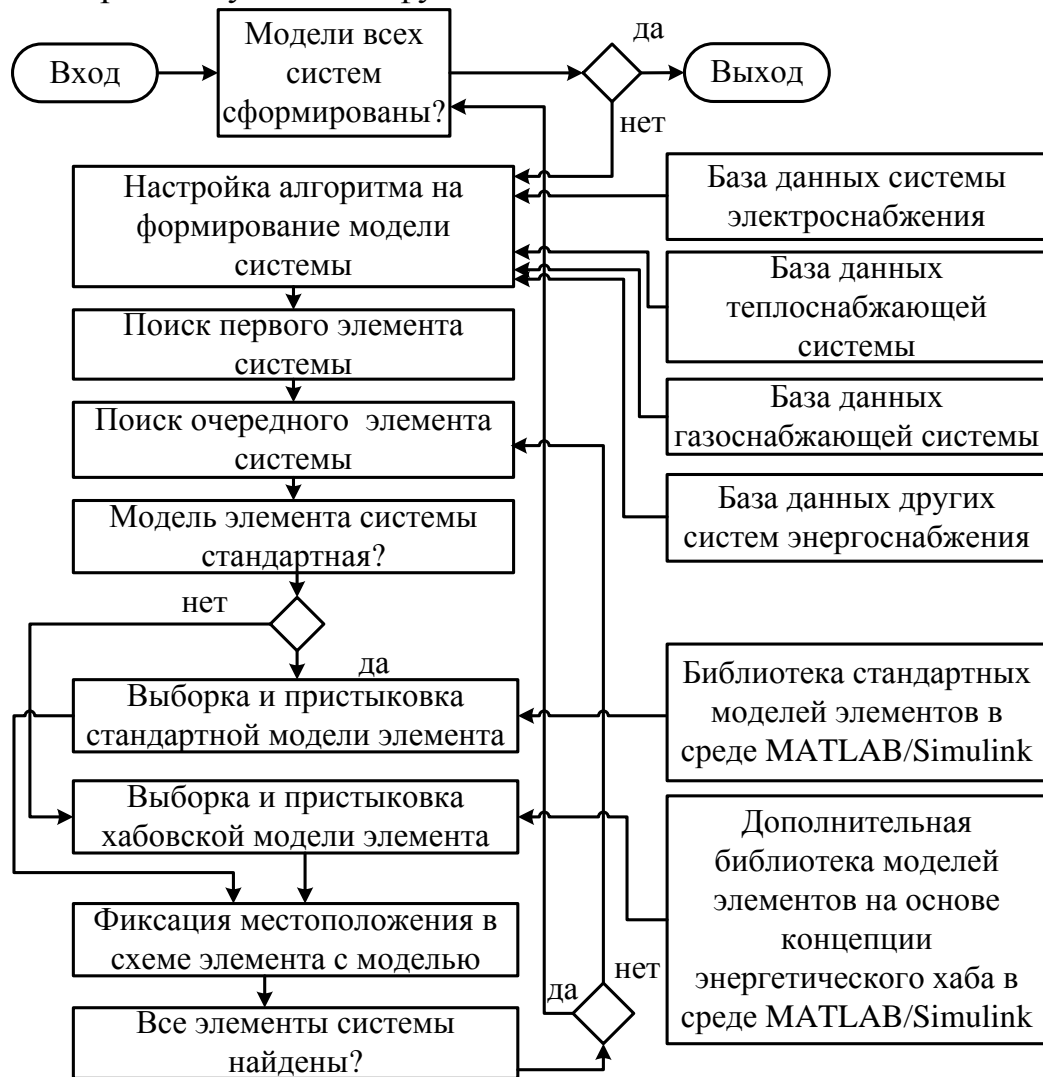


Рисунок 2 – Алгоритм конструирования имитационной модели в среде MATLAB/Simulink

Представлен разработанный алгоритм конструирования имитационной модели интегрированной энергетической системы. Система MATLAB имеет в своем составе объектно-ориентированный язык программирования, позволяющий автоматизировать создание сложных имитационных моделей энергетических систем по различным каналам энергоснабжения с учетом основных положений концепции энергетического хаба. Основные составляющие алгоритма конструирования имитационной модели представлены на рисунке 2.

В результате моделирования в среде MATLAB/Simulink можно построить модели различных систем энергоснабжения и с помощью блоков преобразования и накопления энергии применить концепцию энергетического хаба.

**В главе 3** рассмотрены некоторые задачи исследования интегрированной системы энергоснабжения с использованием имитационной модели для верификации имитационного подхода

применительно к отмеченным выше двум классам базовых имитационных задач: 1) имитация с использованием расчетной модели – два характерных случая оценки структурной надежности ИЭС; 2) имитация оценки потенциала преобразования электроэнергии в тепло.

Рассматривается система электроснабжения микрорайона, состоящая из 207 узлов (Рисунок 3). Из них 2-12 - общежития, 17- 18 – детские сады, 13-16 – жилые дома. На рисунке потребители обозначены большими черными квадратами. Малыми черными квадратами представлены подстанции 6/0,4 кВ. Соответственно, толстыми линиями показаны линии 6 кВ, тонкими – разводные 0,4 кВ по потребителям от подстанции 6/0,4 кВ. РП – распределительная подстанция, от которой запитывается микрорайон. При этом примем, что линии 0,4 кВ не имеют ограничений по пропускной способности. Годовые графики электропотребления общежитий и жилых домов принимаются одинаковыми.

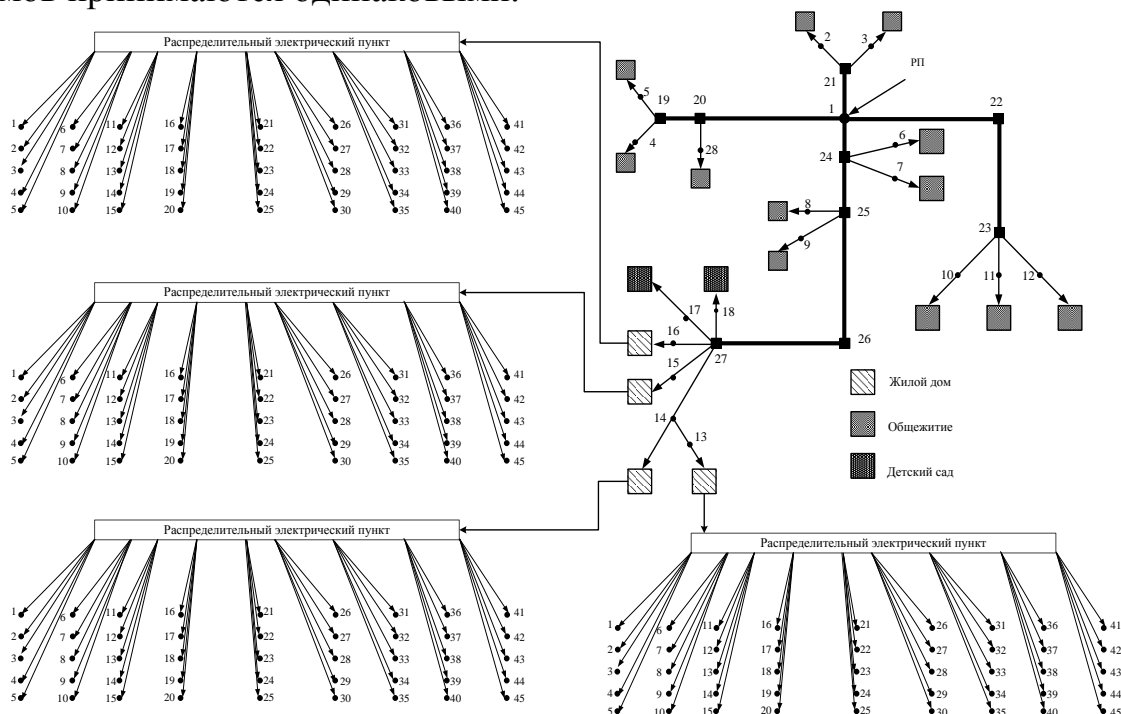


Рисунок 3 – Электрическая схема системы электроснабжения микрорайона

Максимальный вклад в определение дефицитов мощности дают линии 6 кВ, поэтому было принято решение на основе исходной электрической схемы сформировать расчетную схему при агрегированном представлении разводки электроэнергии по домам (Рисунок 4). Расчетная схема тепловой сети топологически аналогична, поскольку каждое общежитие является потребителем и электроэнергии, и тепла. Расчетные схемы электрической и тепловой сетей интегрированной системы энергоснабжения показаны на рисунке 5.

Черными линиями обозначена электрическая сеть, фиолетовыми – тепловая сеть. ТП – тепловой пункт. Квадрат обозначает потребителя. Нумерация узлов для электрической сети представлена без штрихов, для тепловой – со штрихами. В связи с небольшими расстояниями между

общезитиями вводятся допущения в представление электрической и тепловой сетей. Потерями при передаче тепла и электроэнергии на небольшое расстояние можно пренебречь. Температура теплоносителя по всей длине каждого участка тепловой сети принята одинаковой.

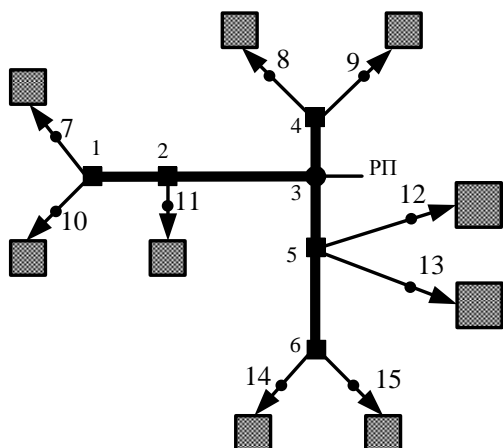


Рисунок 4 – Электрическая схема системы электроснабжения общежитий

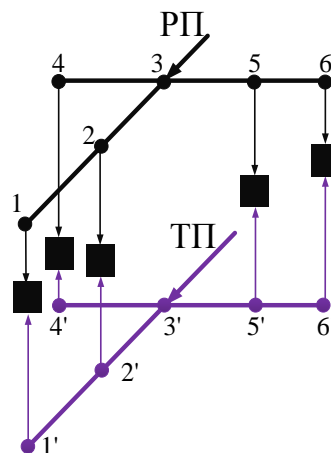


Рисунок 5 – Интегрированная система электро- и теплоснабжения блока из 9 общежитий

Нагрузки представляются моделями энергетического хаба, в которых входными переменными являются электроэнергия и централизованное тепло, выходными – электроэнергия и тепло. Модель энергетического хаба потребителей представлена на рисунке 6.

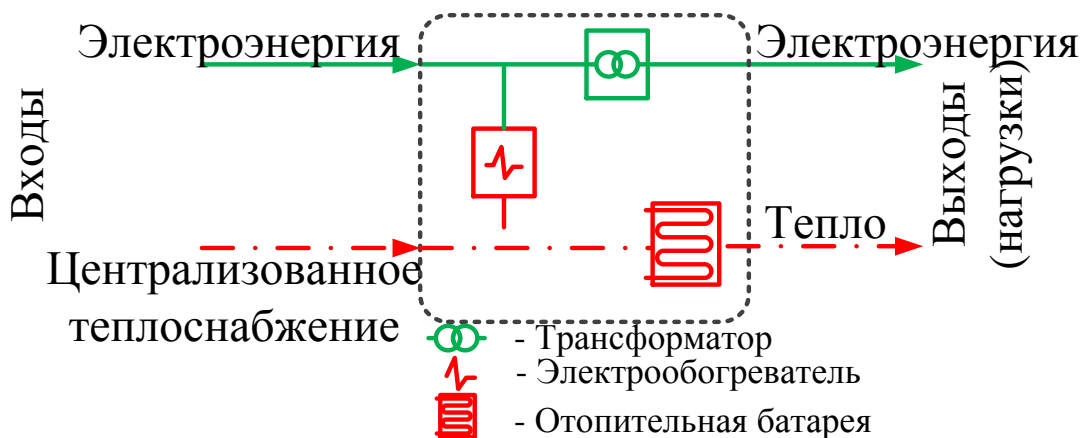


Рисунок 6 – Энергетический хаб потребителя

Произведем оценку существования режима для системы электроснабжения. На рисунке 7 представлена отдельно расчетная схема электрической сети микрорайона, преобразованная в соответствии с правилами метода путей и сечений и введением дополнительного узла суммарной нагрузки (узел 29) и связей с этим узлом. Линии к дополнительному узлу нагрузки на рисунке обозначены пунктиром (28-45). Их пропускная способность равна величине перенесенной в дополнительный узел нагрузки. Связи между узлами задаются их

пропускными способностями.

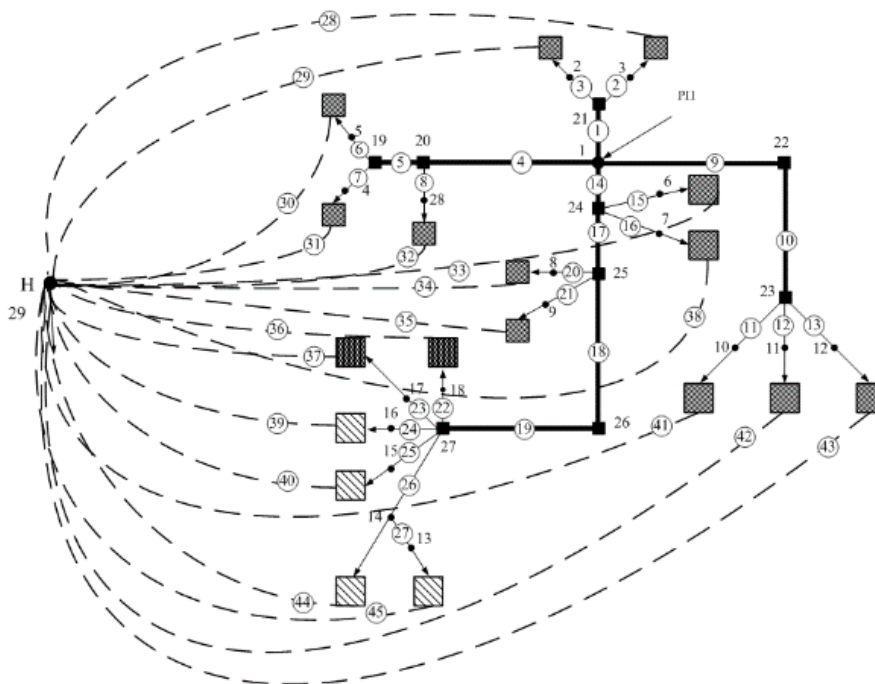


Рисунок 7 – Расчетная электрическая схема системы электроснабжения микрорайона

Составим матрицу путей согласно анализу схемы. Используя правило логического сложения, поэлементно складываются столбцы, содержащие 1. В результате получилось 442 750 сечений.

Согласно полученным данным составляем матрицу сечений согласно входящим в них связям. Далее на основе матрицы сечений составляется матрица пропускных способностей.

Для расчета пропускной способности от источника питания (РП) до нагрузки (Н) необходимо выполнить условие (1). Нагрузку общежитий принимаем равную 55 кВт, детских садов – 100 кВт, жилых домов – 15 кВт. Для пропускных способностей всех сечений выполняется условие (1). Далее произведем расчет дефицита мощностей по пропускным способностям сечений при безотказной работе связей схемы.

Анализ структурной надежности относительно узла нагрузки показал, потокораспределение в данном режиме находится в допустимой области. Далее необходимо произвести оценку дефицитов мощности по всем 442 750 сечениям.

Дефициты мощности при отказах связей по критерию  $n-1$  для схемы на Рисунке 7 представлены на Рисунке 8.

Самые загруженные связи – 14, 17, 18, 19. Выполнен расчет дефицитов мощностей при пропускных способностях этих связей, увеличенных соответственно путем использования средств увеличения пропускных способностей связей (например, FACTS) на: 1,1; 1,2; 1,3; 1,5. Диаграмма, показывающая наглядно как сократился дефицит мощности в системе, представлена на Рисунке 8. Как видно, дефициты мощности



остались только по связям 14, 17, 18, 19.

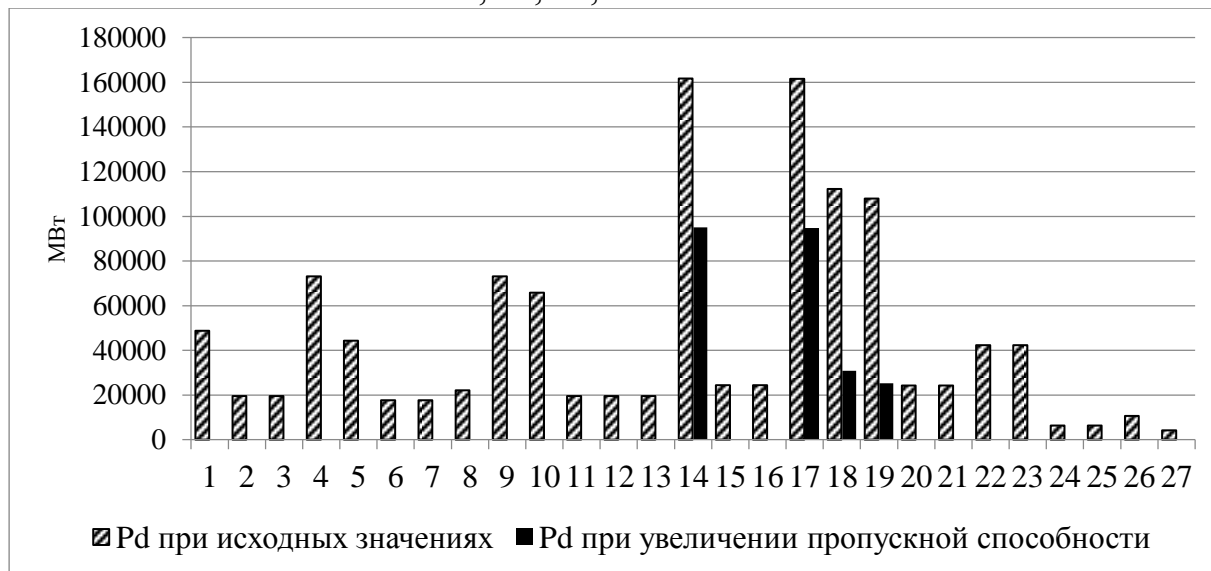


Рисунок 8 – Дефициты мощности из-за недостатка пропускных способностей сечений при оценке надежности (1-27 – связи)

Также был выполнен расчет дефицитов мощности жилого дома. К сети подключено 4 дома (узлы 14, 15, 16, 17).

Выполнена оценка рисков дефицитов мощности при отказе по связям.

Используя выражения (4), (5), посчитаем частоту устойчивых отказов по связям и риски отказов линий. Исходя из справочных данных и расстояния между узлами, был выполнен расчет устойчивых отказов связей сети. Расчет выполнялся для линий с номинальным напряжением 6 кВ и 0,4 кВ. Были получены показатели частоты отказов  $\omega$  на 1/100 км в год. Самый высокий показатель на линии с номинальным напряжением 6 кВ у связей: 1-22, 22-23. На номинальном напряжении 0,4 кВ у связи 15-27. Это связано с большим расстоянием между узлами. Далее используя формулу (5), выполнен расчет риска отказа связей системы.

В дальнейших исследованиях предлагается рассмотреть участок сети с высокой частотой отказов, который включает в себя 9 общежитий (Рисунок 4).

На рисунке 9 представлены пропускные способности при отказах связей в системе электроснабжения по критерию  $n-1$ . Оранжевым цветом обозначены дефициты мощности по пропускной способности сечений и, соответственно, дефициты мощности для питания нагрузки.

Дефициты мощности по сечениям можно существенно сократить, введя резервные линии, параллельные существующим линиям (2) и (4). В принципе, учитывая короткие расстояния между общежитиями, можно рассматривать резервные линии по всем связям. При этом резервные линии представляются нормально включенными, что будет давать

сокращение активных потерь.

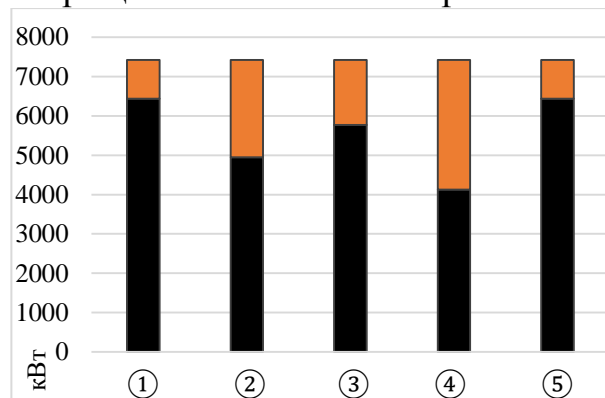


Рисунок 9 – Пропускные способности сечений при оценке надежности по критерию  $n-1$  в электрической сети

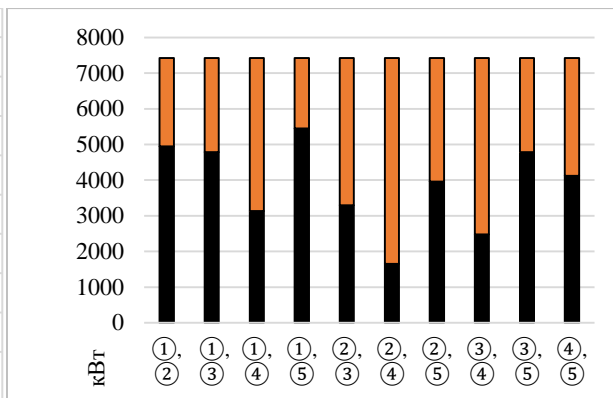


Рисунок 10 – Пропускные способности сечений по критерию  $n-2$  электрической схемы

Произведем оценку надежности интегрированной энергетической системы для схемы теплоснабжения общежитий, представленную на рисунке 7. Пути и сечения схемы будут аналогичными электрической схеме.

На рисунке 11 представлены пропускные способности по критерию  $n-1$  сечений системы теплоснабжения при оценке структурной надежности. Оранжевым цветом обозначены дефициты мощности по пропускной способности сечений и, соответственно, дефициты мощности для питания тепловой нагрузки. Красная линия показывает минимальное значение тепловой нагрузки в аварийном режиме.

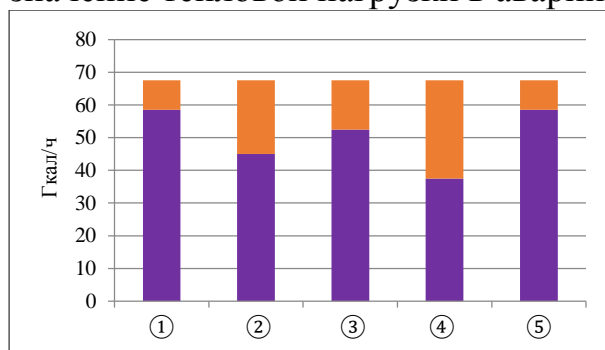


Рисунок 11 – Пропускные способности сечений при оценке надежности по критерию  $n-1$  в тепловой сети

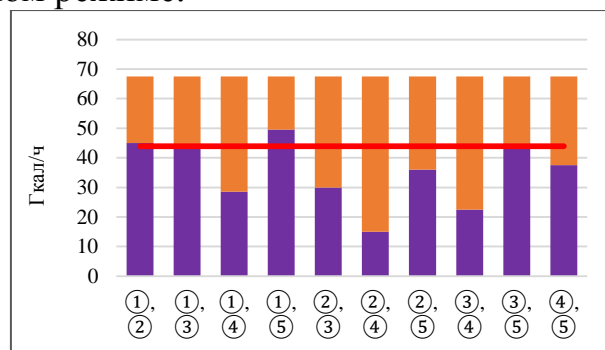


Рисунок 12 – Пропускные способности сечений при оценке структурной надежности по критерию  $n-2$  тепловой сети

Если в системе электроснабжения имеются средства регулирования режима (например, регулируемые источники реактивной мощности, трансформаторы с поперечным регулированием, гибкие электропередачи переменного тока – FACTS, распределенная генерация и др.), тогда ограничения потребителей в рассматриваемом состоянии системы можно уменьшить изменением потокораспределения и уровней напряжений с использованием средств регулирования режима.

Произведем оценку надежности интегрированной энергетической

системы на основе критерия  $n-2$ . На рисунке 10 представлены пропускные способности сечений схемы электроснабжения при оценке ее структурной надежности по критерию  $n-2$ . Оранжевым цветом обозначен дефицит мощности по пропускной способности сечений.

Аналогично произведем оценку надежности интегрированной энергетической системы на основе критерия  $n-2$  для тепловой схемы общежитий. На рисунке 12 представлены пропускные способности сечений при оценке структурной надежности схемы теплоснабжения по критерию  $n-2$ . Оранжевым цветом обозначен дефицит мощности по пропускной способности сечений.

Для сокращения затрат на оплату энергии рассматривается преобразование электроэнергии в тепловую в интегрированной энергетической системе.

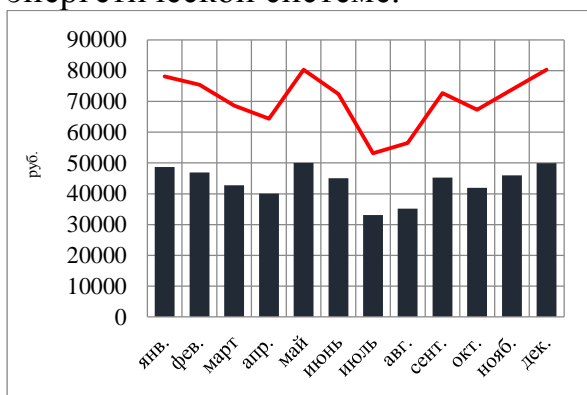


Рисунок 13 – Сравнение оплаты при учете преобразования электрической энергии в тепловую (100%)

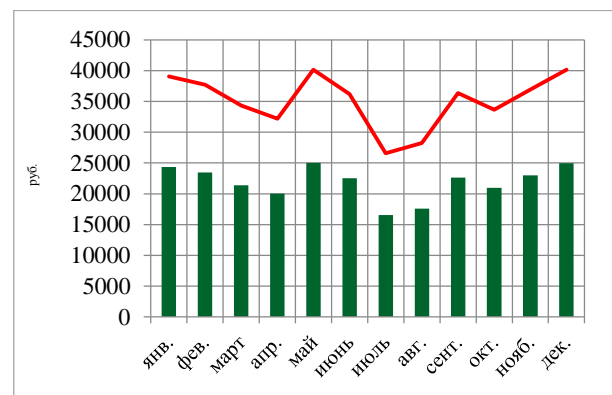


Рисунок 14 – Сравнение оплаты при учете преобразования электрической энергии в тепловую (50%)

Результаты расчетов преобразования электроэнергии в тепловую, представлены на рисунках 13 и 14.

Анализ пропускной способности и загрузки отдельных линий связи применительно к схеме на Рисунке 4 в случае преобразования электроэнергии в тепло в соответствии с предполагаемым условием показывает, что эта загрузка неодинакова (см. таблицу 2).

Выполним расчет оценки некоторого предельного объема преобразования электроэнергии в тепло в ночное время с учетом возможностей электрической сети, используя оптимизационную задачу (6)-(11). Эти возможности зависят от свободных пропускных способностей связей и допустимой нагрузки трансформаторов на питающей подстанции. Необходимые параметры электрической сети и расчет основной загрузки без учета активных потерь приведены в таблице 2. Потребляемая нагрузка в ночное время, найденная на предыдущем этапе (расход основной нагрузки) для каждого потребителя, составляет 55 кВт. Допустимая нагрузка трансформаторов на питающую подстанцию составляет 6000 кВт. Будем считать, что кабельные линии от трансформаторных подстанций

6/0,4 кВ для импорта электроэнергии в здание не имеют пределов передаточных возможностей.

Таблица 2

Пропускная способность связей электрической сети и потоки по СВЯЗЯМ

Номера связей	3 – 4	2 – 3	3 – 5	1 – 2	5 – 6
Пропускная способность, кВт	235	235	235	235	235
Загрузка связей, кВт	110	165	220	110	110

Имитационная процедура оптимизации использования потенциала преобразования электроэнергии в тепло с учетом дифференцированных тарифов на электроэнергию в течение суток будет выглядеть следующим образом:

1. От РП отходит 3 луча электрической схемы системы электроснабжения общежитий.

2. В качестве первого сценария имитационной процедуры примем луч 3–4, по которому можно реализовать наибольшую долю потенциала преобразования, поскольку этот луч содержит только одну линию, к которой подключено два общежития.

3. Результат оптимизации в соответствии с задачей (6)–(11) дает оптимальное значение преобразуемой электроэнергии в единицах мощности, которое ограничено фактическим значением тепловой нагрузки в ночное время. При этом пропускная способность луча 3–4 не использована полностью.

4. Исходя из аналогичных соображений в качестве второго имитационного сценария выбираем луч 2–3. Как видно из Рисунка 15, в результате оптимизации тепловая нагрузка общежития 11 полностью покрывается за счет преобразования электроэнергии в тепло, а оставшаяся пропускная способность связи 2–3 позволяет передать необходимую долю электроэнергии для преобразования в тепло, распределенную между общежитиями 7 и 10.

5. Аналогично формируется третий имитационный сценарий по лучу 3–5 и 5–6, для которого решается оптимизационная задача (6)–(11). При этом реализацию преобразования электроэнергии в тепло ограничивает малый запас пропускной способности (см. Рисунок 15).

На рисунке 15 представлен график сходимости процесса оптимизации. На оси абсцисс представлены номера связей по итерациям, на оси ординат – дополнительная в единицах мощности электроэнергия для преобразования в тепло.

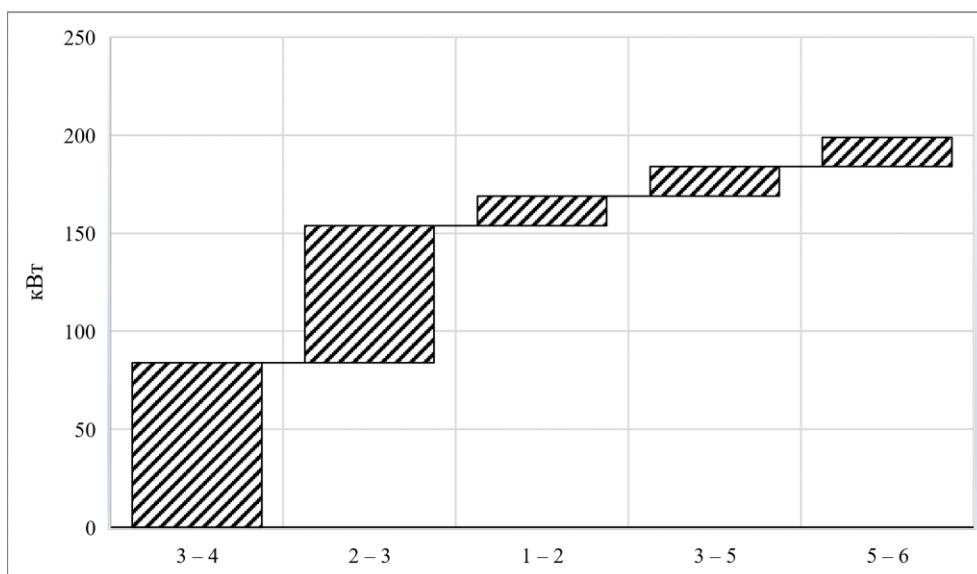


Рисунок 15 – Иллюстрация сходимости процесса оптимизации

Из расчета видно, что можно использовать потенциал электроэнергии для дополнительного преобразования в тепло.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы достигнута поставленная цель: разработаны методические основы и методы имитационного моделирования интегрированных энергетических систем на основе концепции энергетического хаба и потоковых методов, продемонстрирована на примерах различных задач технология имитационного моделирования этих систем с использованием программной среды MATLAB/Simulink.

Выполнены поставленные задачи исследований:

1. Выполнен анализ состояния исследований интегрированных энергетических систем и анализ существующих моделей для решения различных задач развития и функционирования интегрированных энергетических систем. Выполнено обоснование необходимости разработки метода моделирования интегрированных энергетических систем.

2. Разработаны методические принципы имитационного моделирования и разработан метод конструирования имитационной модели интегрированных энергетических систем с использованием концепции энергетического хаба и потоковых методов. Рассмотрены методические принципы имитационного моделирования энергетического хаба в среде MATLAB/Simulink и на основе этих принципов разработан алгоритм конструирования имитационной модели энергетического хаба. Основная идея предлагаемого подхода заключается в построении имитационной модели интегрированной энергосистемы с учетом моделей простых типовых элементов из библиотеки MATLAB/Simulink и сложных

моделей энергетического хаба из дополнительной библиотеки, а также потоковых методов в сетях. Алгоритм конструирования имитационной модели интегрированной энергетической системы показывает возможность построения имитационных моделей в MATLAB/Simulink.

3. Разработаны алгоритмы моделирования электрических и трубопроводных сетей в составе интегрированных энергетических систем с использованием методов потоков в сетях.

4. Разработан топологический метод оценки структурной надежности радиальной электрической сети. Разработанный топологический алгоритм анализа путей энергоснабжения применим для оценки структурной надежности радиальной энергетической сети по критерию  $n-i$  и повышает эффективность вычисления дефицитов мощности при отказах связей.

5. Разработан имитационный метод с использованием оптимизационной модели для реализации преобразования электроэнергии в тепло в интегрированной энергетической системе. Выполнено исследование задачи использования электроэнергии для ее преобразования в тепло в ночной период при льготных тарифах на электроэнергию, показывающий эффективность разработанной технологии.

6. Рассмотрены на примере различных задач имитационного моделирования интегрированных энергетических систем особенности использования предложенных подходов. Решена задача определения пропускных способностей сечений схемы и выполнена оценка структурной надежности на основе допустимости потокораспределения в каждой из схем индивидуальных систем энергоснабжения интегрированной энергетической системы с применением метода поиска путей и сечений. Выполнена оценка надежности радиальной электрической сети по критерию  $n-1$  методом анализа путей электроснабжения. Рассчитана частота отказов элементов сети. Произведена оценка надежности интегрированной энергетической системы на основе критерия  $n-1$  и  $n-2$  для схемы энергоснабжения с возможностью резервирования.

Полученные результаты экспериментальных исследований показали эффективность применяемых методов оценки надежности сети. Расчеты преобразования электроэнергии в тепло показали, что суммарные затраты на оплату тепла существенно сокращаются.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 05.14.01 «Энергетические системы и комплексы (технические науки)»:*

1. Воропай, Н.И. Исследование мультиэнергетического объекта методами имитационного моделирования / Н.И. Воропай, Е.В. Уколова, Д.О. Герасимов, К.В. Суслов, П. Ломбарди, П. Комарницкий //Вестник

Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – №12 (143).

2. Герасимов, Д.О. Принципы построения модели энергетического хаба / Д.О. Герасимов, К.В. Суслов, Е.В. Уколова //Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11. – №3 (43).

3. Сердюкова, Е.В. Принципы преобразования в интегрированной энергетической системе при применении концепции энергетического хаба / Е.В. Сердюкова //Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2021. - Т. 24, № 3. – С. 88-96.

***Публикации в изданиях Scopus и Web of Science:***

1. Gerasimov, D.O. Energy hub component models for multi-energy system / D.O. Gerasimov, E.V. Serdyukova, K.V. Suslov, N.S. Buryanina, Y.F. Korolyuk //Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – vol. 1582. – № 1. – P.12033

2. Suslov, K. Development of the methodological basis of the simulation modelling of the multi-energy systems / K. Suslov, V. Piskunova, D. Gerasimov, E. Ukolova, A. Akhmetshin, P. Lombardi, P. Komarnicki //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – vol. 124. – P. 1049.

3. Voropai, N. A Study on Cost-Effectiveness of Energy Supply Based on the Energy Hub Concept / N. Voropai, E. Ukolova, D. Gerasimov, K. Suslov, P. Lombardi, P. Komarnicki //2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe). – IEEE, 2019. – pp. 1-4.

4. Voropai, N. Simulation approach to integrated energy systems study based on energy hub concept / N. Voropai, D. Gerasimov, E. Ukolova, K. Suslov, P. Lombardi, P. Komarnicki //2019 IEEE Power Tech, Milan, Italy. - IEEE, 2019. - P.5.

5. Voropai, N.I. Development of a simulation model of an integrated multi-energy system based on the energy hub concept / N.I. Voropai, D.O. Gerasimov, E.V. Serdyukova, K.V. Suslov //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. – vol. 216. – P. 10208.

***Публикации в остальных изданиях:***

1. Voropai, N. Simulation Modeling of Integrated Multi-Carrier Energy Systems / N. Voropai, E. Serdyukova, D. Gerasimov, K. Suslov // IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.99323. (August 12th 2021). Available from: <https://www.intechopen.com/online-first/77882>.

2. Воропай, Н.И. Разработка имитационной модели интегрированной мультиэнергетической системы с использованием концепции энергетического хаба / Н.И. Воропай, Д.О. Герасимов, Е.В. Сердюкова, К.В. Суслов //Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – 2020. – С. 46-54.

3. Герасимов, Д.О. Алгоритм обоснования экономической эффективности мультиэнергетической системы / Д.О. Герасимов,

- Е.В. Уколова, К.В. Суслов //Вести в электроэнергетике. - 2017. - № 5. - С. 38.
4. Герасимов, Д.О. Имитационное моделирование мульти-энергетических систем / Д.О. Герасимов, К.В. Суслов, Е.В. Уколова //Электроэнергетика глазами молодежи-2017. – 2017. – С. 147-150.
  5. Герасимов, Д.О. Развитие мульти-энергетических систем / Д.О. Герасимов, Е.В. Уколова, К.В. Суслов //Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2017. – С. 82-87.
  6. Герасимов, Д.О. Разработка функциональной схемы энергетического хаба / Д.О. Герасимов, К.В. Суслов, Е.В. Уколова //Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2018. – С. 71-73.
  7. Герасимов, Д.О. Техничко-экономическое обоснование применения преобразователей электрической энергии в тепловую / Д.О. Герасимов, К.В. Суслов, Е.В. Уколова //Электроэнергетика глазами молодежи-2018. – 2018. – С. 302-303.
  8. Герасимов, Д.О. Энергетический хаб как базовая концепция интегрированных энергетических систем / Д.О. Герасимов, К.В. Суслов, Е.В. Уколова //Электроэнергетика глазами молодежи-2018. – 2018. – С. 198-199.
  9. Сердюкова, Е.В. Исследование структурной надежности интегрированной системы электро- и теплоснабжения / Е.В. Сердюкова, Е.А. Барахтенко //Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 72, книга 2 – 2021. — С. 406-415.
  10. Сердюкова, Е.В. Имитационное моделирование интегрированных энергетических систем: основные положения и иллюстрационный пример / Е.В. Сердюкова //Борисовские чтения: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – 2021. - С.62-66
  11. Суслов, К.В. Показатели экономической целесообразности внедрения мульти-энергетических систем / К.В. Суслов, Д.О. Герасимов, Е.В. Уколова //Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2017. – Т. 1. – С. 158-159.
  12. Уколова, Е.В. Анализ эффективности преобразования и накопления энергии в интегрированных системах с учетом разных соотношений тарифов на электроэнергию и тепло / Е.В. Уколова //Электроэнергетика глазами молодежи-2019. – 2019. – С. 156-159.
  13. Уколова, Е.В. Интегрированные интеллектуальные системы / Е.В. Уколова, Д.О. Герасимов, В.В. Потапов //Энергия-2018. – 2018. – С. 49.
  14. Уколова, Е.В. Применение преобразователей и накопителей электрической энергии / Е.В. Уколова, Д.О. Герасимов, К.В. Суслов //Богатство России. – 2019. – С. 230-231.
  15. Уколова, Е.В. Разработка модели интегрированной энергетической системы на основе концепции хаба / Е.В. Уколова



//Системные исследования в энергетике. – 2018. – С. 34-38.

16. Уколова, Е.В. Распределенная мультигенерация / Е.В. Уколова, Д.О. Герасимов, К.В. Суслов //Богатство России. – 2018. – С. 317-319.

17. Уколова, Е.В. Экономическое обоснование, целесообразность и применение мультиэнергетических систем / Е.В. Уколова, К.В. Суслов, Д.О. Герасимов //Тинчуринские чтения. – 2017. – С. 106-108.

***Программы:***

1. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019614398, 04.04.2019. Программа для определения динамических характеристик мульти-энергетической системы //Герасимов Д.О., Суслов К.В., Уколова Е.В. / Заявка № 2019613116 от 26.03.2019.

2. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018611255, 26.01.2018. Программа для определения характеристик и оптимальных параметров функционирования мульти-энергетической системы //Герасимов Д.О., Суслов К.В., Уколова Е.В., Уколова Е.В. / Заявка № 2017662368 от 30.11.2017.

Подписано в печать 16.02.2022. Формат 60 x 90 / 16.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 2,0.  
Тираж 110 экз. Зак. 16к.  
Отпечатано в Издательстве  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83