

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
член-корреспондент РАН, доктор технических наук,
профессор Воропай Николай Иванович

Иркутск – 2021

Оглавление

Введение.....	4
1. Интегрированные энергетические системы: состояние исследований и постановка задач диссертации	12
1.1. Имитационное моделирование при исследовании сложных проблем и систем	12
1.2. Анализ концепции интегрированных энергетических систем.....	14
1.3. Анализ моделей для решения различных задач развития и функционирования интегрированных энергетических систем.....	21
1.3.1. Исходные положения.....	21
1.3.2. Понятие энергетического хаба	27
1.3.3. Традиционные модели.....	31
1.3.4. Моделирование энергетического хаба.....	37
1.4. Анализ выполненных исследований интегрированных энергетических систем	42
1.5. Обоснование постановки задач исследований.....	52
Выводы по первой главе.....	55
2. Технология имитационного моделирования интегрированных энергетических систем	57
2.1. Методические принципы построения имитационной модели интегрированной энергетической системы	57
2.2. Имитационное моделирование энергетического хаба интегрированной энергетической системы	62
2.3. Использование метода путей и сечений при исследовании сетевых проблем интегрированных энергетических систем	66
2.4. Топологический метод анализа путей энергоснабжения для оценки структурной надежности радиальной энергетической сети по критерию $n-i$	74
2.5. Оптимизация использования потенциала преобразования электроэнергии в тепло	76
2.6. Алгоритм конструирования имитационной модели интегрированной энергетической системы.....	78
2.7. Обоснование целесообразности использования имитационного подхода при решении задач интегрированных энергетических систем с помощью разработанных компьютерных средств	83

Выводы по второй главе	85
3. Некоторые задачи исследования интегрированной системы энергоснабжения с использованием имитационной модели.....	87
3.1. Объект исследований, исходные положения и допущения.....	87
3.2. Оценка надежности радиальной электрической сети по критерию $n-1$ методом анализа путей и сечений	91
3.2.1. Оценка дефицитов мощности	93
3.2.2. Оценка рисков дефицитов мощности	99
3.3. Оценка существования режима в интегрированной системе электро- и теплоснабжения	101
3.4. Исследование структурной надежности интегрированной системы электро- и теплоснабжения по критерию $n-1$	108
3.4.1. Оценка при отказах в системе электроснабжения с возможностью резервирования в этой системе	108
3.4.2. Оценка при отказах в системе теплоснабжения с возможностью резервирования в системе электроснабжения.....	109
3.5. Исследование структурной надежности интегрированной системы электро- и теплоснабжения по критерию $n-2$	112
3.6. Оценка возможностей преобразования электроэнергии в тепловую энергию в случае дифференцированных по зонам суток тарифов на электроэнергию	115
Выводы по третьей главе.....	123
Заключение	124
Список публикаций автора.....	126
Список использованных источников	130
Приложение А – Копии свидетельств на программный продукт	141
Приложение Б – Акт внедрения.....	143
Приложение В – Заключение ФГБУН ИСЭМ СО РАН	144
Приложение Г – Заключение Международного научного семинара	150

Введение

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.

Задачи исследования

В диссертационной работе ставятся следующие задачи исследований:

- 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.

Степень изученности проблемы

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., Beccuti 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., Delport W. и др. Вопросы моделирования и базовые положения энергетического хаба рассматривались в работах Герасимова Д.О., Суслова К.В., Alvarado F., Hu Y., Adapa R., Gil E.M., Quelhas A.M., McCalley J.D. и других.

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.

Основные положения, выносимые на защиту

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.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационное исследование соответствует паспорту научной специальности 05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы» по следующим пунктам:

п.1. «Разработка научных основ исследования общих свойств, создания и принципов функционирования энергетических систем и комплексов, фундаментальные и прикладные системные исследования проблем развития энергетики городов, регионов и государства, топливно-энергетического комплекса страны» (пп.1, 2, 3 новизны).

п.3. «Использование на этапе проектирования и в период эксплуатации методов математического моделирования с целью исследования и оптимизации структуры и параметров энергетических систем и комплексов и происходящих в системах энергетических процессов» (пп. 4, 5 новизны).

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 (свидетельства приведены в Приложении А).

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре электроснабжения и электротехники ИРНИТУ (акт внедрения приведен в Приложении Б). 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), (ИРНИТУ).

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.

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.

Главные теоретические концепции и экспериментальные результаты диссертации опубликованы в трудах. Список публикаций автора приведен в конце диссертации.

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

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.

Структура и объем диссертационной 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.

1. Интегрированные энергетические системы: состояние исследований и постановка задач диссертации

1.1. Имитационное моделирование при исследовании сложных проблем и систем

Имитационное моделирование является обширным и недостаточно четко определенным понятием. Данное определение имеет большое значение для лиц, отвечающих за проектирование и функционирование систем. Под имитационным моделированием понимается процесс конструирования модели реальной системы и постановки экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить (в рамках ограничений, накладываемых некоторым критерием или совокупностью критериев) различные стратегии, обеспечивающие функционирование или развитие данной системы [1, 18].

Процесс имитационного моделирования представляет процесс, включающий конструирование модели и применение полученной модели для аналитического изучения некоторой проблемы.

Имитационное моделирование как экспериментальная и прикладная методология, имеет цели:

- описать поведение системы;
- построить теории и гипотезы, которые могут объяснить наблюдаемое поведение;
- использовать полученные теории для предсказания поведения системы в будущем, т.е. тех ее реакций, которые могут быть вызваны изменениями в системе или изменениями способов ее функционирования.

Иначе говоря, методология имитационного моделирования отвечает на вопрос «Что будет, если...?»

Главным средством решения разнообразных задач развития и функционирования энергетических систем как сложных систем являются модели, а в качестве одной из базовых методологий анализа и синтеза энергетических систем служит имитационное моделирование.

При помощи процесса имитационного моделирования можно выполнить

ряд задач. Можно анализировать, корректировать проблему, выбирать и вносить изменения в основную модель, до получения полезных для практики результатов.

В обобщенном виде этапы имитационной методологии исследования систем и проблем можно представить следующими пунктами:

1. Формулировка проблемы
2. Формирование модели
3. Имитационные эксперименты с моделью
4. Решение проблемы

Иными словами, используя понятие «имитационное моделирование», имеется в виду имитационная методология исследования сложных систем или сложных проблем, связанных с этими системами. Феномен сложности определяет нетривиальность процесса конструирования модели, причем модель системы может быть необязательно аналитической или даже вообще математической, а например, физической и т.д. Необходимость постановки экспериментов на конструируемой модели системы (или проблемы) существенно расширяет понятие «имитационное моделирование» по сравнению с понятием «моделирование», хотя четкую грань между ними установить трудно и существуют мнения об идентичности данных понятий (в этом случае термин «моделирование» трактуется более широко).

Стоит отметить, что многие авторы употребляют термин «имитационное моделирование» в более узком смысле, чем тот, который определен выше. Этот смысл ограничивается задачами стохастического моделирования и использования метода Монте-Карло. Принимаемый нами более широкий смысл понятия «имитационное моделирование» охватывает, конечно, и эти модели. Иначе говоря, входы и выходы модели могут содержать или не содержать элемент случайности, подчиняющийся вероятностным законам.

Еще один аспект широкого понимания имитационного моделирования связан с возможностью имитационных экспериментов с использованием оптимизационной модели. Эта возможность появляется, если по объективным причинам не удастся в оптимизационной модели формализовать все заданные

неопределенные факторы, а логично их учесть в виде набора сценариев. В этом случае мы имеем дело с имитационными экспериментами с оптимизационной моделью в соответствии с идеологией имитационного моделирования.

На Рисунке 1 условно показана взаимосвязь этапов имитационного моделирования.

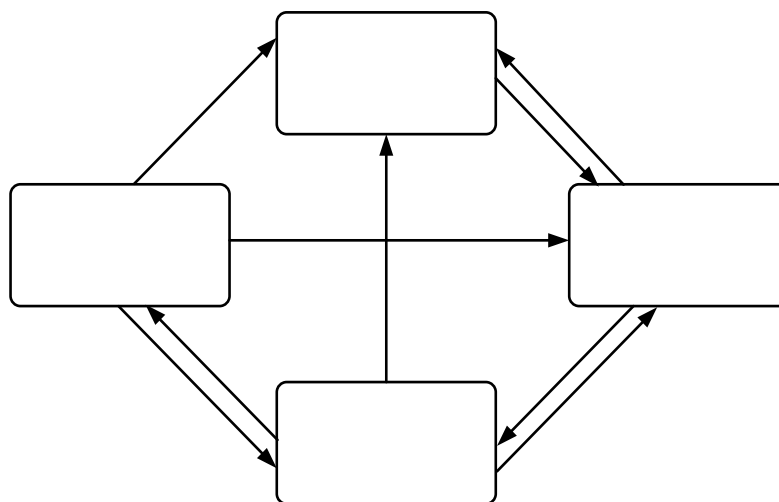


Рисунок 1 – Этапы имитационного моделирования

Для уточнения некоторых целей, критериев и т.п. можно вернуться к любому из предыдущих этапов. Например, в процессе имитационного моделирования может выясниться, что некоторые цели неявны, либо можно пренебречь некоторыми критериями, так как они не влияют на конечный результат. В результате модель может быть точнее скорректирована, дополнена, а в некоторых этапах упрощена. На этапе решения проблемы можно понять, достигнут ли результат, или необходимо вернуться для уточнения модели.

Методология имитационного моделирования позволяет на любом его этапе возвращаться к модели и уточнять ее при необходимости. Принятие решения при имитационном моделировании состоит в сочетании способности человека решать неформализованные задачи с возможностями формальных методов и компьютерного моделирования.

1.2. Анализ концепции интегрированных энергетических систем

Увеличение использования распределенной генерации и различных типов энергоснабжения, повлияет как на техническую, так и на экономическую

эксплуатацию энергетических систем. Преобразование различных энергоносителей (например, природного газа в электроэнергию и тепло) устанавливает связь между соответствующими потоками энергии, что приводит к системным взаимодействиям. Поэтому исследования, касающиеся совместного использования должны охватывать все задействованные энергоносители, например электроэнергию, природный газ и централизованное теплоснабжение. В связи с цифровизацией и компьютеризацией технологических процессов требования потребителей постоянно возрастают. Основными требованиями являются бесперебойность и повышение качества энергоснабжения.

В 1999 году был начат исследовательский проект [23], посвященный системам транспорта энергии от энергетических ресурсов к потребительским рынкам, включающий элементы как из области электротехники, так и из области теплотехники. В проекте рассматривались различные энергоносители, такие как электроэнергия, газ, нефть и уголь, конверсия между различными энергоносителями (газо- или гидроэлектростанции, ТЭЦ, тепловые насосы, заводы по производству сжиженного природного газа (СПГ) и т.д.), а также возможности хранения энергии, такие как гидроаккумулирование, хранилище СПГ в одной и той же модели. Этот проект послужил началом разработки гибкой и надежной методологии комплексного анализа сложных энерготранспортных систем с несколькими энергоносителями, включающей технологические, экономические и экологические аспекты. Предполагалось, что эта методология позволит интегрированным энергетическим компаниям проводить всесторонний анализ своих инвестиций, а также общую оптимизацию своих систем энергоснабжения.

В [36, 41] представлен проект Vision of Future Energy Networks (VFEN), инициированный группой авторов и поддержанный промышленностью. Данный проект нацелен на экологический подход и рассмотрение сроков от 30 до 50 лет. Экономические, экологические и технологические аспекты определяют условия для исследования. Общий гибридный подход включает различные энергоносители, фокусирующиеся на синергии между электрической, химической

и тепловой энергиями (и, возможно, другими энергоносителями). Распределенная генерация, накопление энергии и комбинированная передача различных энергоносителей являются важными аспектами этого подхода.

В [4] рассматривается переход к активным распределительным сетям в России. Поднимается вопрос об активном управлении гибкими, крупномасштабными системами электроснабжения. Авторы рассматривают современные города и промышленные центры, имеющие развитую энергетическую инфраструктуру, включающую топливную, электрическую, отопительную и охлаждающую системы.

Интеграция различных систем энергоснабжения приводит к росту технологического процесса. В результате совершенствуются технологии эксплуатации, функциональные возможности, что приводит к созданию интеллектуальных интегрированных энергетических систем (ИИЭС). Такие системы имеют многомерную структуру функциональных признаков и свойств развития. Они учитывают большое количество факторов: эффективность, надежность, управляемость, гибкое использование технологий преобразования энергии, транспортировки и хранения, активный спрос [46, 47, 77, 84, 86, 92]. Предполагается, что системам защиты и управления необходимо реагировать на неисправности и необычное поведение и обеспечивать восстановление ИИЭС после таких событий. Для моделирования ИИЭС и анализа эффективности в реальном времени потребуется поддержка принятия решений для системных операторов и вклад в управление и распределение энергии в системе. Имеет место сильная взаимозависимость систем тепло- и электроснабжения, особенно в аварийных ситуациях, через которую проявляются интеграционные факторы для этих систем.

Авторами [2, 3] рассмотрены проблемы интегрированных интеллектуальных энергетических систем в России. Представлены процессы интеграции систем в метасистему. Рассмотрен процесс взаимосвязей и взаимодействий между отдельными элементами системы энергоснабжения. Целеполагающими установками ИЭС являются: обеспечение комфорта и качества

энергоснабжения в быту, на транспорте и на производстве, включая количественный и качественный рост комплекса энергетических услуг при доступной их стоимости; обеспечение управляемости, надежности, безопасности и экономичности; снижение негативного воздействия на окружающую среду, в том числе выбросов парниковых газов. Предполагается создание взаимосвязанных энергетических систем с использованием различных видов энергии. Данные ИЭС смогут обеспечить качественные услуги для потребителей в области энергоснабжения.

В работе [43] рассматривается электроэнергетическая система США с новой точки зрения, интегрирующая электрическую, угольную, газовую и водную подсистемы в единую модель, соответствующую структуре потоков в сетях (Рисунок 2).

Идея изучения потоков энергии через соответствующие сети дает возможность открыть новые перспективы в отношении анализа, эксплуатации и планирования ИЭС.

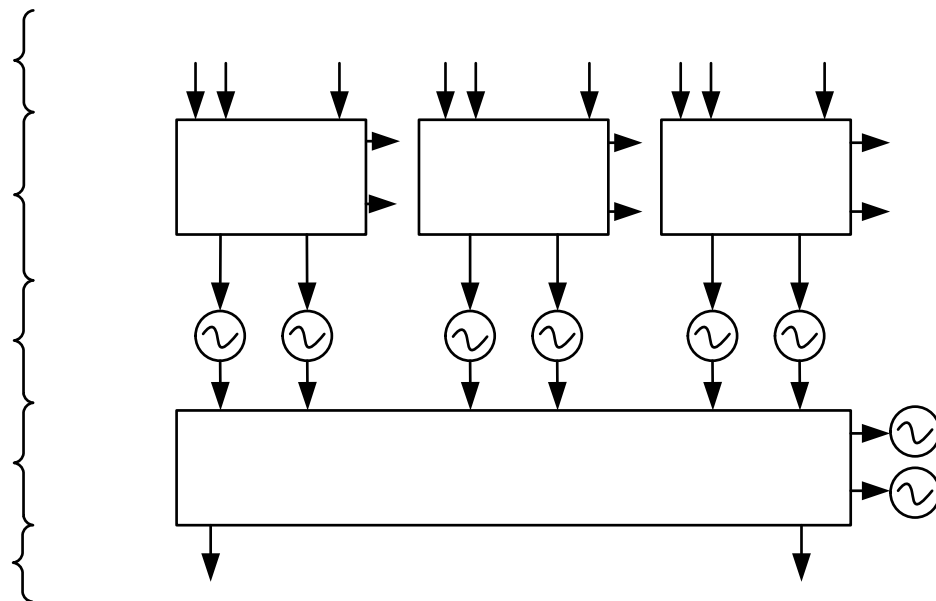


Рисунок 2 – Национальная энергетическая система США [43]

Важным результатом является мотивация владельцев генерирующих мощностей и поставщиков топлива использовать выявленные схемы потоков путем преодоления информационных, организационных барьеров, увеличения производственных мощностей или строительства новых производственных мощностей. Кроме того, работа служит хорошим руководством для наиболее

эффективного использования ресурсов в укреплении инфраструктуры ИИЭС для получения экономических выгод и повышения ее устойчивости к непредвиденным обстоятельствам, вызванным преднамеренными действиями или естественными причинами.

Необходимость диверсификации инвестиций в гидроэнергетику и дорогую нефть заставляет многие страны продвигать использование природного газа, особенно для производства электроэнергии. Латинская Америка стала одним из наиболее динамично развивающихся регионов по добыче природного газа и производства электроэнергии. Континент обладает богатыми запасами природного газа и быстрорастущими энергетическими рынками [44]. Экономические реформы, открывшие для частных инвестиций ряд секторов, ранее зарезервированных за государством, привели регион к развитию инфраструктуры электроэнергетики и трубопроводов природного газа, как в каждой стране в отдельности, так и трансграничные энергетические связи.

В работах российских авторов [89, 90] представлена общая структура интегрированных энергетических систем. Предложены элементы концепции интегрированных энергетических систем. Дано объяснение элементов концепции как трехслойной структуры интегрированных энергетических систем в трех измерениях (Рисунок 3).

Эти группы слоев можно определить следующим образом:

- Системные слои: системы электроснабжения, теплоснабжения/хладоснабжения и газоснабжения;
- Слои масштаба: суперсистемы, минисистемы и микросистемы;
- Функциональные слои: энергетические функции, коммуникации и управления, а также принятие решений.

Системный уровень не требует дополнительных комментариев и спецификаций. Это первичные энергоинфраструктурные системы. Здесь необходимо лишь указать, что между этими энергетическими системами на разных уровнях существуют технологические взаимодействия.

Такой подход авторов делает наглядной взаимосвязь различных систем

энергоснабжения на разных уровнях управления энергосистем, что позволяет определить уровни связи «система-уровень-функция».

В статье [89] рассматривается взаимозависимость систем тепло- и электроснабжения городского района (уровень мини-систем) в аварийной ситуации. Результаты исследования продемонстрированы на примере типичного городского района, который имеет районные электрические и тепловые системы (Рисунок 4).

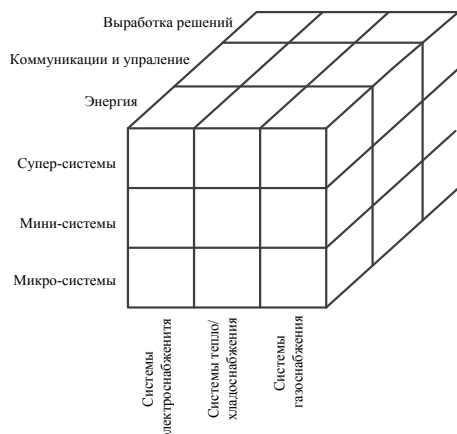


Рисунок 3 – Трехслойная структура интегрированных энергетических систем в трех измерениях [90]



Рисунок 4 – Схема интегрированной энергетической системы на примере района города [89]

Полученные результаты подчеркивают проблемы, связанные с раздельным рассмотрением развития и эксплуатации энергетических систем, а также проблемы износа оборудования и потребность улучшить технологический и технический уровень этих систем, использование их в качестве основы для интеллектуальной интегрированной энергетической системы.

В 2011 году ОАО «НТЦ электроэнергетики» по заказу ОАО «ФСК ЕЭС» с привлечением отраслевых и академических институтов, в т.ч. ОАО «Институт Энергосетьпроект», ОИВТ РАН, ИСЭМ РАН, ИНЭИ РАН, ИПУ РАН, ГУ ИЭС, ВШЭ, МЭИ (ТУ) была разработана Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) [99]. Концепция основана на мультиагентном принципе организации и управления её функционированием и развитием и представляет

электроэнергетическую систему нового поколения. Целью работы ИЭС ААС является обеспечение эффективного использования всех типов ресурсов для повышения надёжности, качества и эффективного энергоснабжения потребителей.

Повышение энергоэффективности энергоснабжения потребителей при использовании концепции ИЭС ААС возможно в результате использования гибкого взаимодействия всех её объектов.

В крупномасштабных исследованиях энергетических систем энергетическая система обычно представлена моделью большой системы, где ресурсы вводятся с одной стороны, а конечное использование извлекается с другой. Внутри системы моделируются различные технологии с выбросами и потерями энергии. Такого подхода обычно достаточно для системных исследований на национальном или международном уровне. Однако в усовершенствованной аналитической системе для местных энергетических систем необходимо идентифицировать различные технологии внутри системы.

В энергетической системе существует в основном три вида технологии [24]:

- Конверсионные технологии, преобразующие один вид энергии в другой;
- Транспортные технологии, которые передают энергию на определенное расстояние;
- Технологии накопления, которые сохраняют энергию в течение определенного времени в определенном географическом месте.

Некоторые из энергетических ресурсов должны быть преобразованы в другие формы энергии, такие как электроэнергия, прежде чем они могут быть транспортированы конечным потребителям (гидро, ветер), в то время как другие также являются энергоносителями, которые могут быть транспортированы через энергетическую систему к конечным потребителям (газ, уголь, биомасса).

География и топология являются ключевыми элементами в усовершенствованном подходе к оптимизации. Таким образом, речь идет не только о том, какие ресурсы и какие объемы использовать, но и о том, в какой системе должны происходить необходимые преобразования.

Таким образом, анализ приведенных исследований показывает взаимодействие и взаимозависимость различных систем энергоснабжения, особенно в аварийных условиях [89]. Развитие технологии интегрированной системы энергоснабжения, при использовании элементной базы, которая позволяет накапливать и преобразовывать друг в друга различные виды энергии, становится актуальным. Совместное развитие и функционирование отдельных систем энергоснабжения в составе интегрированных систем позволяет обеспечить более высокие уровни эффективности и надежности энергоснабжения по сравнению с отдельным рассмотрением этих систем.

1.3. Анализ моделей для решения различных задач развития и функционирования интегрированных энергетических систем

1.3.1. Исходные положения

Развитие энергетических систем в развивающихся и развитых странах направлено на эффективное удовлетворение спроса при сокращении общего потребления энергоресурсов. Основные тренды развития направлены на повышение энергоэффективности. Они включают в себя концепцию распределенной энергетики, управление спросом за счет развития «умных сетей», а также когенерацию. Когенерация представляет технологию совместного производства тепловой и электрической энергии в едином цикле.

Существующие тенденции развития энергетики подразумевают создание энергосистем интегрированного энергетического (с несколькими энергоносителями) характера, которые планируются, проектируются и эксплуатируются с обязательной координацией входящих в них подсистем. При управлении развитием и функционированием таких систем должны решаться оптимизационные задачи, сводящиеся в целом (в классической постановке) к минимизации стоимости производства/передачи/распределения энергоресурсов. Традиционно средствами такой минимизации являются перераспределение нагрузки источников, потребителей и накопителей энергоносителя и, как следствие, между элементами сети его передачи и распределения. Топология

интегрированной энергетической системы различна для разных энергоносителей [10].

В прошлом преобразование энергии рассматривалось как одномерная система в том смысле, что одна форма энергии преобразовывалась в другую форму. Побочные продукты превращений, такие как тепло, не учитывались и/или рассматривались как отходы. Например, центральные электростанции имели и в основном все еще имеют – один источник энергии, такой как уголь или природный газ, который преобразуется в электроэнергию. Потеря эффективности проявляется в виде отработанного тепла, которое рассеивается в окружающую среду (например, через охлаждающую воду). Когенерация является первым шагом на пути к совершенствованию системы, поскольку «отработанное тепло» рекуперируется и используется в качестве ценного продукта.

Классическое понимание когенерации состоит в создании ТЭЦ. В результате когенерации водяной пар может быть использован для обеспечения потребителей тепловой энергией и для генерации электроэнергии. С развитием интегрированных энергетических систем, распределенной энергетики появилась возможность применять технологию когенерации с другими источниками энергии.

Когенерация является основным трендом развития энергетики. Она призвана оптимизировать использование энергоресурсов и обладает следующими преимуществами [8]:

1. Высокий КПД использования и преобразования первичной энергии в тепло- и электроэнергию.
2. Увеличение экономической эффективности.
3. Создание условий для роста конкуренции на рынках тепло- и электроэнергии посредством расширения производственных возможностей.
4. Снижение объемов выбросов парниковых газов путем экономии топлива.
5. Повышение энергобезопасности за счет сокращения потребления энергоресурсов.

При комбинированном использовании различных источников энергии

возможно обеспечить энергообеспечение удаленных потребителей. Например потребителей, проживающих в районах Крайнего Севера, Дальнего Востока, Восточной Сибири. Концепция интегрированной энергетической системы является наиболее актуальной для изолированных районов.

Таким образом, имеются все необходимые концептуальные, экономические и технические предпосылки для создания конкурентоспособных интегрированных энергетических систем, отвечающих следующим требованиям [10]:

1. Экономическая эффективность и совместное производство и потребление различных энергоресурсов;
2. Большая гибкость интегрированных энергетических систем за счет возможности использования более широкого маневрирования энергоресурсов;
3. Более высокая надежность и бесперебойность энергоснабжения;
4. Повышение комфорта жизненных условий населения за счет взаиморезервирования видов энергии;
5. Повышение экологической безопасности за счет маневрирования энергоресурсами.

Применение интегрированной энергетической системы позволяет решать задачи энергоснабжения на различных (государственном, региональном, производственном) уровнях. В результате создания ИЭС решаются следующие задачи: энергообеспечение удаленных территорий; получение дополнительных мощностей с использованием нескольких видов энергии; повышение экономической эффективности районов за счет создания предприятий в удаленных районах; за счет использования дифференцированных тарифов сокращение расходов за оплату энергопотребления и др.

Можно утверждать, что все энергосистемы действительно являются «интегрированными» с физической точки зрения, в том смысле, что множество видов энергии и секторов взаимодействуют на разных уровнях: от спроса до потребления, обеспечиваемых сетями. Следовательно, для целей этой работы понятие «интегрированная энергетическая система» скорее относится к рассмотрению целостной системы, подход к оптимизации и оценке конкретного

случая (например, здания или страны). Это позволяет представить новую перспективу в системе энергетического анализа, особенно в свете сокращения времени предоставления энергетических услуг, что также зависит от экономических ограничений, как и ограничений уровня комфорта. Повышение эффективности преобразования и использования первичных источников энергии, например, через распределенную генерацию, способствует оптимальному разворачиванию как централизованных, так и децентрализованных ресурсов на системном уровне [11].

Многотопливная перспектива, в которой подчеркивается, как различные виды топлива от «классического» природного газа до биомассы и ВИЭ (возобновляемые источники энергии), так и до тепловой энергии, могут быть объединены вместе для обеспечения оптимального сервисного спроса. Это необходимо с точки зрения содействия развитию энергетических технологий и их взаимодействия, чтобы минимизировать стоимость системы.

С пространственной точки зрения понятие интегрированных энергетических систем можно увидеть на различных уровнях, которые в идеале могут перейти от индивидуальных жилых помещений к регионам или странам [61].

Например, на уровне зданий – природный газ и электроэнергия могут быть входными данными для различных частей оборудования, таких как котлы, тепловые насосы, кондиционеры, микро-ТЭЦ и т.д., для производства электроэнергии, тепла и охлаждения, и такое оборудование может оптимально координироваться для различных целей. Здания могут также взаимодействовать на районном уровне, например, в типичных районных энергосистемах, где сети используются для взаимодействия локального потокораспределения, например, от ТЭЦ или тепловых насосов, и распределять потоки энергии, такие как тепло в электроэнергию. Районы можно агрегировать и оптимизировать как следующий шаг к городу, а затем на региональном уровне, в этот момент другие векторы энергии и услуги тоже могут подключиться, например, для доставки энергоресурсов. В любом случае, помимо сложностей систематического анализа

возможных вариантов, ключевым моментом является то, что интегрированную энергетическую систему можно увидеть. Данные варианты можно смоделировать на различных географических уровнях в зависимости от целей исследования. Хотя многие методы могут применяться на всех уровнях (например, оптимизационные подходы, основанные только на экономической оценке), другие требуют конкретного учета географических перспектив (например, принять во внимание наличие сетевого ограничения).

Одной из главных проблем устойчивого развития города является обеспечение чистого, надежного и доступного энергоснабжения. Одним из вариантов является интеграция электроэнергии, вырабатываемой из различных источников с использованием концепций интеллектуальных сетей. Однако энергетические потребности города лишь частично удовлетворяются за счет электроэнергии. Следовательно, расширяя концепцию интегрированной энергетической системы, учитываются все соответствующие источники энергии и услуги. Следовательно, это создает больше возможностей для свободы при оптимизации энергетических решений. Таким образом, это могло бы повысить эффективность всей системы. Интегрированные энергетические системы могут обладать лучшими техническими, экономическими и экологическими характеристиками по сравнению с «традиционными», независимыми или отдельными энергетическими системами как на этапе эксплуатации, так и на этапе планирования [11, 12, 14]. На сегодняшний день в России можно выделить три категории генерирующих мощностей, которые подпадают под широкое определение распределенной генерации [14]:

1. Блок-станция – источник электрической (иногда и тепловой) энергии, расположенный на территории или в непосредственной близости от промышленного предприятия и принадлежащий владельцам этого предприятия на правах собственности или ином законном основании, например, праве аренды.

2. Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). ТЭЦ и централизованное теплоснабжение населенных пунктов были гордостью советской энергетики. И действительно, комбинированное производство электроэнергии и тепла повышает коэффициент

использования топлива (КИТ) в среднем на 30%.

3. Объекты малой и средней генерации, в числе которых газотурбинные и газопоршневые станции, а также электростанции на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ).

В работе [72] предлагается модель гибкого потока «энергия-вода» (FlexPWF) для совместной оптимизации работы гибких энергоемких компонентов в водных системах с работой как энергетических, так и водораспределительных систем. Модель FlexPWF использует энергетическую гибкость, обеспечиваемую очистными и опреснительными установками в сочетании с насосами с переменной скоростью вращения и резервуары для хранения воды, что позволяет минимизировать эксплуатационные расходы взаимозависимых систем распределения электроэнергии и воды. Предлагаемая модель учитывает эксплуатационные ограничения как энергосистем, так и водораспределительных систем, тем самым координируя их работу без угрозы надежному снабжению потребителей электроэнергией и водой. Модель FlexPWF эффективно координирует работу, снижает эксплуатационные расходы и улучшает эксплуатационные характеристики как энергетических, так и водных систем.

В работе [21] представлена комбинированная задача оптимального расхода природного газа и электроэнергии. Показано моделирование сети природного газа и описаны ограничения-равенства, описывающие преобразование энергии между газовыми и электрическими сетями в комбинированных узлах (например, генераторах).

Тенденции усиления технологической интеграции систем энергоснабжения стимулировали работу в области исследований по моделированию интегрированных энергетических систем. При этом развиваются два принципиально разных направления моделирования интегрированных энергетических систем: с использованием традиционных совместных взаимосвязанных математических моделей [9, 20, 22, 28, 29, 85 и др.] и на основе концепции энергетического хаба [2, 40 и др.].

1.3.2. Понятие энергетического хаба

В статьях [36, 37, 40, 41, 42, 70] авторы анализируют возможность рассмотрения нескольких видов энергии. Представлена модель потокораспределения, включающая преобразование и передачу произвольного числа энергоносителей. Сравнивается два подхода: традиционный метод и интегрированный метод выработки энергии. В 2005 году было [38] впервые введено понятие и сформулирована концепция энергетического хаба. Под энергетическим хабом понимается интегрированный объект с множествами входов и выходов, которые представляют различные виды энергии, и с реализацией внутренних функций этого объекта по передаче, накоплению и преобразованию различных видов энергии.

Энергетические хабы включают в себя ввод и вывод энергии, преобразование энергии в другие формы и ее накопление. Также к этим установкам подключается местная генерация (например, ветровая, солнечная, гидро). Типичными элементами энергетического хаба являются силовые электронные преобразователи, (микро) газовые турбины, топливные элементы, теплообменники, батареи, газовые баллоны и т.д. Хабы обмениваются энергией через гибридную сеть, транспортирующую различные энергоносители. На Рисунке 5 представлена обобщенная модель энергетического хаба.



Рисунок 5 – Обобщенная модель энергетического хаба

Работа [48] направлена на создание простой схемы энергетического хаба. Авторы продемонстрировали подходящую структуру для моделирования и оптимизации таких систем. До этого времени были разработаны инструменты для анализа стационарных состояний, позволяющие проводить общие исследования

поведения системы. Авторы видят потенциальные выгоды дальнейших исследований, такие как повышенная гибкость и более надежная работа, которые можно извлечь из рассмотрения будущих энергетических систем.

Энергетический хаб генерирует энергию через связи подключения. Например, инфраструктура передачи электроэнергии и природного газа, обеспечивает необходимые энергетические услуги на выходе, такие как электроэнергия, отопление, охлаждение и т.п. На Рисунке 6 приведен пример энергетического хаба [41].

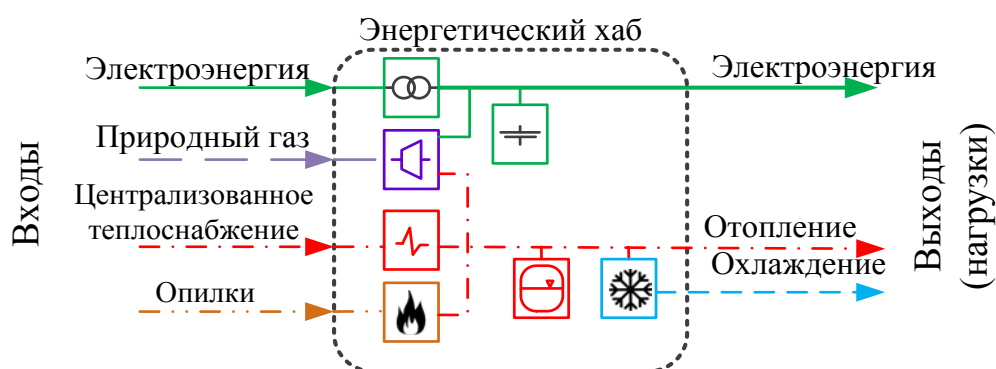


Рисунок 6 – Пример конкретного энергетического хаба, содержащего трансформатор, микротурбину, теплообменный аппарат, печь, охладитель, батарею и накопитель горячей воды [41]

Приведенная модель энергетического хаба представляет собой общий и простой способ моделирования преобразования энергии между различными энергоносителями. Модель энергетического хаба может быть использована для формулирования и решения различных задач.

Потребитель для реализации одних и тех же функций при использовании разных энергоресурсов может использовать различные технологии. Например получать электроэнергию из накопителя или централизованной системы электроснабжения. Таких потребителей можно рассматривать в виде энергетического хаба [39, 51]. В [67] рассмотрена система энергетических хабов, в которой входами одного хаба являются выходы другого хаба. Примером энергетического хаба также является когенерационная установка [48].

В работах [39, 67] авторы продолжают исследования энергетического хаба. В [54] в качестве примера энергетического хаба рассматривается частный дом

(Рисунок 7). На рисунке показано, что мгновенное оптимальное энергетическое решение для отдельного здания будет зависеть от выработки, хранения энергии на месте и состава генерирующих мощностей энергосистемы. Это также будет зависеть от эффективности поставок электроэнергии и газа, всего использования энергии при подаче воды и переработке отходов. Поскольку это конкретное местоположение, важны географические координаты – x, y, z здания.

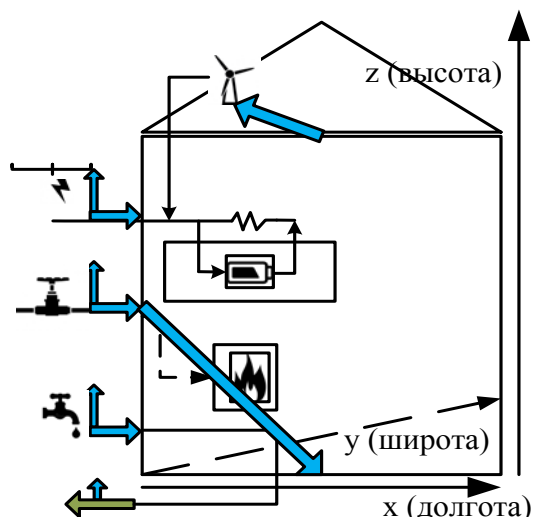


Рисунок 7 – Модель дома при использовании нескольких видов энергии [54]

Группой авторов в статье [96] представлен энергетический хаб с тремя видами энергии на входах: электрическая, тепловая и природный газ. Энергетический хаб представляет собой расширение единой сети энергоносителей. Модель энергетического хаба может рассматриваться на различных уровнях напряжения, поскольку крупномасштабное планирование ресурсов обычно применяется на уровне передачи, в то время как ТЭЦ и газовые отопительные нагрузки обычно расположены на стороне конечного потребителя и распределительных систем. Таким образом, в зависимости от его размера энергетический хаб может охватывать уровни напряжения как в системе передачи, так и в системе распределения энергии.

В [69] представлено введение в концепцию энергетического хаба. Основная часть статьи посвящена изучению предложенных ранее моделей хаба и были выявлены четыре основные функциональные возможности концепции энергетического хаба, включая ввод, преобразование, хранение и вывод энергии.

Во входном порту путем изучения проведенных работ на энергоузлах стало ясно, что основными входными источниками для энергетического хаба являются электрические и газовые сети. На самом деле, несмотря на важность различных энергоносителей, большинство моделей используют электрические и газовые сети в качестве основных входных данных. В большинстве исследований уделяется внимание многогенерационным системам. В будущих моделях энергетического хаба необходимо уделять больше внимания использованию многогенерационных систем, особенно возобновляемых и перспективных технологий, таких как топливные элементы, для удовлетворения различных нужд потребностей.

Также авторами работ [36, 41, 52, 56, 76, 88, 92] была разработана модель оценки инвестиций. Метод оценки сравнивает два сценария - обычный системный и хабовый подходы. Предполагается, что обычная система обеспечивает заданные нагрузки. Расчеты оптимального расхода энергии выполняются в течение ряда периодов времени, например десяти лет, и эксплуатационные расходы (включая затраты на электроэнергию, налоги на выбросы и т.д.) увеличиваются. На втором этапе та же процедура выполняется с использованием энергетических хабов для покрытия тех же нагрузок. Эксплуатационные расходы можно затем сравнить в каждом периоде времени, и может быть рассчитана разница. Из результирующего потока денег может быть получена приведенная стоимость, которая отражает экономию затрат, возникающих в результате использования энергетических хабов. Разница показывает стоимость потенциальных инвестиций и дает представление об обоснованных инвестиционных затратах на новую технологию.

В эпоху реструктуризации электроэнергетики в США приобретает большее значение концепция «Энергия – окружающая среда – экономика» [82], поскольку национальная экономика все больше опирается на сложную и взаимозависимую энергетическую инфраструктуру. Разукрупнение электроэнергетического сектора и стимулирование конкуренции также привели к появлению новых технологий производства и доставки электроэнергии, которые дают меньшее количество загрязняющих веществ, более высокую эффективность и менее дорогостоящие средства обеспечения нагрузки. Использование концепции энергетического хаба

позволяет решать эти задачи.

Представленный анализ показывает конструктивность и гибкость концепции энергетического хаба, которая является хорошей базой для исследования интегрированных энергетических систем. С учетом этого необходимо детально сопоставить особенности моделирования ИИЭС традиционными средствами и с использованием концепции энергетического хаба.

1.3.3. Традиционные модели

В качестве примера традиционных моделей потокораспределения интегрированных энергетических систем приведем модель, представленную в [85]. Данная модель управления режимами интеллектуальной интегрированной энергетической системы (ИИЭС) может быть применена к любому периоду времени, разделенному на t интервалов (Рисунок 8).

Предлагаемый подход к управлению режимами ИИЭС заключается в обеспечении того, чтобы эта система работала с минимальными затратами на рассматриваемом временном интервале, т.е. затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание энергосистемы должны быть сведены к минимуму.

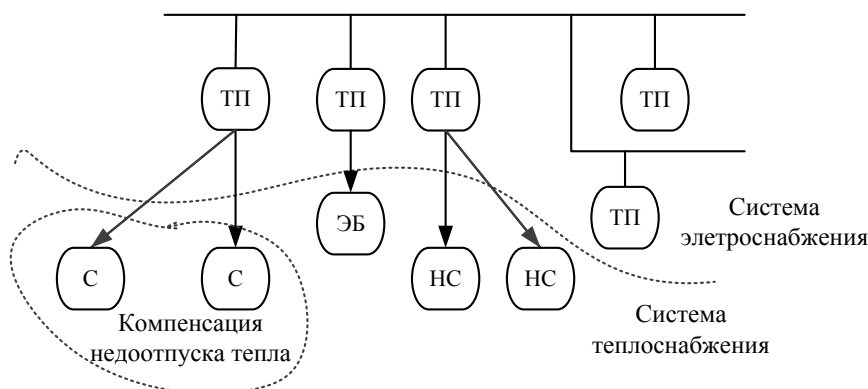


Рисунок 8 – Иллюстрация интерфейса между электрической сетью и тепловой сетью (ТП – трансформаторная подстанция, ЭБ – электрический бойлер, НС – насосная станция, П – потребитель) [85]

Эксплуатация электрических и тепловых систем при условии их интеграции включает в себя следующие этапы [85]:

1. Физическое расположение источников на плане местности и задание их параметров.

2. Генерация схем тепловых и электрических сетей.
3. Определение периода времени и интервалов для выполнения расчетов.
4. Расчет распределения расхода в системе отопления для определенного временного шага.
5. Оценка технико-экономического состояния системы отопления.
6. Оценка показателей надежности системы отопления.
7. Определение потребителей электроэнергии и объектов управления тепловой сети, потребность в электроэнергии.
8. Определение потребителей с необслуживаемой тепловой нагрузкой и объема недополученного тепла.
9. Определение трансформаторных подстанций, подающих электрическую энергию на силовые и управляющие объекты тепловой сети.
10. Определение трансформаторных подстанций, поставляющих электроэнергию потребителям с недостаточным запасом тепла.
11. Изменение мощности трансформаторов определяется шагами (9) и (10).
12. Расчет условий работы электрической системы.
13. Оценка технико-экономического обоснования состояния электрической системы.
14. Оценка показателей надежности электрической системы.
15. Если осуществимое решение существует, то расчет затрат на эксплуатацию энергосистемы и переход к этапу 3), в противном случае-разработка организационно-технических мероприятий по устранению причин сложившейся ситуации.

В [74] представлена среда интегрированных энергетических систем моделирования, разработанная для моделирования и оптимизации городских энергетических проблем с акцентом на планирование городской энергетической инфраструктуры. Это дополняется моделированием спроса на энергию для учета затрат и последствий мер, связанных со спросом. Эта модель также связана с набором методов оптимизации для того, чтобы дать ответы на вопросы планирования городской энергетической инфраструктуры. Анализ влияния

действий по управлению спросом обычно направлен на то, чтобы повлиять на спрос на энергию для взаимной выгоды коммунального предприятия (или распределительной компании) и его потребителей. Эти инициативы позволяют коммунальному предприятию вносить изменения в структуру потребления электроэнергии во времени и спросе, а также повышать эффективность использования ресурсов коммунального предприятия с точки зрения затрат, а потребителям - получать выгоду за счет снижения энергозатрат. Изменение формы графика нагрузки с меньшими пиками и общей тенденцией к выравниванию дает важные преимущества структуре энергосистемы в целом (улучшение использования производства энергии и распределительной сети), потребителям (снижение затрат на энергию) и обществу (снижение ущерба окружающей среде в результате меньшего загрязнения воздуха и меньшего количества активных генераторов).

В статье [38] представлен подход для комбинированной оптимизации энергетических систем, включающих несколько энергоносителей: электроэнергия, природный газ и централизованное теплоснабжение. Описана связь между различными энергетическими инфраструктурами, соединение входного сигнала и сигнала выхода. В работе [40] также представлен подход к комбинированной оптимизации связанных энергетических потоков различных энергоносителей. Аналогично стандартному подходу для электроэнергетических систем, выведено общее правило диспетчеризации для линейных энергетических узлов, которое связано с предельной стоимостью энергоносителей. Затем на примерах демонстрируются особенности представленного подхода. В целом, все приложения оптимального потока электроэнергии в системном планировании и эксплуатации также являются потенциальными приложениями подхода с несколькими входами, например:

- комплексное системное планирование;
- планирование генерации для нескольких входов;
- анализ надежности связанных энергетических систем.

В задачах комплексного управления электрическими и тепловыми сетями

рассматриваются вопросы комбинированного расчета режимов работы электрических и тепловых сетей, интегрированных в интеллектуальную систему энергоснабжения. Представлено математическое описание задач.

Основной целью [45] является представление усовершенствованного метода решения задачи потокораспределения в сбалансированных радиальных распределительных системах. Этот метод эффективен и прост в реализации. Основанный на законах электрических цепей, этот метод является итерационным и позволяет оценивать как значения модулей напряжения (среднеквадратичные значения), так и фазовые углы. Он применяется, например, для схемы, приведенной на Рисунке 9. Чтобы рассчитать поток нагрузки в линиях с боковыми ветвями, дана простая методика определения узлов за каждой ветвью. Используется простая схема нумерации. Начиная с исходного узла шины номер 0, нумеруются узлы основного фидера. Узел непосредственно перед исходным узлом помечается как узел 1 и так далее до конечного узла основного фидера (узел 4). После этого узлы главного фидера исследуются для боковых ответвлений. Выбирается боковая ветвь, отходящая от шины, ближайшей к исходной шине, и ее шины нумеруются в соответствии с конечным узлом основного фидера (от 5 до 6). Аналогично, номера шин следующих боковых ветвей нумеруются после конечного узла предыдущих боковых (7, 8) и так далее, пока не будут пронумерованы все боковые узлы. Каждой ветви присваивается номер, равный номеру принимающего узла. Пример связности сети представлен на Рисунке 9.

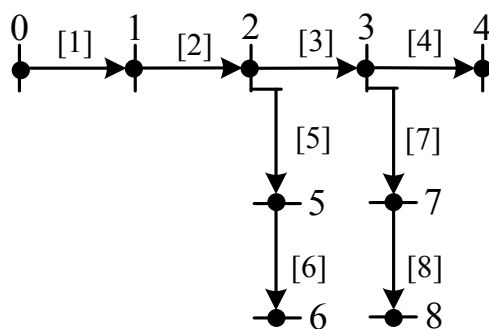


Рисунок 9 – Схема нумерации узлов и ветвей

Метод, используемый для определения узлов после каждой ветви, основан на итерационном методе, но представлен простым и понятным способом. Сначала

строится матрица инцидентности ветвей к узлам IM , в которой номера строк идентифицируют ветви, а номера столбцов – узлы. Предполагается, что общие элементы $IM(i, j)$ имеют значения, которые приведены ниже:

$$IM(i, j) = \begin{cases} -1, & \text{если } j \text{ является приемным концом } i \\ +1, & j \text{ является передающим концом } i \\ 0, & \text{ветвь не имеет связи с узлом} \end{cases}$$

где i – ветвь; j – узел.

Для фидера (Рисунок 9), матрицей инцидентности «ветви к узлу» является:

$$IM = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} [1] \\ [2] \\ [3] \\ [4] \\ [5] \\ [6] \\ [7] \\ [8] \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Поток нагрузки радиальной распределительной сети может быть решен итеративно из двух наборов рекурсивных уравнений. Первый набор касается определения тока ветвей путем перемещения вверх по линии (обратная развертка). Второй позволяет определять напряжение узлов, спускаясь по линии (прямая развертка). Метод может быть применен к радиальным линиям с шунтирующими элементами.

В статье [91] рассматривается модель управления режимами интеллектуальной интегрированной энергетической системы. Представлен алгоритм, предназначенный для расчета режимов совместной работы электрических и тепловых систем при их интеграции. Результаты исследования совместной работы электрических и отопительных систем показаны на примере типичного городского района с жилыми зданиями, имеющего районные электрические и отопительные системы. Полученные результаты показывают проблемы, связанные с раздельным рассмотрением расширения и эксплуатации энергосистем, а также износа оборудования и необходимостью повышения

технологического и технического уровней этих систем и использования их в качестве основы для создания интеллектуальной интегрированной энергосистемы.

Представим в качестве примера традиционную математическую модель интегрированной энергетической системы с несколькими несущими, включающей системы электроснабжения и теплоснабжения, в следующем виде (1) – (6) [91]:

$$F_{obj} \rightarrow \min \quad (1)$$

При условии:

$$E_{k \min} \leq E_k^t \leq E_{k \max}, k \in N_{par}^e, t = \overline{1, T}, \quad (2)$$

$$H_{k \min} \leq H_k^t \leq H_{k \max}, k \in N_{par}^h, t = \overline{1, T}, \quad (3)$$

$$0 \leq P_i^t \leq E_{i \max}, i = \overline{1, N}, t = \overline{1, T}, \quad (4)$$

$$F_{w \max}^{it} \geq F_w^{it}, F_{q \max}^{it} \geq F_q^{it}, \quad (5)$$

и баланс между производством электроэнергии и тепла составляет:

$$\sum_{t=1}^T (W_t + Q_t) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (W_i^t + Q_i^t) = \sum_{t=1}^T P_i^t \Delta t, \quad (6)$$

где F_{obj} – целевая функция, ее структура зависит от смысла решаемой задачи, например, активной мощности; F_q^i – объемы топлива, используемого в источнике i для производства тепла; F_w^i – объемы топлива, используемого в источнике i для производства электроэнергии; P_i – используемая (установленная) мощность источника i ; W_i – подача электроэнергии от источника i ; Q_i – подача тепла от источника i ; W – общие значения выработки электроэнергии в системе; Q – общие значения выработки тепла в системе; E_k – параметры текущего состояния электрической сети; $E_{k \min}$ и $E_{k \max}$ – технически допустимые пределы рабочих параметров электрической сети; H_k – параметры текущего состояния

тепловой сети; $H_{k \min}$ и $H_{k \max}$ – технически допустимые пределы рабочих параметров тепловой сети; $P_{i \max}$ – максимальная (установленная) мощность источника i .

Современные тенденции к усилению технологической интеграции систем энергоснабжения послужили стимулом для исследований по моделированию интегрированных энергетических систем с несколькими несущими, для исследования и контроля условий их эксплуатации и планирования расширения. Этот факт привел к развитию принципиально разных направлений моделирования интегрированных энергетических систем: во-первых, с использованием традиционных взаимосвязанных математических моделей, во-вторых, с использованием концепции энергетического хаба.

1.3.4. Моделирование энергетического хаба

В исследованиях большое внимание уделяется моделированию энергетического хаба.

В работах [39, 40, 75, 81, 94, 95, 96] в общем виде представлена система линейных алгебраических уравнений. Матрица коэффициентов системы связывает входные переменные энергетического хаба, которые представляют различные виды энергии, с его выходными переменными. Также отображает преобразование одних видов энергии в другие. Рассмотрен общий энергетический хаб с различными энергоносителями $\alpha, \beta, \dots, \gamma$. Энергия преобразуется в различные формы для удовлетворения спроса нагрузки на выходном порте хаба. Передача энергии от входных портов хаба к выходным портам выражается как:

$$\begin{pmatrix} L_{\alpha} \\ L_{\beta} \\ \vdots \\ L_{\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{\alpha\alpha} & C_{\beta\alpha} & \dots & C_{\gamma\alpha} \\ C_{\alpha\beta} & C_{\beta\beta} & \dots & C_{\gamma\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{\alpha\gamma} & C_{\beta\gamma} & \dots & C_{\gamma\gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\alpha} \\ E_{\beta} \\ \vdots \\ E_{\gamma} \end{pmatrix} \quad (1)$$

или

$$L = C \cdot E, \quad (2)$$

где $\alpha, \beta, \dots, \gamma$ – энергоносители, $E = [E_{\alpha}, E_{\beta}, \dots, E_{\gamma}]$ – вектор-столбец энергии на

входном порту, $L = [L_\alpha, L_\beta, \dots, L_\gamma]$ - вектор-столбец энергии на выходных портах; C – матрица прямых связей, которая описывает преобразование энергии от входа к выходу. Элементами сопряжения являются коэффициенты преобразования. Математически эта матрица описывает отображение мощностей от входа к выходу преобразовательного устройства. Каждый член матрицы связывает один конкретный вход с определенным выходом.

В случае решения обратной задачи вводится матрица обратных преобразований:

$$\begin{pmatrix} E_\alpha \\ \vdots \\ E_\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{\alpha\alpha} & \cdots & d_{\gamma\alpha} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{\alpha\gamma} & \cdots & d_{\gamma\gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_\alpha \\ \vdots \\ L_\gamma \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где d - матрица обратных связей, которая описывает преобразование энергии от выхода к входу. Связь между коэффициентами обратных и прямых преобразований имеет однозначный вид:

$$d_{\beta\alpha} = \begin{cases} c_{\alpha\beta}^{-1} & \text{если } c_{\alpha\beta} \neq 0 \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (4)$$

В случае N -выходных портов при одном входе энергия по каждому из выходных каналов распределяется в соответствии с выражением:

$$E_{im} = \sum_{n=1}^N D_{im} L_{in} \quad (5)$$

Поскольку суммарный вход одного энергоносителя может быть разделен на несколько преобразователей (в узлах ввода), предполагается ввести так называемые коэффициенты распределения, определяющие распределение суммарного входа в устройства преобразования этого энергоносителя.

В статьях [26, 65] представлен расчет потокораспределения города и смоделирован энергетический хаб интегрированной энергетической системы. Энергетический хаб представляет сложную систему взаимосвязанных инфраструктур, предоставляющих конечным потребителям базовые услуги электроэнергии, тепла, газа и т.д. Физические связи между системами могут быть

представлены в математических терминах с помощью концепции энергетического хаба. Данный подход предполагает гибкость для обнаружения факторов преобразования энергии в различных пространственных масштабах. В частности, математическая модель, связанная с энергетическим хабом, может предложить представления взаимозависимостей между транспортировкой энергии на бытовом, коммерческом и энергетическом уровнях, а также облегчить разработку и решение схем управления/оптимизации для управления генерацией в распределительных установках на уровне передачи. Данный подход может быть масштабируемым и модульным.

В статьях [50, 51, 54] предложено записать модель энергетического хаба в виде матричной системы уравнений. Представлены и обсуждаются методы для расчета ожидаемой надежности поставок энергии. Общий подход может быть использован для анализа различных аспектов надежности снабжения, что позволит сократить экономические потери, вызванные аварийным отключением по одному из каналов энергоснабжения. Применение концепции интегрированной системы решит существенный ряд проблем при полном или частичном ограничении по одному из каналов энергоснабжения. Также применение энергетического хаба даст возможность резервирования энергии, позволит оптимизировать графики нагрузки генерирующих станций и сетевой инфраструктуры.

В статье [51] авторами предлагается рассмотреть энергетический хаб со стороны расчета ожидаемой надежности энергоснабжения. Рассмотрен метод, предназначенный для использования в матричном представлении имитации преобразования энергии. В данной работе была разработана методология для расчета и определения характеристик надежности систем с несколькими потоками энергии. Реализация методики и ее надлежащее функционирование показаны на двух примерах, выбранных для демонстрации методологии. Методология может быть применена, в основном, для структурной оптимизации новых систем. Чтобы найти общее оптимальное решение, необходимо выполнить многокритериальную оптимизацию, где критериями надежности являются несколько аспектов, которые

необходимо учитывать.

В работах [32, 62] предложена модель производственного планирования, ориентированная на реакцию спроса на электроэнергию и газ для производителей. Эта модель учитывает временную и событийную реакцию спроса. Предложен алгоритм для решения этой задачи в ответ на уведомления о поставках в режиме реального времени, чтобы способствовать взаимодействию между производителями и поставщиками энергии.

Несколько исследовательских работ были посвящены взаимозависимости между сетями природного газа и электроэнергии [66, 79, 83 и др.]. В электроэнергетической сети энергоблоки производства электроэнергии на природном газе – это энергоблоки быстрого реагирования, которые компенсируют дефицит генерации, вызванный внезапными изменениями в распределении возобновляемой генерации или спросе на электроэнергию. Некоторые исследовательские работы игнорировали сетевую модель для электрической или газовой систем и рассматривали экономические и экологические показатели, ограничения, просто балансируя спрос и предложение с использованием одноузлового подхода. В работе [62] исследовано несколько сценариев координации между сетями электроснабжения и природного газа для повышения эффективности экономических мер и мер безопасности. Важным понятием, которое было проигнорировано в более ранних исследованиях, является то, что электроэнергетические и газовые системы обычно эксплуатируются различными субъектами с несовпадающими целями. Поэтому краткосрочное и долгосрочное оперативное планирование для этих взаимозависимых инфраструктурных систем должно учитывать ограничения на обмен информацией между их соответствующими системными операторами. Согласованная оперативная структура способствует скоординированному функционированию сетей энергоснабжения.

В [73] была сформулирована общая модель энергетического хаба с несколькими вариантами энергопотоков, а также ограничения, преобразование энергии и сети передачи. Модель планирования энергетического хаба определяет

график планирования с наименьшими затратами для потенциальных генерирующих блоков, линий электропередачи, котельных на природном газе и ТЭЦ, которые будут удовлетворять электрической и тепловой нагрузкам.

В [80] описан новый подход к моделированию сетей с несколькими энергоносителями. В предполагаемой модели потокораспределения типичными энергоносителями являются: электроэнергия, природный газ и централизованное тепло, которые могут учитываться как с потерями, так и без потерь. Представленная модель основана на концепции энергетического хаба. В рассматриваемом тематическом исследовании было использовано одиннадцать узлов.

Такая система могла бы обеспечить значительную экономию, как при генерации, так и при повседневной эксплуатации такой системы. Предлагаемый метод в дальнейшем авторы планировали расширять при использовании математической модели с помощью узловой матрицы, описывающей сетевые потери, с добавленной возможностью выполнения моделирования с потерями или без потерь.

Стоит отметить, что коэффициенты преобразования одних видов энергии в другие имеют сложную внутреннюю структуру, что существенно затрудняет решение задач преобразования на основе концепции энергетического хаба.

В качестве простейшего примера, иллюстрирующего сложность определения коэффициентов связи в (2), рассмотрим представленную простую схему в виде хаба (Рисунок 10).

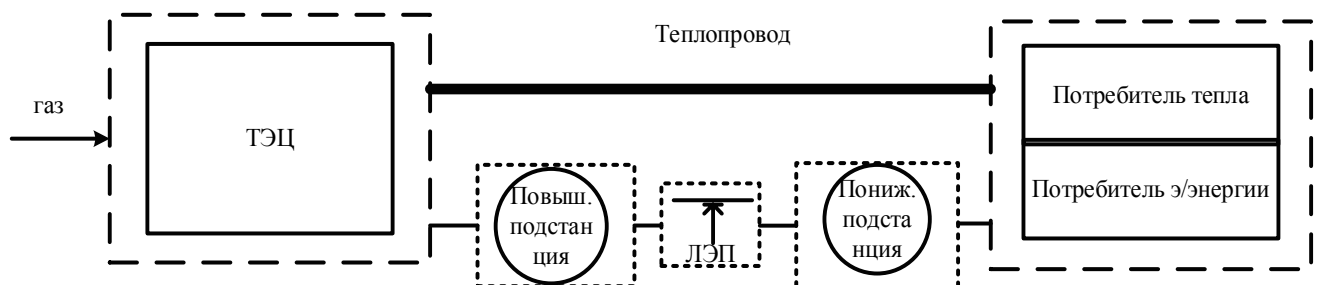


Рисунок 10 – Пример схемы интегрированной энергетической системы

На данной схеме видно, что каждый блок системы имеет вход и выход, выполняется преобразование энергии, а также можно предусмотреть накопление

энергии, что позволяет сделать вывод, что блоки схемы являются энергетическими хабами, а в целом составляют модель интегрированной энергетической системы.

1.4. Анализ выполненных исследований интегрированных энергетических систем

Все большее число промышленных и коммерческих предприятий устанавливают когенерационные установки из-за их многофакторных преимуществ, включая хорошую окупаемость инвестиций, повышение доступности надежной электроэнергии и использование альтернативных видов топлива. Для того, чтобы в полной мере воспользоваться такими преимуществами, эксплуатирующие компании нуждаются в инструментах планирования, которые могут помочь им в экономичной и безопасной эксплуатации своих генерационных установок.

В Швейцарии [51] решается задача оптимизации кратковременной работы когенерационной системы в крупном промышленном комплексе. Когенерационная система определяется как система, которая одновременно производит электрическую энергию и тепловую энергию. Модель электрической системы включает в себя генерацию и передачу электроэнергии. Модель тепловой системы включает в себя отдельные установки, состоящие из котлов, турбин, конденсаторов, насосов, резервуаров для хранения и соединительной паровой сети. Задача оптимизации имеет своей целью минимизацию общей стоимости всех видов топлива и подпиточной воды, используемых в течение горизонта планирования режима (от 1 до 24 часов), при условии удовлетворения ряда ограничений на электрические и тепловые системы. Новый подход к решению основан на концепции интегрированной энергетической системы. Методология является довольно общей в том смысле, что она не накладывает никаких ограничений на детализацию моделей электрических и тепловых систем, например, электрическая модель может быть представлена простым сетевым потоком или детальной моделью потоков мощности. Метод и компьютерная

программа были разработаны для нефтеперерабатывающего завода «Ecopetrol» – нефтехимический комплекс в Колумбии, где они используется в качестве инструмента оперативного планирования.

В [55] было проанализировано понятие энергетического хаба для фиксации связи между многочисленными формами энергии, такими как электроэнергия, газ, тепло и охлаждение в интегрированных энергетических системах (ИЭС). Модель надежности энергетических хабов была разработана на основе алгоритма Smart Agent Communication (SAC) (Рисунок 11).

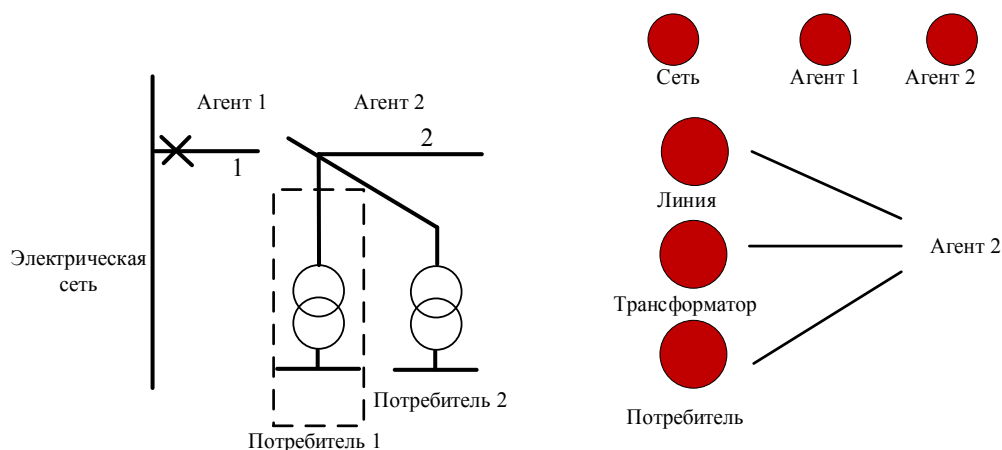


Рисунок 11 – Схема базовых агентов, построенных на платформе AnyLogic [55]

В модели рассматривались эффективность преобразования энергии, интенсивность отказов и время ремонта для различных систем энергоснабжения, а также учитывалось влияние связи между различными видами энергии на надежность ИИЭС, согласно которому можно общаться с другим умным агентом. В сочетании с моделированием методом Монте-Карло представлен подход к оценке надежности, основанный на алгоритме SAC и модели энергетического хаба. В представленном подходе локализация неисправностей, изоляция неисправностей, реконфигурация системы и восстановление неисправностей могут осуществляться автономно. Предложенные модели и подходы применяются на платформе моделирования – AnyLogic, а эффективность модели подтверждается обширными кейсами исследований [55].

В статье [53] авторы описали подход моделирования взаимосвязанных национальных энергетических систем. Каждая страна моделировалась как отдельный энергетический хаб, со своей инфраструктурой генерации тепла и

электроэнергии. Хабы между собой соединялись трубопроводами и линиями, так как имеют между собой электрические и газовые сети. За счет этого можно импортировать или экспортировать электроэнергию и/или газ между странами.

Статья завершается тремя тематическими исследованиями, демонстрирующими применимость предложенного подхода. На Рисунке 12 (а) показаны схемы потоков, полученные в результате моделирования, в сравнении с типичными схемами потоков.

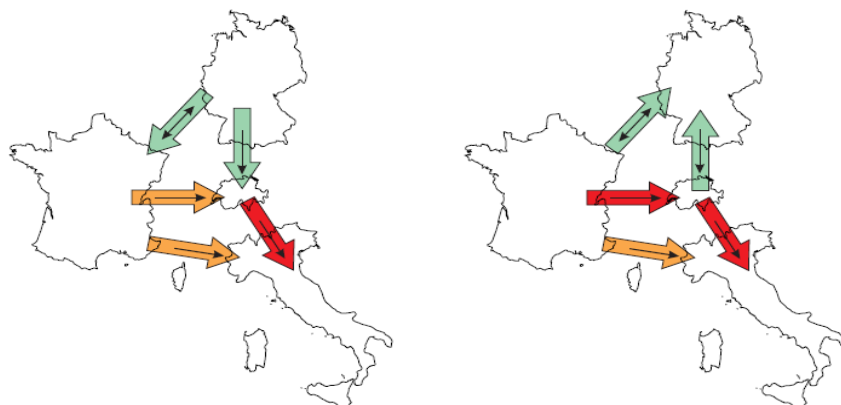


Рисунок 12 – Сравнение моделей трансграничных потоков без учета (а) и с учетом (б) выбросов CO_2 в целевой функции. а) Базовый случай трансграничных потоков; б) Трансграничные потоки с ценообразованием на выбросы [53]

Красные стрелки указывают на перегруженность. Оранжевые стрелки отображают загрузку линии более чем на 75%. Зеленые стрелки иллюстрируют загрузку строки менее 75%. Тонкие черные стрелки внутри цветных стрелок показывают исходное направление потока. Трансграничный поток между Францией и Германией меняет направление в зависимости от сезона и времени суток (обозначено двумя стрелками в обоих направлениях). Эта модель учитывает взаимозависимость различных факторов, различных энергоносителей (например, уголь, газ, электрическая энергия, нефть и т.д.).

В энергетическом хабе каждый энергоноситель может быть преобразован в другие виды энергии для оптимального удовлетворения потребностей в электроэнергии, отоплении и охлаждении. В исследовании [79] представлена структура оптимального проектирования и размера взаимосвязанных энергетических хабов. В статье рассматриваются физические ограничения для сетей природного газа и электроэнергии, а также экологические проблемы.

Модель включает в себя комбинированную теплоэнергетику, котел, абсорбционный чиллер, компрессионный чиллер, накопитель электроэнергии (литий-ионный аккумулятор) и накопитель тепла. Кроме того, учитывается надежность энергоснабжения. Предложенная модель была протестирована на взаимосвязанной тестовой системе, представляющей собой муниципальный район с тремя энергетическими узлами (Рисунок 13).

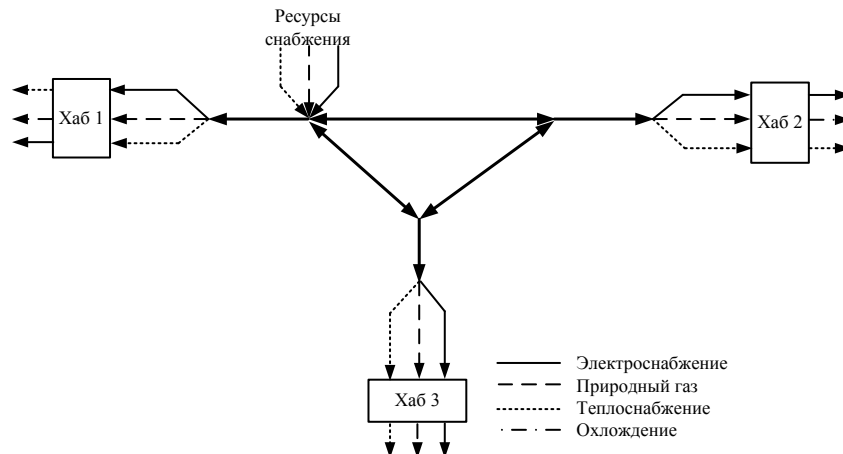


Рисунок 13 – Муниципальный район / город с тремя энергетическими узлами [79]

Модель учитывает такие практические соображения, как поддержание надежности электроснабжения и теплоснабжения, выбросы углекислого газа и физические ограничения электросетей и сетей природного газа. Исследование показывает, что при наличии системы централизованного теплоснабжения выгодно устанавливать ТЭЦ и компрессионный чиллер и избегать установки тепловых накопителей, котлов. С другой стороны, когда система централизованного теплоснабжения недоступна, ТЭЦ, теплоаккумулирующий котел и абсорбционный охладитель должны быть установлены в каждом хабе для удовлетворения потребностей в электроэнергии, отоплении и охлаждении. При исследовании был применен метод Монте-Карло и метод сокращения сценариев для того, чтобы определить чувствительность полученных результатов к неопределенности прогнозов спроса на тепло и электроэнергию, а также к неопределенности цен на энергоносители [79].

В [93] предлагается модель распределения энергии для оптимальной координации электрической, охлаждающей и тепловой мощности различных

источников энергии и минимизации эксплуатационных затрат. На основе прогноза скорости ветра, мощности генерации, охлаждения и потребности в тепле на ближайшие 24 часа для оптимизации графика работы применяется динамический инерционный весовой алгоритм оптимизации роя частиц. Представлены перспективные результаты моделирования для демонстрации хорошо скоординированной работы установок микрогенерации и внешней энергосистемы путем отсечения пиков и заполнения долей с минимальными эксплуатационными расходами.

В статье [35] представлен инновационный подход к решению проблемы восстановления распределительных сетей. Повышение качества поставок электроэнергии является одной из постоянных задач современных распределительных энергетических компаний. Внедрение технологий Smart Grid позволяет улучшить управление сетью в реальном времени и сбор данных, а также облегчает выполнение поставленных задач. Однако новые технологии требуют совершенствования подходов к решению существующих проблем в приложениях автоматизации (например, рассмотрение отключения нагрузки в существующем алгоритме восстановления сервиса) и исследования новых.

Частота и продолжительность перебоев в электроснабжении напрямую связаны с эффективностью восстановления сервиса. Восстановление сервиса основано как на опыте оператора, так и на быстром реагировании сервиса восстановления. Последнее необходимо при серьезных перебоях в электроснабжении. Минимизация нагрузки обесточенного потребителя после обнаружения и изоляции неисправного участка в сети является основной задачей приложения восстановления сервиса.

В работах [30, 34, 59, 68, 78, 81] представлена комплексная математическая модель задачи восстановления в сбалансированных радиальных распределительных системах. Задача восстановления первоначально смоделирована на основе смешанного целочисленного нелинейного программирования. Задача может быть эффективно решена с использованием нескольких коммерческих решателей, основанных на эффективной методике

оптимизации методом ветвей и границ. Предложенная математическая модель рассматривает несколько целей в рамках одной целевой функции, используя ее параметры для сохранения иерархии различных целей:

- 1) максимизация удовлетворения спроса,
- 2) минимизация количества операций переключения,
- 3) приоритетность работы автоматического выключателя, а не ручного,
- 4) приоритетность особых нагрузок.

Общие и специализированные тесты проводились на 53-узловой тестовой системе, а полученные результаты сравнивались с другими ранее предложенными алгоритмами. Результаты показывают, что математическая модель является надежной, эффективной, гибкой и обеспечивает отличную производительность при поиске оптимальных решений. Предлагаемые решения могут быть использованы в автономном режиме или в режиме онлайн, в зависимости от времени, необходимого для решения поставленной задачи. Результаты испытаний показывают отличную производительность в отношении качества решения (т. е. модель гарантирует, что решения являются оптимальными). Предложенный расширенный алгоритм может удовлетворить требованиям управления в реальном времени при планировании параллельного восстановления энергосистемы в случае возникновения каких-либо непредвиденных обстоятельств.

В [33] представлена интегрированная модель диспетчеризации газовых и электроэнергетических систем (Рисунок 14).

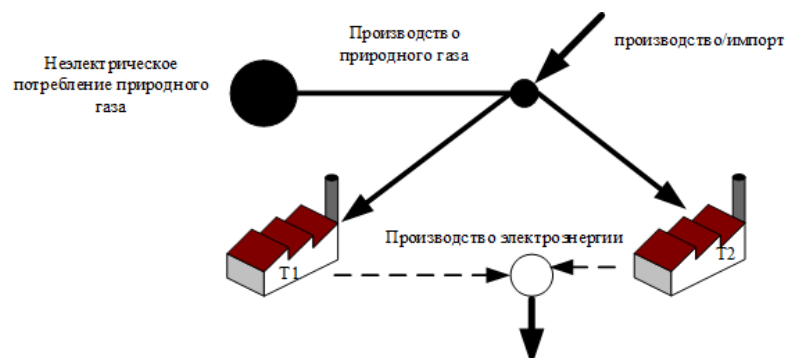


Рисунок 14 – Соотношение потребления природного газа между системой передачи и работой тепловой и электрической систем [33]

В этих системах решения об электростанциях влияют на работу газовой

системы и наоборот. Предложена модель, рассматривающая совокупность газовых электростанций, питаемых системой газопроводов. Цель состоит в том, чтобы минимизировать затраты на производство электроэнергии, производство и/или приобретение природного газа и передачу.

Благодаря интегрированной модели достигается лучшая координация работы электростанций и можно получить подачу и передачу природного газа. Таким образом, в данном контексте модели, интегрирующие функционирование этих двух систем, имеют важное значение для экономичного и безопасного планирования и эксплуатации систем электро- и газоснабжения.

В статьях [64, 87] применен мультиагентный подход к исследованию интегрированных систем энергоснабжения. Традиционно рассматриваемые энергетические системы объединяют крупные источники энергии, такие как гидроэлектростанции, комбинированные теплоэлектростанции, котельные, распределенные на большой площади электрические и трубопроводные сети. Предлагается объединение отдельных разнотипных систем разного уровня в единую интегрированную систему с множеством координированных элементов. Проведен анализ возможности использования мультиагентного подхода к управлению сетью. Представлена структура мультиагентной сети для изучения интегрированных систем энергоснабжения (Рисунок 15).

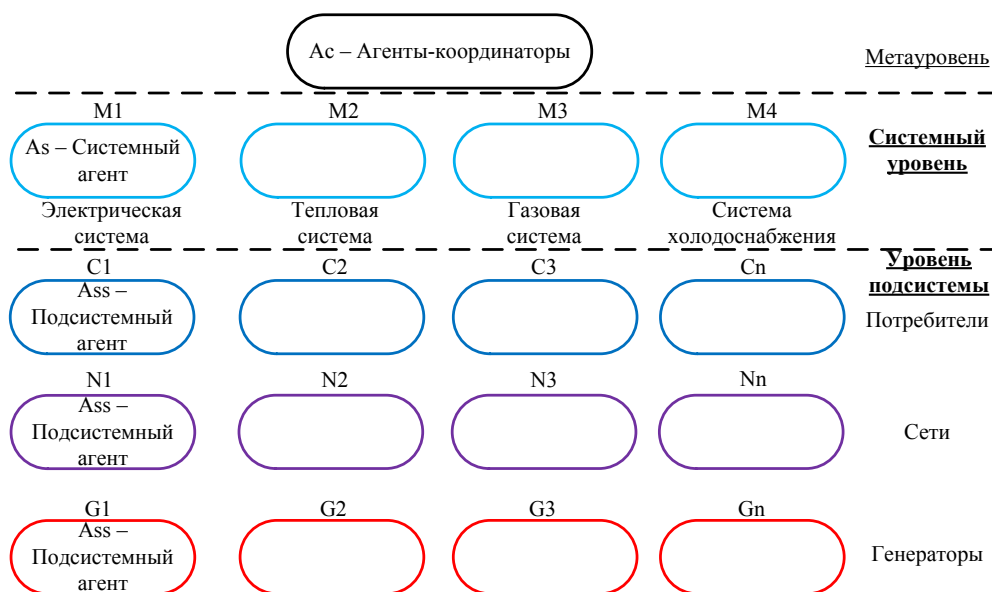


Рисунок 15 – Структура мультиагентной сети [87]

Основываясь на взаимодействии между системами энергоснабжения, можно

перераспределять и преобразовывать энергию из разных источников, например, если не хватает электрической энергии, можно получить необходимое количество энергии через специально используемые резервные генераторы (работающие на газе или использующие энергию пара). Теоретическая значимость предлагаемой разработки заключается в обосновании методов и принципов моделирования интегрированных систем энергоснабжения на основе мультиагентных технологий. Практическая значимость исследования определяется разработкой программного прототипа исследования интегрированных систем энергоснабжения, а также возможностью моделирования реальных систем энергоснабжения на основе этого прототипа.

Группы авторов [31, 57] также рассматривают возможность внедрения мультиагентной системы автоматизации потокораспределения энергии. Данная система автоматизации электроснабжения позволяет эффективно управлять питающей распределительной сетью с помощью дистанционного управления и мониторинга. Наиболее важной функцией является восстановление стабильного электроснабжения. Предложенная система была применена к существующей сети и испытана в центре тестирования мощности Гочанг, Южная Корея. Результаты испытаний показали, что в наиболее сложном случае время восстановления составляло 48 секунд. В работе [31] предложена регулируемая модель оптимизации восстановления с двухступенчатой задачей, включающая неопределенные выходы и требования к нагрузке. На первом этапе вырабатываются оптимальные стратегии восстановления отключенной мощности, а на втором этапе осуществляется поиск наихудших сценариев флуктуаций (отклонений). Модель сформулирована как задача смешанного целочисленного линейного программирования. Осуществимость и надежность стратегий, полученных с помощью этой оптимизационной модели, могут быть гарантированы для всех случаев в заранее определенных наборах неопределенностей с хорошей производительностью.

Концепция мультиагентной автоматизации в интеллектуальных сетях применяется для построения структуры самовосстановления, которая будет

использоваться для восстановительной службы. Найдены оптимальные решения по восстановлению на основе глобальной оптимизационной функции. Стратегия восстановления обычно решается с использованием эвристических методов, обеспечивая только близкие к оптимальным решения. Кроме того, ограничения безопасности сети не обрабатываются точно и применяемые методы поиска на графах не могут быть обобщены для всех топологий сети.

В [83] авторы рассматривают энергетический хаб, включающий в себя два основных элемента: прямые соединения и преобразователи. Входным энергоресурсом системы является природный газ. Прямые соединения используются для подачи входной мощности на выход без преобразования. Преобразовательные элементы используются для преобразования природного газа в другие формы или качества. Например, газовые турбины, двигатели внутреннего сгорания или топливные элементы.

Элементы внутри хаба могут создавать дополнительные связи между входами и выходами. Например, электрическая нагрузка может быть обеспечена за счет потребления всей электроэнергии непосредственно из электросети или выработки части или всей необходимой электроэнергии из природного газа.

В рассматриваемой работе авторы учитывают цену газа, капитальные затраты, а также выручку от реализации, находят влияние этих параметров на финансовые параметры энергетической системы. При подсчете экономических показателей применен программный продукт COMFAR III [83].

Авторы работ [97, 98] предлагают двухэтапный подход для определения оптимальных решений о принятии обязательств на сутки вперед в скоординированных сетях электроснабжения и централизованного теплоснабжения. В качестве примера рассматриваются сети электроснабжения и централизованного теплоснабжения острова Барри. В этой структуре влияние изменчивости ВИЭ приводит к повышению эффективности принятия решений путем включения статистических свойств выходной мощности ВИЭ (Рисунок 16).

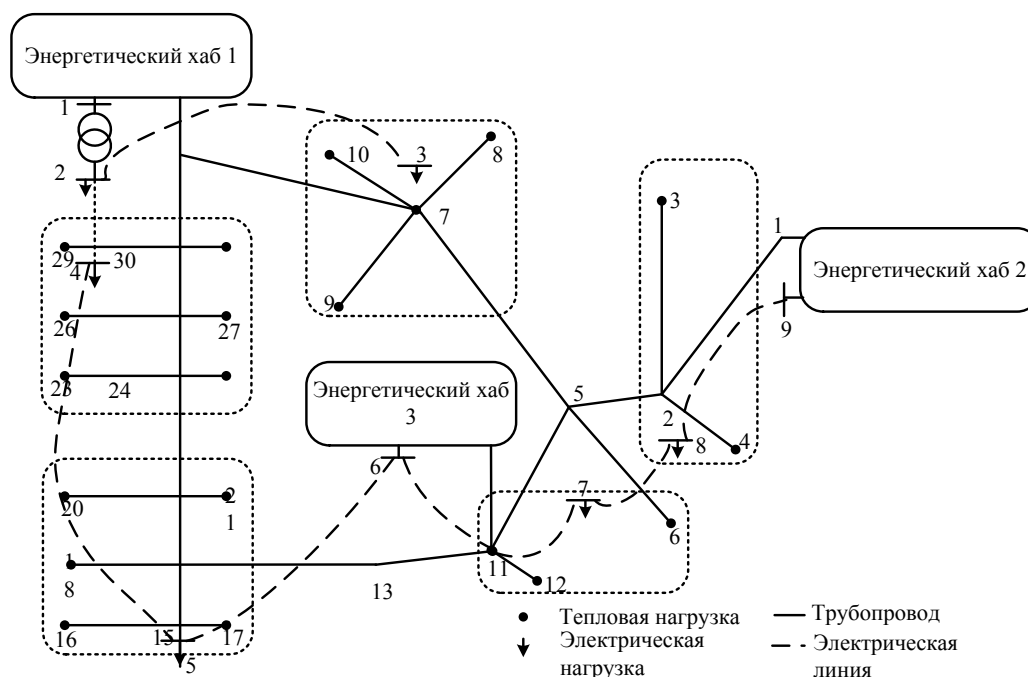


Рисунок 16 – Принципиальная схема электрических и тепловых сетей острова Барри [97]

Численные результаты подтверждают эффективность подхода в получении информации о вероятностном распределении выходной мощности ВИЭ, что повышает эксплуатационные характеристики. Также было проверено превосходство предложенного метода принятия решений по сравнению с подходами детерминированного и стохастического программирования. Кроме того, упрощенные преобразования могут значительно повысить вычислительную эффективность, воспользовавшись уменьшенным числом линейных коэффициентов, двойственных переменных и двойственных ограничений.

Авторы в работе [63] рассматривают интегрированные энергетические системы. Предполагается, что их применение повысит надежность системы и качество электроэнергии. В данной работе представлен комплексный подход к проектированию и эксплуатации систем распределенных энергоресурсов, основанный на моделировании энергетического хаба. Разработана многоцелевая оптимизационная модель, учитывающая комплексный взгляд на электросети и сети природного газа для анализа оптимального проектирования и эксплуатационного состояния систем.

Математическая модель учитывает энергетические потребности объекта,

местные климатические данные и структуру тарифов на коммунальные услуги, а также технические и финансовые характеристики. Для обеспечения потребностей в энергии рассматриваются энергетические системы, включая фотоэлектрические и когенерационные системы, котельные, центральные энергосистемы. В качестве наглядного примера приведен отель в Иране, демонстрирующий потенциальные возможности применения предложенного метода.

Таким образом, за последнее время выполнен целый ряд работ, иллюстрирующих эффективность использования концепции интегрированных энергетических систем. Это определяет актуальность выполненных в данной диссертации исследований.

1.5. Обоснование постановки задач исследований

Интегрированные энергетические системы, объединяющие множество энергетических систем, таких как электроэнергетические, газовые и системы централизованного теплоснабжения, обладают высоким потенциалом в будущем благодаря своим преимуществам в экономике, энергоэффективности и продвижении возобновляемых источников энергии.

Во всех исследованиях [26, 27, 39, 48, 58, 60, 67, 71 и др.] проделана существенная работа, которая является базой для дальнейших исследований. Концепция энергетического хаба позволяет применять новые подходы к проектированию энергетических систем. При моделировании энергетического хаба возникает сложность при определении коэффициентов преобразования в матричном подходе, которую нельзя решить с помощью традиционных методов. В связи с этим в работе стоит задача по моделированию и разработке алгоритма технологии программирования модели энергетического хаба. Предлагается использовать возможности программной среды MATLAB/Simulink. В этой среде имеется библиотека стандартных элементов и необходимо создать дополнительную библиотеку моделей на основе концепции энергетического хаба в среде MATLAB/Simulink.

Кроме того, в достаточно простых случаях генерация или потребители

представляются в виде хабов и не должны вызывать затруднений моделирования энергетического хаба независимо от возможностей MATLAB/Simulink. Это направление является одной из задач исследований.

Новые концепции оцениваются и разрабатываются для эффективной интеграции и надежной работы нагрузок энергетических систем. Для этого разрабатываются математические модели на основе энергетических хабов. В такой системе каждый объект энергоснабжения будет являться частью интегрированной энергетической системы.

В выполненных до настоящего времени исследованиях представлены формализованные постановки конкретных задач интегрированных энергетических систем, методы и результаты их решения на основе линейных моделей энергетического хаба. Решались задачи расчета и оптимизации потокораспределения в интегрированных электрических, тепловых и газовых сетях, надежности энергоснабжения потребителей, оптимизации суточных режимов при их диспетчеризации, оптимизации развития интегрированных энергетических системах.

Проведенные исследования продемонстрировали возможности рассматриваемого подхода на основе концепции энергетического хаба и в то же время выявили проблемы при его применении. Достоинством подхода является унификация описания функций энергетического хаба по отдельным каналам передачи, распределения, преобразования и накопления видов энергии. В то же время, даже для линейной модели энергетического хаба возникают проблемы определения коэффициентов матрицы преобразований. В общем случае коэффициенты преобразования одних видов энергии в другие могут иметь сложную внутреннюю структуру, что существенно затрудняет решение задач преобразования на основе концепции энергетического хаба.

Изложенные проблемы моделирования энергетического хаба заставляют искать другие подходы к их решению.

Следовательно, концепция энергетического хаба является перспективной методической базой для имитационного моделирования ИИЭС. Однако

имеющийся подход к моделированию энергетического хаба ограничивается линейными коэффициентами связи входов и выходов хаба, в то время как в реальных задачах требуется учет нелинейностей. Поэтому необходима разработка альтернативного подхода. Необходимую методическую основу могут дать возможности программной среды MATLAB/Simulink, которая имеет развитую библиотеку моделей достаточно простых элементов электроэнергетических и трубопроводных систем. Для имитационного моделирования сложных элементов ИИЭС на базе концепции энергетического хаба необходима разработка дополнительной библиотеки моделей. Сравнительно простые элементы ИИЭС, включая простые энергетические хабы, могут быть реализованы с использованием базового языка программирования системы MATLAB. Кроме того, необходимо разработать модели сетевых элементов интегрированных энергетических систем.

С учетом изложенного необходимо разработать комплексный алгоритм конструирования имитационной модели ИИЭС с использованием отмеченных моделей элементов.

Таким образом, анализ состояния исследований интегрированных энергетических систем и существующих моделей и методов решения различных задач позволяет сформировать следующие задачи исследования диссертации:

- 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 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.

Выводы по первой главе

Многочисленные исследования были сосредоточены на интегрированных энергетических системах, таких как скоординированные электрические и газовые системы [39, 66, 79, 83 и др.], скоординированные электрические и централизованные тепловые системы [47, 84, 85, 90 и др.], скоординированные электрические, газовые и централизованные тепловые системы [23, 36, 54 и др.], а также скоординированные химические, угольные, нефтяные, электрические и тепловые сети [41, 43, 44, 72].

Исследования показали, что гибкое сочетание различных энергоносителей с использованием технологий преобразования и накопления энергии имеет потенциал для различных улучшений системы: общая стоимость энергии и выбросы системы могут быть снижены, надежность и доступность поставок могут быть увеличены, перегрузка может быть снижена, потери при передаче энергии уменьшены. Разработанные структуры моделирования и анализа обеспечивают подходящую основу для исследований, необходимых для планирования сети, таких как анализ потоков мощности и надежности, а также оптимизация системы.

Интеграция различных форм энергии станет основой для повышения эффективности использования энергоресурсов с применением концепции энергетического хаба. Интеграция новых технологий является залогом развития будущей энергосистемы.

Проведенный анализ моделей для решения различных задач развития и функционирования интегрированных энергетических систем показывает актуальность и перспективность этого направления. Рассмотрены традиционные модели, а также особенности и условия их применения для исследования интегрированных энергетических систем. Рассмотрены подходы к управлению

режимами ИИЭС для работы системы с минимальными затратами на заданном временном интервале.

Обоснованы необходимость и направления исследований диссертации, методы и принципы моделирования интегрированных систем энергоснабжения на основе концепции энергетического хаба с использованием потоковых методов. Далее разработанные методы требуют подтверждения исследований на примерах различных задач интегрированных систем энергоснабжения.

2. Технология имитационного моделирования интегрированных энергетических систем

2.1. 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 рассматриваемой технологии. В основу конструирования имитационной модели интегрированной энергетической системы заложены следующие базовые принципы:

- Имитационная модель интегрированной энергетической системы конструируется из моделей элементов в соответствии с топологией схем соединений (схем замещения) и параметров различных видов элементов (объектов) отдельных энергетических систем, с учетом их взаимосвязей в интегрированной системе. Необходимо отметить начальный элемент в каждой отдельной энергетической системе, который послужит отправной точкой для создания топологической модели каждой отдельной энергетической системы.

- Текущие версии программного обеспечения MATLAB/Simulink включают различные модели элементов технологических систем – электрических, газовых, гидравлических и других. Эти модели элементов представлены с использованием передаточных функций и могут быть реализованы для исследования динамических процессов в различных технологических системах. Мы имеем дело с установившимися состояниями, поэтому необходимо преобразовать исходные динамические модели в статическую форму.

В качестве базовой модели электрических и трубопроводных сетей принята представление сетевых элементов их пропускными способностями. Такая модель позволяет использовать идентичное представление электрических и

трубопроводных сетей, которое делает возможность воспользоваться достаточно развитым математическим аппаратом потоков в сетях. Необходимо заметить, что потоковые модели эффективно используются при решении целого ряда структурных задач электроэнергетических системах. Обоснование использования этих моделей базируется на вполне очевидных и приемлемых допущениях.

- Вышеупомянутая библиотека программного обеспечения MATLAB/Simulink не содержит сложных элементов со структурой с несколькими входами и несколькими выходами. Такие элементы являются энергетическими хабами. ТЭЦ может быть примером такого сложного элемента (объекта) с одним входом (газ) и двумя выходами (электроэнергия и тепло). На уровне потребления такие элементы интегрированной энергосистемы с несколькими входами включают функцию преобразования одного вида энергии в другой. Подобные модели энергетических хабов формируют специальную дополнительную библиотеку. Эти модели также реализуют такие функции, как накопление энергии и суммирование различных видов энергии.

- Виды элементов преобразования энергии: 1) изменяют характеристики энергетического канала без преобразования формы энергии в другую (например, электрический трансформатор, теплообменник и т.д.); 2) изменяют не только характеристики энергетического канала, но и преобразуют один вид энергии в другой.

- Различные виды энергии в интегрированной энергетической системе имеют разные единицы измерения ($\text{кВт} \cdot \text{ч}$, Гкал и т.д.), в связи с этим Джоуль (Дж , $\text{Вт} \cdot \text{с}$) рассматривается в качестве основной единицы измерения. Блоки преобразования различных единиц измерения к базовой единице реализованы средствами программной среды MATLAB/Simulink.

- После создания топологических моделей различных отдельных сетей энергетических систем с использованием вышеуказанных процедур необходимо соединить их друг с другом. Роль таких соединителей играют модели энергетических хабов предприятий по производству энергии (когенерационные установки, тепловые станции и т.д.) и комплексных потребителей с несколькими

видами потребляемой энергии (электроэнергия, тепло и т.д.).

- Построенная имитационная модель интегрированной энергетической системы является базовой частью для решения различных задач. Постановка конкретной решаемой задачи требует дополнительных процедур для формализации задачи и интерпретации результатов. Например, решение задачи минимизации потерь в электрической сети требует расчета потоков распределения в качестве основной процедуры и формализации алгоритма оптимизации для решения всей необходимой задачи.

После вышеуказанных процедур имитационная модель интегрированной энергосистемы с несколькими каналами энергии готова к использованию для решения различных задач.

На Рисунке 17 показана обобщенная схема методического подхода к имитационному моделированию интегрированных энергетических систем.

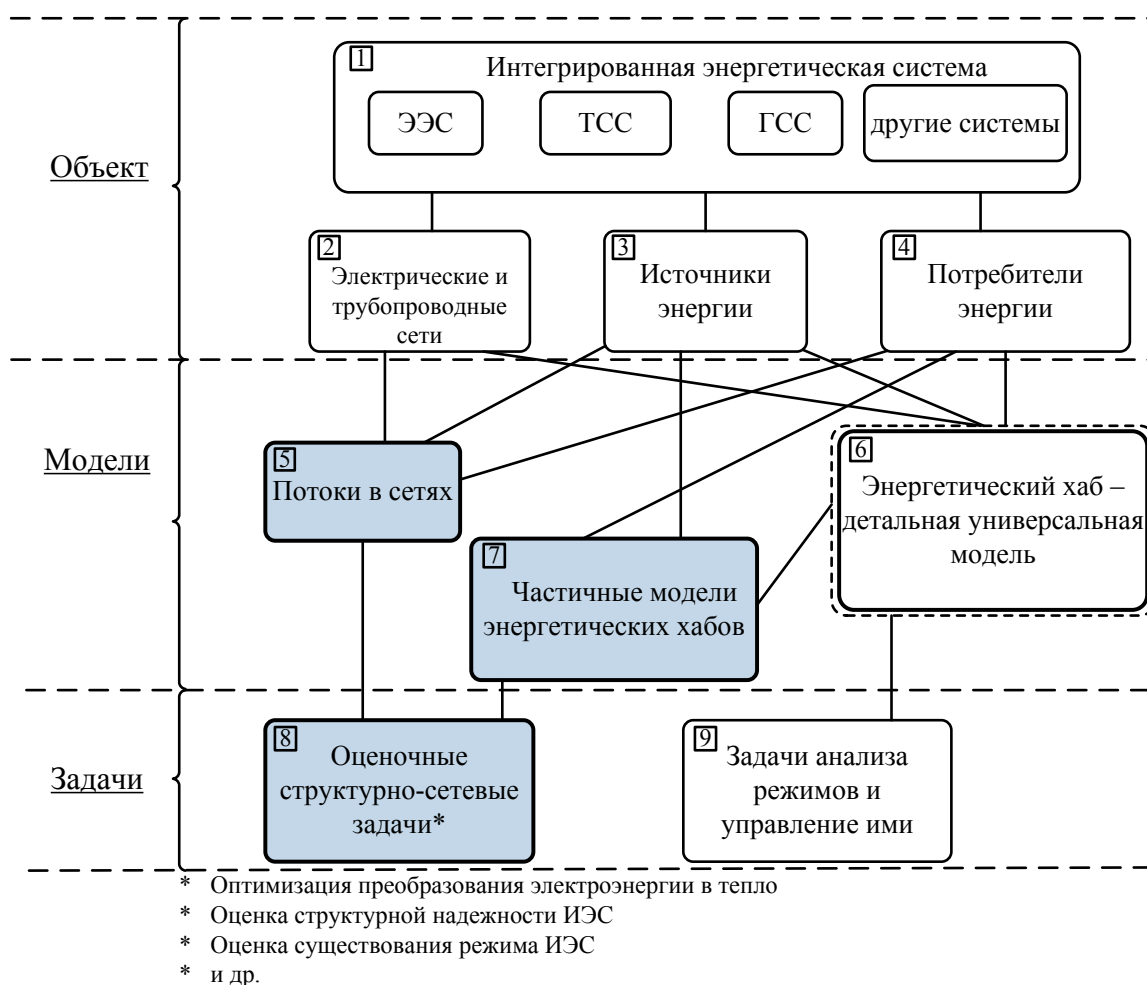


Рисунок 17 – Обобщенная схема методического подхода к имитационному моделированию интегрированных энергетических систем

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, разработанная автором совместно с Д.О. Герасимовым (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. Используемая для этого конструирования технология представлена в п.2.2. 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 представления 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).

В дополнение к изложенному представлению источников и потребителей на базовом языке программной среды MATLAB реализуются упрощенные 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, см. п. 2.4). Обоснование принятого представления сетевых элементов см. выше. На Рисунке 18 представлено ядро имитационной системы, частично реализующее модели энергетических хабов, представляющих источники энергии и потребителей энергии. Для решения конкретных задач интегрированных энергетических систем (например, оценка структурной надежности ИИЭС, и др.) требуется разработка программного интерфейса формирующего формализованное представление входного описания задачи и выходной интеграции результатов ее решения. Для этого необходимо использовать частичные модели энергетических хабов, а также учитывать потоки в сетях.



Рисунок 18 – Формализация структурно-сетевых задач

Методические основы этого подхода изложены в п. 2.3. В п. 2.5 представлена блок-схема конструирования имитационной модели в целом интегрированной энергетической системы с использованием концепции энергетического хаба в среде MATLAB/Simulink. Примеры их использования приведены в главе 3.

В работе решаются следующие задачи:

- Оценка структурной надежности радиальной электрической сети по критерию $n-1$ методом анализа путей и сечений в п.3.2.
- Оценка существования режима в интегрированной системе электро- и

теплоснабжения в п.3.3.

– Исследование структурной надежности интегрированной системы электро- и теплоснабжения по критерию $n-1$, $n-2$ в п.3.4 и п. 3.5

– Оценка возможностей преобразования электроэнергии в тепловую энергию в п.3.6.

2.2. Имитационное моделирование энергетического хаба интегрированной энергетической системы

Новые возможности интеграции систем энергоснабжения появились в связи с развитием идеологии распределенной генерации, Smart Grid, Smart Metering, Интернета «вещей» и других интеллектуальных технологий и оборудования.

На Рисунке 19 приведена обобщенная функциональная структура имитационной модели энергетического хаба для трех каналов энергоснабжения (электроэнергии, тепла и газа) [6]. Эти каналы связывают источники электрической, тепловой энергии и газа с электрическими, тепловыми и газовыми нагрузками. Внутри интегрированной энергосистемы реализуются функции передачи, преобразования и хранения различных видов энергии.

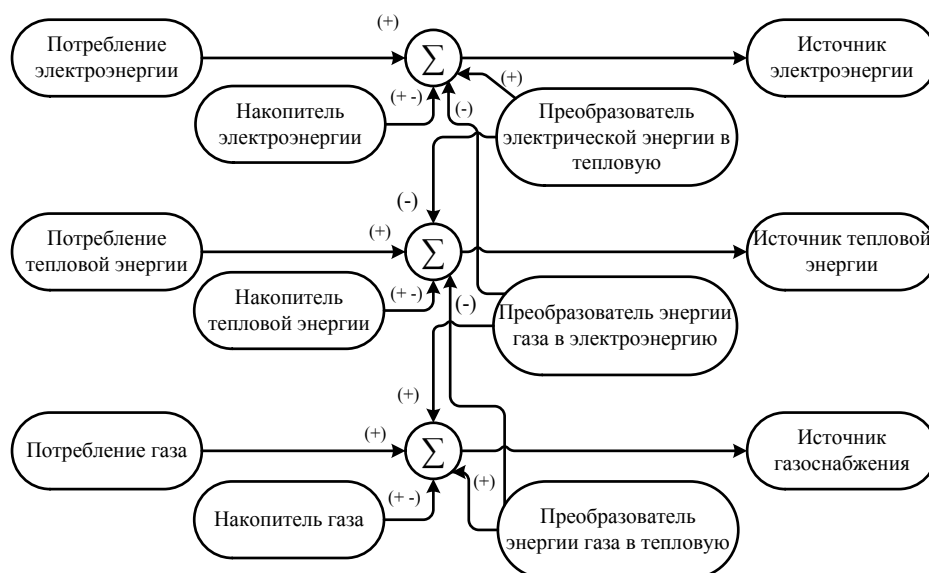


Рисунок 19 – Обобщенная функциональная структура имитационной модели энергетического хаба (каналы: 1 – электроснабжения, 2 – теплоснабжения и 3–газоснабжения)

Функциональная схема имитационной модели энергетического хаба состоит из структурных блоков. Каждый блок реализует определенную функцию. Блоки

передачи – передача энергии от одного узла к другому с учетом потерь энергии, но без преобразования (на Рисунке 19 обозначена стрелками). Блоки преобразования осуществляют трансформацию энергетических параметров (уровень напряжения трансформатора, уровень давления газа насоса и др.) без преобразования в другой вид энергии. Блоки накопителей связаны с накоплением энергии в блоке памяти. Суммирование – дополнительная важная функция для того, чтобы перераспределить энергию между различными каналами энергоснабжения (Блок суммирования на Рисунке 19). Данная функциональная схема является основой для реализации алгоритмической математической модели энергетического хаба в системе MATLAB/Simulink.

Интерактивная среда Simulink дает пользователю возможность создавать компьютерную модель, запускать на выполнение задачи, отлаживать, анализировать систему.

В пакете Simulink имеется встроенный редактор блок-схем. Он основан на графическом интерфейсе пользователя и является типичным средством визуально-ориентированного программирования. Вместо программной реализации математической модели исследуемой системы на одном из универсальных языков программирования, в Simulink используются уже готовые графические модули (блоки), из которых и составляются структурные схемы (блок-схемы) исследуемой системы. На основе таких моделей можно выполнить анализ результатов, исследовать имитационные процессы.

В браузере библиотеки блочных компонентов Simulink имеется собственная встроенная поисковая система блоков по их названию. Зная назначение блока на английском языке, можно выполнять автоматический поиск подходящих блоков. Достаточно простые элементы систем электроснабжения, газоснабжения и теплоснабжения могут быть представлены имитационными моделями из библиотеки MATLAB/Simulink. Если же нужный блок отсутствует, можно создать дополнительную библиотеку блоков. Например, для создания моделей энергетического хаба, необходимо дополнительно создать библиотеку, содержащую блоки преобразования, накопления и т.п.

Процесс моделирования средствами Simulink можно разделить на нескольких этапов. Первым этапом является составление расчетной схемы сети. Под расчетной схемой понимается схема исследуемого участка сети с нанесенными на ней параметрами, которые необходимо учесть при моделировании. Вторым этапом является компоновка модели. В результате из библиотек Simulink или дополнительно созданной библиотеки необходимо выбрать нужные блоки, разместить их в специальном окне и соединить между собой.

В качестве примера на Рисунке 20 представлена развернутая функциональная схема части обобщенной структуры имитационной модели энергетического хаба, относящаяся к каналу электроснабжения. Здесь 1, 6 – блоки прямой и обратной трансформации переменных состояния; 2, 4 – блоки передачи электроэнергии; 3 – блок, моделирующий трансформаторную подстанцию; 5 – блок, моделирующий накопитель электроэнергии.

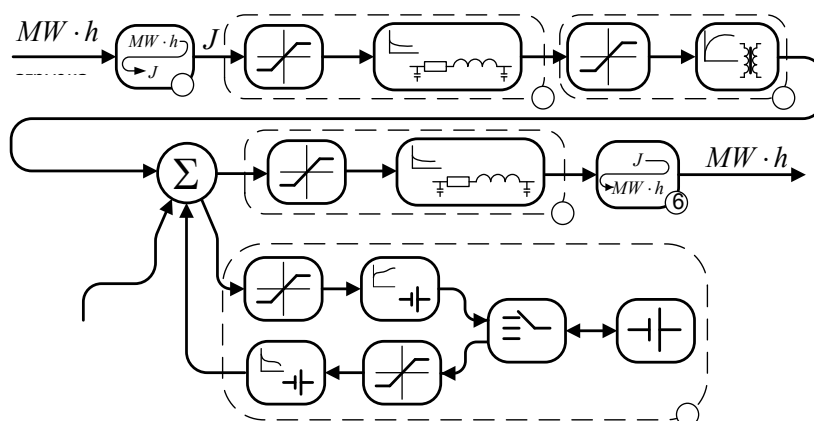


Рисунок 20 – Функциональная схема канала электроснабжения имитационной модели энергетического хаба

Данная функциональная схема канала электроснабжения учитывает особенности имитационного моделирования системы MATLAB/Simulink. В частности, правила распространения и преобразования сигналов в данной системе имитационного моделирования.

Моделирование электрической системы и системы теплоснабжения можно проводить типовыми моделями из библиотеки Simulink. Внутри энергетического хаба, исходя из вышеизложенной информации, применяются специально разработанные блоки. На Рисунке 21 приведена совмещенная схема систем

энергоснабжения и энергетического хаба по двум каналам энергоснабжения.

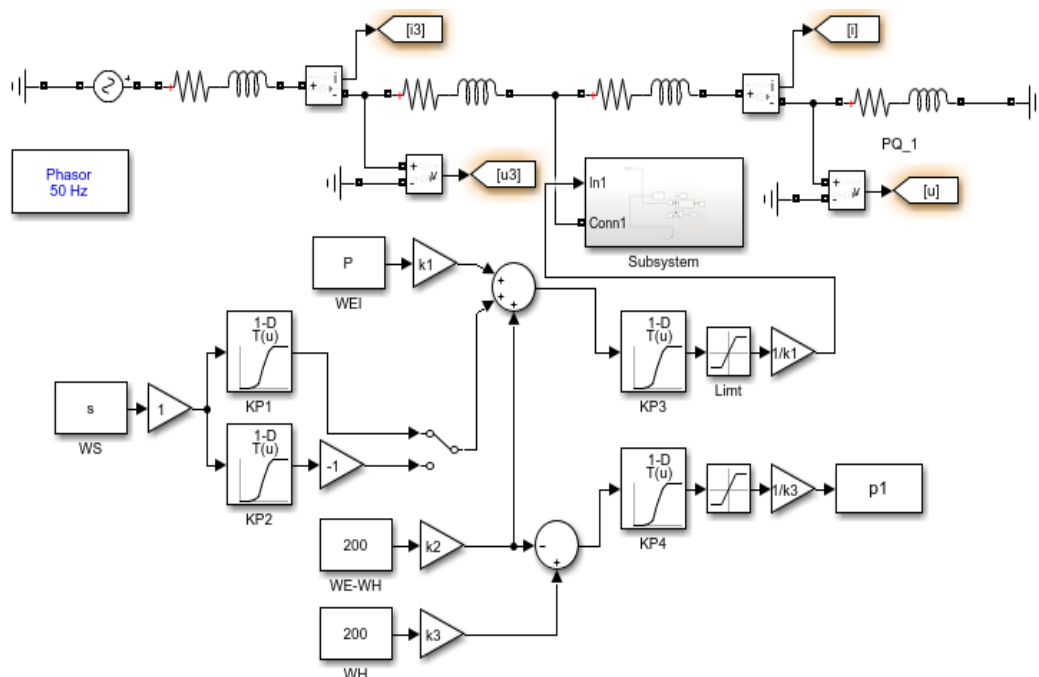


Рисунок 21 – Реализация совмещенной схемы по двум каналам энергоснабжения в MATLAB/Simulink

Система энергоснабжения моделируется типовыми блоками, используемыми из базовой библиотеки SimPowerSystems и нестандартными блоками, смоделированными самостоятельно в дополнительной библиотеке, например, блоки преобразования, накопления, подсистемы узлов и т.п..

Блоки *WEI*, *WS* – потребление, накопление энергии по каналу электроснабжения и *WH* – потребление энергии по каналу теплоснабжения. *KP1*–*KP4* – блоки, учитывающие коэффициент полезного действия преобразователя энергии. *WE-WH* – электрическая энергия, преобразуемая в тепловую.

Система MATLAB/Simulink 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.

В простейших случаях элементы интегрированной энергетической системы моделируются в основном тексте алгоритма структурирования имитационной модели, реализуемого на базовом языке системы MATLAB/Simulink.

2.3. Использование метода путей и сечений при исследовании сетевых проблем интегрированных энергетических систем

В существующей практике для анализа и управления энергосистем в основном используются детерминистские подходы, которые реализуются в виде известных методов и моделей расчета установившихся и переходных режимов. В интегрированной системе электро- и теплоснабжения предлагается использовать метод путей и сечений для иллюстрации методики оценки потокораспределения. В интегрированной энергетической системе базой является сеть, которая включает источники энергии, линии передачи, потребителей (нагрузки). Также к сети можно подключить установки дополнительного резервирования энергии (накопители) и преобразования энергии (электронагреватели).

Как следует из пункта 2.1, подход для решения сетевых проблем ИИЭС предлагается реализовать с использованием методологии потоков в сетях, рассмотренной Л. Фордом, Д. Фалкерсоном [15] и Г. Франком, И. Фришем [17]. Этим методом решается задача определения максимального установившегося потока от одной точки до другой в сети с ограничениями пропускной способности на дугах (связях). В 1955 г. данная задача была поставлена Т.Е. Харрисом, который вместе с Ф.С. Россом предложили упрощенную модель железнодорожного транспортного потока и рассмотрели именно эту специальную задачу как центральную задачу, подсказываемую этой моделью. Эта теорема позволяет найти пропускные способности (потоки) в сетях при помощи определения путей и сечений.

На основе изложенной методологии [15, 17] Ю.А. Фокин разработал методический подход для определения путей и сечений в схеме при анализе структурной надежности ЭЭС [16]. Метод поиска путей и сечений в представленной работе был адаптирован автором данной диссертации для решения задачи определения пропускных способностей сечений схемы и оценки на их основе допустимости потокораспределения в каждой из схем индивидуальных систем энергоснабжения интегрированной энергетической системы.

Модели электрической и тепловой сетей представляются соответствующими схемами, связи между узлами в которых заданы их пропускными способностями. При этом в нормальном режиме потокораспределение в схемах индивидуальных систем энергоснабжения может рассматриваться независимо для каждой системы, кроме случаев недостаточной пропускной способности связей в какой-либо из схем. В случае возникновения таких ситуаций целесообразно рассмотреть возможности резервирования за счет других систем, входящих в интегрированную систему энергоснабжения.

Для схем произвольной конфигурации в смысле надежности возникает задача определения состояний работоспособности и состояний отказа относительно узла. Элементы, входящие в такие состояния, образуют пути и сечения схемы. Показатели структурной надежности в первую очередь определяются для отдельных узлов (групп узлов) и связей системы.

Необходимым этапом расчета показателей структурной надежности сложных систем является определение путей и сечений схемы относительно узлов (узла) нагрузки. Применение принципа вынужденного пересечения максимально независимых путей создает не только возможность определения сечений ограниченного порядка, но и позволяет осуществлять декомпозицию сложных структур по надежности относительно узлов нагрузки.

Для иллюстрации метода оценки допустимости потокораспределения рассматривается электрическая схема с 7 узлами (Рисунок 22).

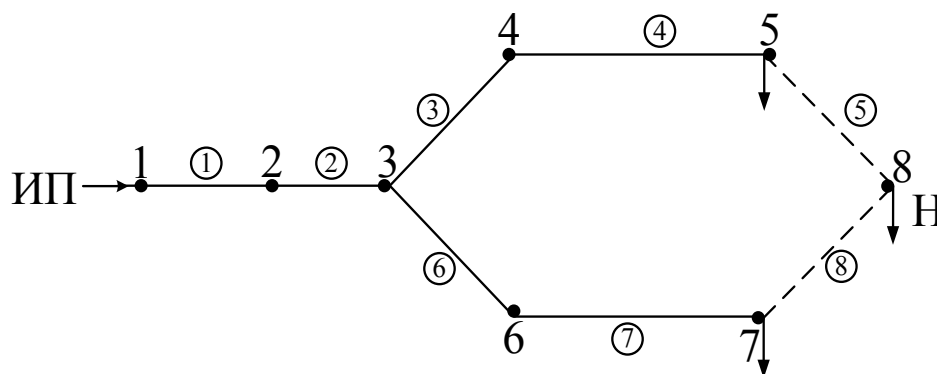


Рисунок 22 – Тестовая электрическая схема

Имеется один источник питания (ИП). Узел 8, объединяющий все нагрузки (Н), введен дополнительно. Линии к дополнительному узлу нагрузки на рисунке

обозначены пунктиром. Их пропускная способность равна величине перенесенной в дополнительный узел нагрузки. Связи между узлами задаются их пропускными способностями. Соответствие нумерации связей (ветвей) и узлов представлено в Таблице 1.

Таблица 1

Соответствие номеров связей и узлов

Номер связей	Номера узлов
①	1, 2
②	2, 3
③	3, 4
④	4, 5
⑤	5, 8
⑥	3, 6
⑦	6, 7
⑧	7, 8

Для расчета состояний отказа и безотказной работы схемы использован метод определения минимальных сечений [13, 16]. Определяются возможные сечения по матрице путей между источником питания и узлом суммарной нагрузки.

Пути схемы относительно узла (узлов) нагрузки называются минимальные совокупности элементов, безотказные состояния которых (в любой из совокупностей) обеспечивают безотказное состояние схемы (передачу электроэнергии, газа и др.) относительно узла.

Минимальными сечениями схемы называются совокупности минимального набора элементов, отказы которых в любой из совокупностей приводят к состоянию отказа схемы (прекращение передачи электроэнергии или других видов энергии) относительно узла. Иными словами, путь от источника питания до узла – это тот минимальный набор элементов схемы, который обеспечивает один из возможных самостоятельных вариантов выполнения задачи – передачи электроэнергии в узел нагрузки. Минимальные сечения относительно узла нагрузки – это тот минимальный набор элементов схемы, отказ которых приводит к отказу системы относительно узла, т. е. к прекращению передачи

электроэнергии, или тепла, или газа и др.

Между путями схемы и сечениями имеется взаимно однозначное соответствие. Зная состав путей, можно определить состав сечений схемы.

Все пути и сечения схемы необходимо представить в виде соответствующих матриц. Столбцы матрицы соответствуют элементам, строки соответствуют путям. Если элемент i входит в сечение j , то ставится 1, в противном случае – 0.

Матрица путей получается непосредственно из рассмотрения схемы. Пути на Рисунке 23 на схеме обозначены зеленым цветом.

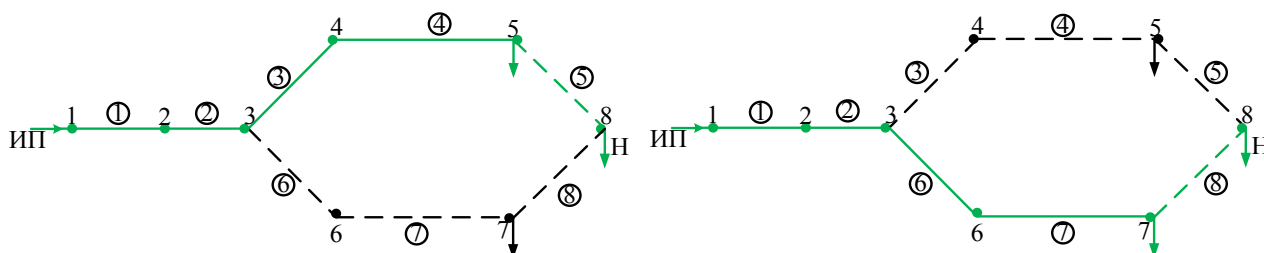


Рисунок 23 – Пути схемы

Матрица путей:

Номер связей	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
Номера узлов	1-2	2-3	3-4	4-5	5-8	3-6	6-7	7-8

$$P = \begin{matrix} P1 \\ P2 \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Из анализа матрицы можно сделать два важных вывода:

1. Если элемент входит в состав всех путей, то он образует одноэлементное сечение (любой i -й элемент входит в состав пути, следовательно, он образует i -е сечение).

2. Если элемент входит в состав всех сечений, то он образует путь.

На основе этих выводов можно получить правило взаимного перехода от путей к сечениям и наоборот. Для выявления одноэлементных сечений по матрице путей достаточно выявить ее столбец, состоящий из одних единиц (пересечение всех путей в одном элементе). Двухэлементные сечения получаются в результате логического сложения двух любых столбцов матрицы путей (пересечение всех путей в двух элементах). Если в результате получается столбец, состоящий из одних единиц, то эти два элемента образуют двухэлементное сечение. Трехэлементные сечения получаются в результате логического сложения

трех столбцов (пересечение всех путей в трех элементах) и т. д.

Для расчета применяем правила логического сложения:

$$\left. \begin{array}{l} 0 \vee 0 = 0; \\ 0 \vee 1 = 1; \\ 1 \vee 0 = 1; \\ 1 \vee 1 = 1. \end{array} \right\} \quad (6)$$

Из матрицы видно, что связи ① и ② образуют одноэлементные сечения. Складывая поэлементно столбцы содержащие 1, получим двухэлементные сечения. Полученные сечения представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Сечения

Условие	Номер связи
Не образуют сечения	③ и ④; ③ и ⑤; ④ и ⑤; ⑥ и ⑦; ⑦ и ⑧
Образуют сечения	①; ②; ③ и ⑥; ③ и ⑦; ③ и ⑧; ④ и ⑥; ④ и ⑦; ④ и ⑧; ⑤ и ⑥; ⑤ и ⑦; ⑤ и ⑧

Из расчета следует:

В схеме есть 2 пути. Всего получилось 11 сечений. Определилось 2 одноэлементных сечения (1–2, 2–3), и 9 двухэлементных сечений.

Схема с иллюстрацией сечений примет следующий вид (Рисунок 24):

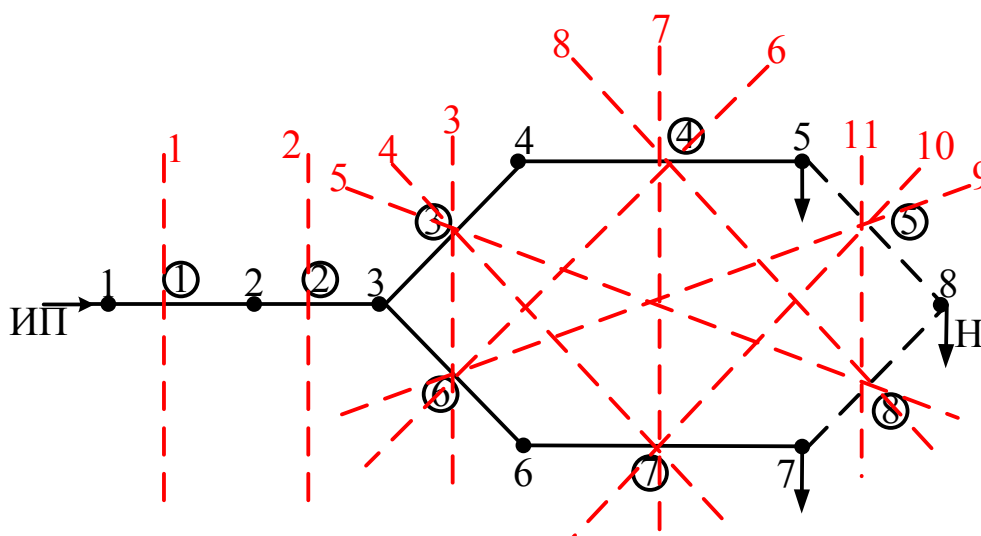


Рисунок 24 – Полученные сечения электрической схемы

Далее составляем матрицу сечений:

Номер связей	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
Номера узлов	1-2	2-3	3-4	4-5	5-8	3-6	6-7	7-8
$C1$	1	0	0	0	0	0	0	0
$C2$	0	1	0	0	0	0	0	0
$C3$	0	0	1	0	0	1	0	0
$C4$	0	0	1	0	0	0	1	0
$C5$	0	0	1	0	0	0	0	1
$C6$	0	0	0	1	0	1	0	0
$C7$	0	0	0	1	0	0	1	0
$C8$	0	0	0	1	0	0	0	1
$C9$	0	0	0	0	1	1	0	0
$C10$	0	0	0	0	1	0	1	0
$C11$	0	0	0	0	1	0	0	1

Далее производится оценка надежности сети по сечениям. Данные пропускной способности по связям представлены в матрице, (кВт):

Номер связей	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
Номера узлов	1-2	2-3	3-4	4-5	5-8	3-6	6-7	7-8
$C1$	25	0	0	0	0	0	0	0
$C2$	0	21	0	0	0	0	0	0
$C3$	0	0	15	0	0	12	0	0
$C4$	0	0	15	0	0	0	13	0
$C5$	0	0	15	0	0	0	0	10
$C6$	0	0	0	10	0	12	0	0
$C7$	0	0	0	10	0	0	13	0
$C8$	0	0	0	10	0	0	0	10
$C9$	0	0	0	0	10	12	0	0
$C10$	0	0	0	0	10	0	13	0
$C11$	0	0	0	0	10	0	0	10

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

$$\forall Ck : k \in K \left| \sum_{i,j \in I} P_{ij}^k \geq P_H, \quad (7)$$

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.

$$P_H = 10 + 10 = 20 \text{ кВт}.$$

Расчет пропускных способностей сечений:

$$\begin{aligned} P_1 &= 25 \text{ кВт}; & P_{4,7} &= 10 + 13 = 23 \text{ кВт}; \\ P_2 &= 21 \text{ кВт}; & P_{4,8} &= 10 + 10 = 20 \text{ кВт}; \\ P_{3,6} &= 15 + 12 = 27 \text{ кВт}; & P_{5,6} &= 10 + 12 = 22 \text{ кВт}; \\ P_{3,7} &= 15 + 13 = 28 \text{ кВт}; & P_{5,7} &= 10 + 13 = 23 \text{ кВт}; \\ P_{3,8} &= 15 + 10 = 25 \text{ кВт}; & P_{5,8} &= 10 + 10 = 20 \text{ кВт}. \\ P_{4,6} &= 10 + 12 = 22 \text{ кВт}; \end{aligned}$$

Для пропускных способностей всех сечений выполняется условие (7). Следовательно, потокораспределение в схеме существует, т.е. не достигаются ограничения по пропускной способности связей.

В общем виде алгоритм метода путей и сечений представлен блок-схемой на Рисунке 25.

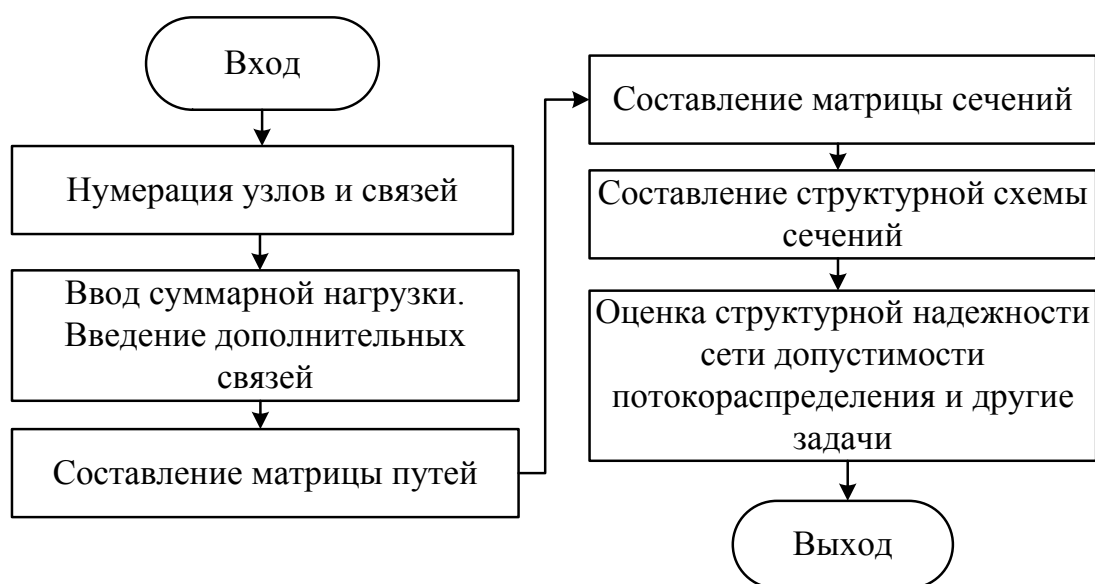


Рисунок 25 – Алгоритм метода путей и сечений при оценке структурной надежности схемы энергоснабжения

Далее для радиальной схемы производится расчёт дефицитов мощности. Отказ введенных дополнительно связей с узлом суммарной нагрузки не учитывается, так как они искусственные.

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

$$P_d^n = P_H - \left\{ \forall C_k^n : k^n \in K^n \left| \sum_{i,j \in I} P_{ij}^{kn} \right. \right\}, \quad n = \overline{1, N}, \quad (8)$$

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 $n-l$:

$$P_d = \sum_{n=1}^N P_d^n. \quad (9)$$

Средняя частота отказов системы, состоящая из n последовательно соединенных в смысле надежности независимых элементов, равна сумме частот отказов ее элементов [5]:

$$\omega = \sum_{n=1}^N \omega_i \quad (10)$$

где ω – частота устойчивых отказов, n – элементы системы.

Риск отказа связей системы рассчитывается по формуле:

$$R = \sum_{n=1}^N \omega_i \cdot \sum_{n=1}^N P_d^n \quad (11)$$

R – риск отказа связей системы.

Помимо метода, предложенного Ю.А. Фокиным и адаптированного для определения путей и сечений в схеме при анализе структурной надежности ЭЭС [16] предлагается использовать разработанный автором диссертации топологический метод анализа путей энергоснабжения для оценки структурной надежности радиальной энергетической сети по критерию $n-i$.

2.4. Топологический метод анализа путей энергоснабжения для оценки структурной надежности радиальной энергетической сети по критерию $n-i$

Топологический метод 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.

Для определения топологии связей в сети и определения дефицитов мощности сети при отказе линии реализован алгоритм, представленный на Рисунке 26.

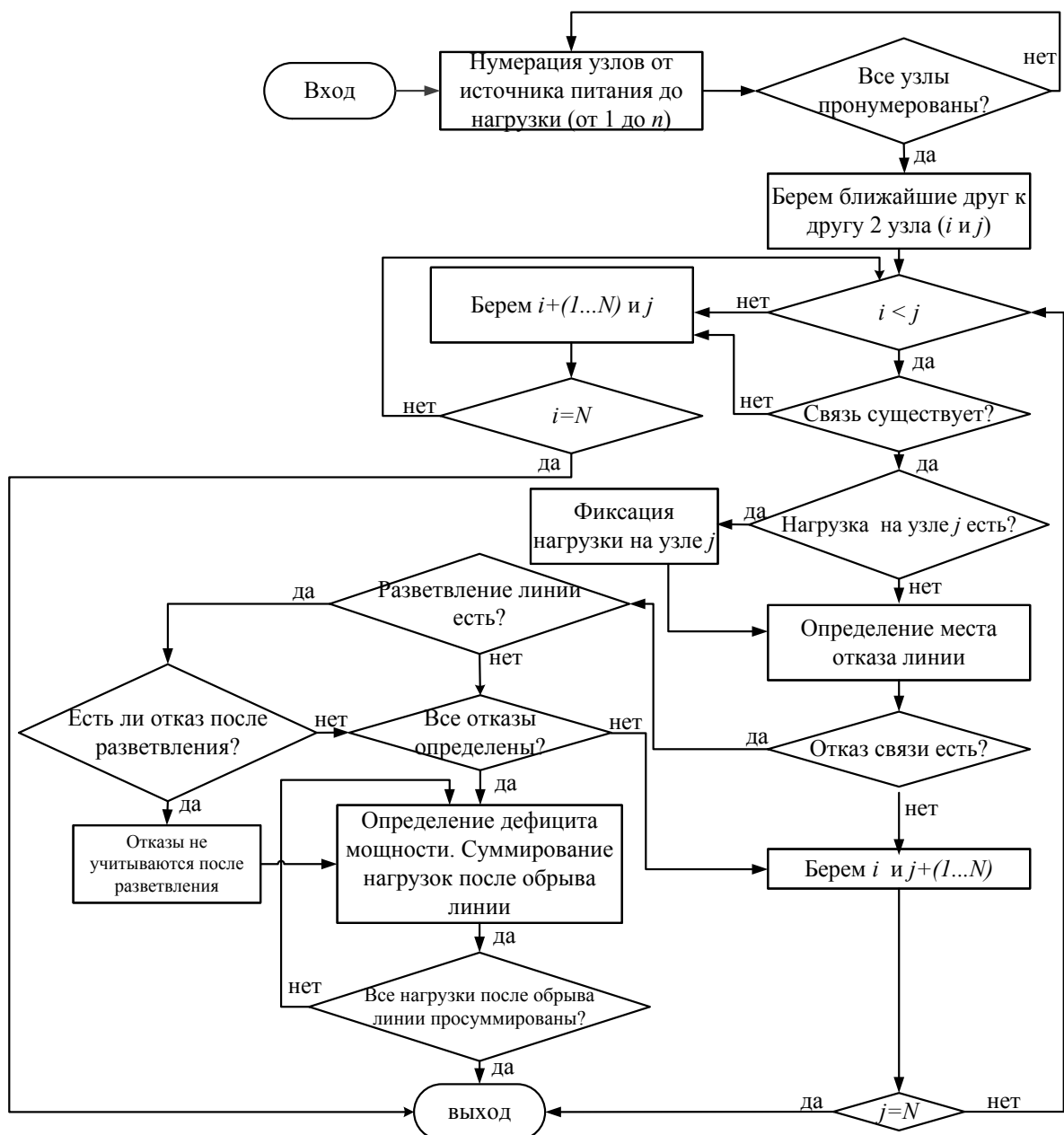


Рисунок 26 - Топологический метод анализа путей энергоснабжения

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

Рассмотрим данный алгоритм на простой радиальной схеме, представленной на Рисунке 27.

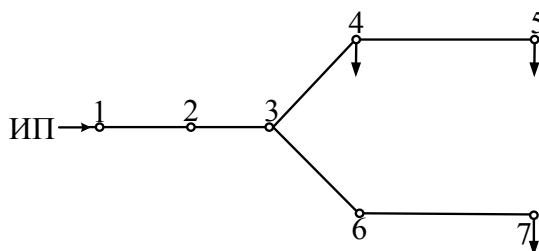


Рисунок 27 – Схема электроснабжения

Нумеруем узлы от источника питания до нагрузок от 1 до n . Рассмотрим два случая:

Отключения линии до разветвления и отключения линий после разветвления (Рисунок 28).

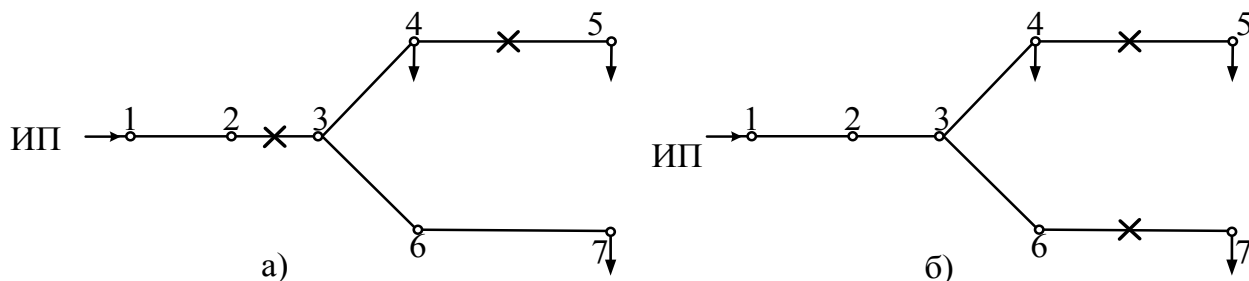


Рисунок 28 – Случаи отказов в сети

а – отказы до разветвления линии и после; б – отказы после разветвления линии

Примем нагрузку (P) в каждом узле 10 кВт. Согласно алгоритму, определяем места отключений, фиксацию нагрузки и места разветвления линий.

Определяем дефициты мощности сети.

Дефицит мощности в первом случае (а):

$$P_d = 10 + 10 + 10 = 30 \text{ кВт}$$

Дефицит мощности во втором случае (б):

$$P_d = 10 + 10 = 20 \text{ кВт}$$

Таким образом, топологический метод анализа путей энергоснабжения определяет топологию сети и дефициты мощности сети в радиальной схеме и может быть альтернативным подходом определения мест дефицитов методу путей и сечений для радиальной схемы.

2.5. Оптимизация использования потенциала преобразования электроэнергии в тепло

Также важно оценить некоторый предельный объем преобразования электроэнергии в тепло в ночное время с учетом возможностей электрической сети. Эти возможности зависят от свободных пропускных способностей связей и допустимой нагрузки трансформаторов на питающей подстанции.

Формализуем задачу оптимизации следующим образом:

целевая функция:

$$\Delta P_{FS} \rightarrow \max, \quad (12)$$

при ограничениях:

$$\Delta P_{FS} \leq \Delta P_{FSlim}, \quad (13)$$

$$P_{ij} \leq P_{ijlim}, \quad (14)$$

$$P_{kheat} \leq P_{kheatlim}, \quad (15)$$

$$\Delta P_{FS}^{l+1} = \Delta P_{FS}^l + h \frac{\Delta P_{FS}^l}{1 / \Delta P_{ij}}, \quad (16)$$

$$\Delta P_{ij} = P_{ijlim} - P_{ij}, \quad (17)$$

где ΔP_{FS} – дополнительная электрическая мощность для преобразования в тепловую; P_{ijlim} – пропускная способность ветви ij ; $P_{kheatlim}$ – пересчитанный в электрическую мощность уровень тепла для потребителя k ; h – шаг оптимизации; l – номер итерации. Второй член в правой части (16) аналогичен градиенту целевой функции.

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.

2.6. Алгоритм конструирования имитационной модели интегрированной энергетической системы

Общий подход к конструированию имитационной модели интегрированной энергетической системы и решению различных задач с ее помощью может быть представлен следующим образом [6]:

а) Исходная информация об исследуемой интегрированной энергетической системе задается в виде матриц параметров связей электрической и трубопроводной сетей (их электрических и гидравлических сопротивлений либо пропускных способностей этих связей) с привязкой этих связей к конкретным номерам узлов, а также векторов параметров узлов (нагрузки, генерация энергии, накопители энергии и т.д.).

б) Для формирования имитационной модели интегрированной системы используются две библиотеки моделей элементов: библиотека стандартных моделей ЛЭП, трубопроводов и др., находящаяся в составе программной среды MATLAB/Simulink, и библиотека специально разработанных на основе концепции энергетического хаба дополнительных моделей элементов.

в) Алгоритм конструирования имитационной модели интегрированной энергетической системы последовательно на основе анализа топологии каждой из энергетических систем, составляющих интегрированную систему, выбирает, в зависимости от типа элемента, из библиотеки стандартных моделей либо из библиотеки дополнительных моделей требуемую модель этого элемента и пристыковывает ее к нужному узлу формируемой системы.

г) Разработанные дополнительные модели, содержащие несколько входов и несколько выходов, представляют генерирующие (питающие) узлы (ТЭЦ) или нагрузочные узлы, включающие взаимосвязанное потребление нескольких альтернативных видов энергии. Эти узлы связывают отдельные энергетические системы в единую интегрированную систему.

д) При решении некоторых задач требуется дополнительная к поименованной в п. а) информация. Для таких задач необходима соответствующая модификация сформированной имитационной модели.

Моделирование электрической сети и сети теплопроводов можно проводить типовыми моделями из библиотеки Simulink. Внутри энергетического хаба, исходя из вышеизложенной информации, применяются специально разработанные блоки.

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 имитационных моделей при использовании языка системы MATLAB представлены на Рисунке 29.

На входе анализируется, все ли модели систем сформированы. Если модели всех систем сформированы, анализ завершается. Если модели систем не сформированы, то переходим к следующему шагу «Настройка алгоритма для формирования модели системы». Модели систем формируются из существующих баз данных энергетических систем, таких как электро-, тепло-, газоснабжения и других энергосистем. После настройки алгоритма производится поиск первого и последующих элементов системы. Следующим шагом является определения типа системы. Если модель элемента стандартная, то блоки элементов систем моделируются из библиотеки стандартных элементов моделей MATLAB/Simulink. В случае нестандартной модели элемента системы пристыковка хабовской модели элементов выполняется из дополнительной библиотеки элементов MATLAB/Simulink, созданной на основе концепции

энергетического хаба. Осуществляется фиксация местоположения элементов модели. Далее происходит проверка сформированности всех элементов систем. Если не все элементы найдены, происходит возвращение на шаг «Поиск очередного элемента системы». Когда модели всех систем сформированы, имитационная модель построена.

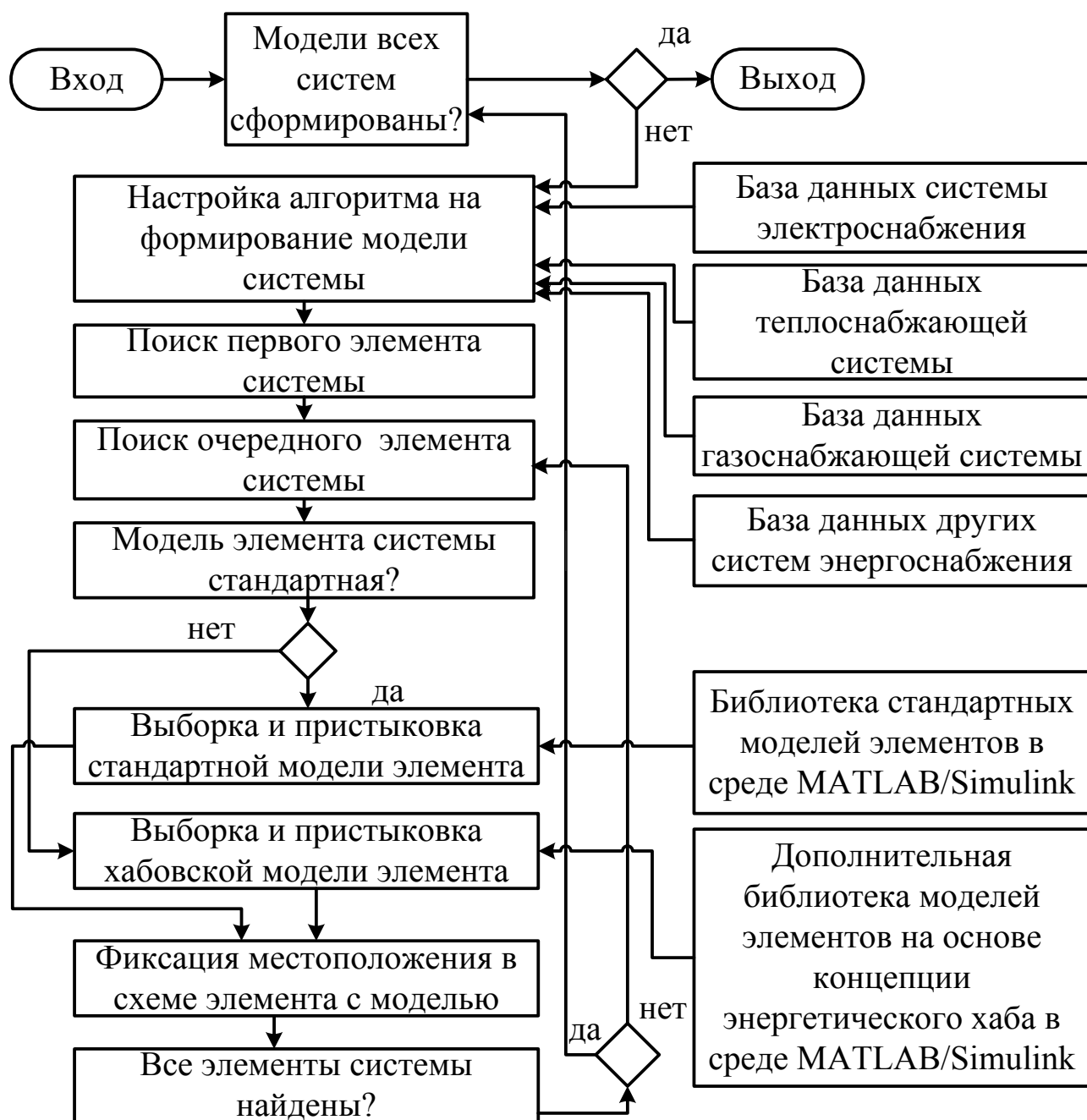


Рисунок 29 – Алгоритм конструирования имитационных моделей в среде MATLAB/Simulink

На Рисунке 30 представлен пример совмещенной схемы по двум каналам энергоснабжения [6]. Здесь черной линией обозначен канал тепловой сети, серой – канал электрической сети. Квадрат обозначает место хаба.

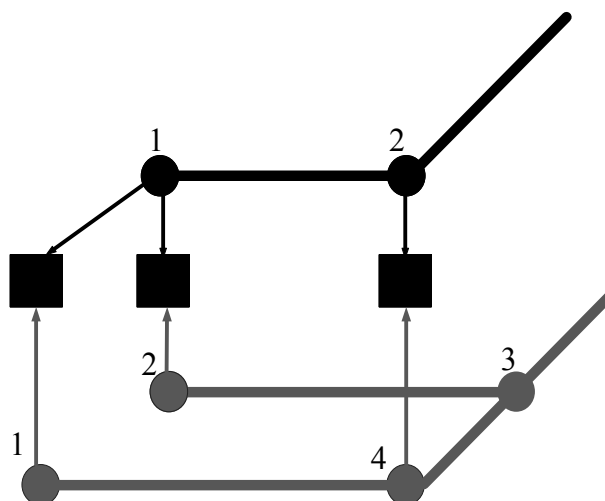


Рисунок 30 – Совмещенная схема по двум каналам энергоснабжения

Как видно из рисунка 30, к одному потребителю поступает сразу два канала энергии. При использовании систем накопления и систем преобразования электрической энергии в тепловую в данных узлах совмещенной схемы для расчета режимов энергоснабжения целесообразно применить концепцию энергетического хаба.

Для построения имитационной модели воспользуемся компонентами пакета «Sim Power Systems» среды MATLAB. Имитацию связки «источник – линия – нагрузка» осуществляем блоками из стандартной библиотеки «Simscape» и блоками с созданной дополнительной библиотеки «Multienergy». Для наглядности узлы представлены блоками «Subsystem» (Рисунок 31).

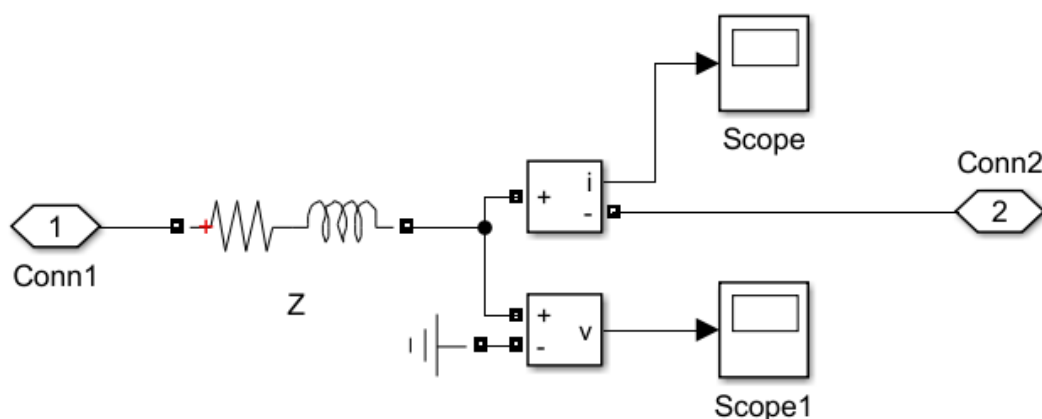


Рисунок 31 – Блок узла «Subsystem»

Для построения схемы в Matlab, при помощи стандартных блоков конструируются основные элементы схемы (Рисунок 32). Устанавливаются необходимые исходные параметры. Прописывается местоположение блоков через

функцию «position».

```
%Добавка основных блоков:
add_block('Multienergy/Ground','sys_ktn/Ground_1'); %блок "земля"
set_param('sys_ktn/Ground_1','position',[50,190,80,230]);

add_block('Multienergy/AC_V','sys_ktn/AC_V_1'); %блок "Источник"
set_param('sys_ktn/AC_V_1','position',[150,195,180,235]);
set_param('sys_ktn/AC_V_1','Amplitude',strcat(num2str(Ampl),'*sqrt(2)'));
set_param('sys_ktn/AC_V_1','frequency','50');
Ground_1Handles = get_param('sys_ktn/SeriesGround_1','PortHandles')
AC_V_1PortHandles = get_param('sys_ktn/AC_V_1','PortHandles')
add_line('sys_ktn',Ground_1PortHandles.RConn(1), AC_V_1PortHandles.LConn(1));
```

Рисунок 32 – Добавление основных блоков схемы

Используя топологический метод анализа путей энергоснабжения, представленный в разделе 2.4, был запрограммирован цикл построения узлов (Рисунок 33). Топология узлов была взята из данных, представленных в таблице Excel.

```
for k = 1:length(i)
    if Pij(k)~=0 % не равно нулю
        %Блок последующего узла
        %add_block('Multienergy/Subsystem',['sys_ktn/Subsystem_',num2str(j(k))]);
        %Считываем позицию текущего блока:
        pos = get_param(['sys_ktn/Subsystem_',num2str(i(k))],'position');
        pos([2,4]) = pos([2,4]) + 100; % поднимаем на 100 пикселей
        set_param(['sys_ktn/Subsystem_',num2str(i(k))],'position',pos);
        Subsystem_iPortHandles = get_param(['sys_ktn/Subsystem_',num2str(i(k))],'PortHandles');
        Subsystem_jPortHandles = get_param(['sys_ktn/Subsystem_',num2str(j(k))],'PortHandles');
        add_line('sys_ktn',Subsystem_iPortHandles.RConn(1), Subsystem_jPortHandles.LConn(1));
    end
    if Pij(k)==0 % равно нулю
    end
    if j(k) <= i(k)
    end
end
```

Рисунок 33 – Цикл построения узлов в MATLAB

Соединение узлов было добавлено через функцию «add_line». Местоположение узла прописано через функцию «position», где каждый блок был сдвинут на 100 пикселей. После построения сети позиции были скорректированы вручную, для лучшего отображения. Источник электроэнергии представлен блоком «AC_V», нагрузка в узлах представлена блоком «Load». Для добавления нагрузки был отдельно прописан код для каждого узла (Рисунок 34). Данные по нагрузке взяты из исходных данных в таблице Excel.

```

%Нагрузка на 5 узле
add_block('Multienergy/Series RLC Load','sys_ktn/SeriesRLCLoad_1');
set_param('sys_ktn/SeriesRLCLoad_1','position',pos);
SeriesRLCLoad_1PortHandles = get_param('sys_ktn/SeriesRLCLoad_1','PortHandles')
Subsystem_5PortHandles = get_param('sys_ktn/Subsystem_5','PortHandles')
add_line('sys_ktn',Subsystem_5PortHandles.RConn(1), SeriesRLCLoad_1PortHandles.LConn(1));

```

Рисунок 34 – Добавление блока нагрузки

На Рисунке 35 представлена имитационная модель тестовой электрической схемы, полученная при построении в среде MATLAB/Simulink.

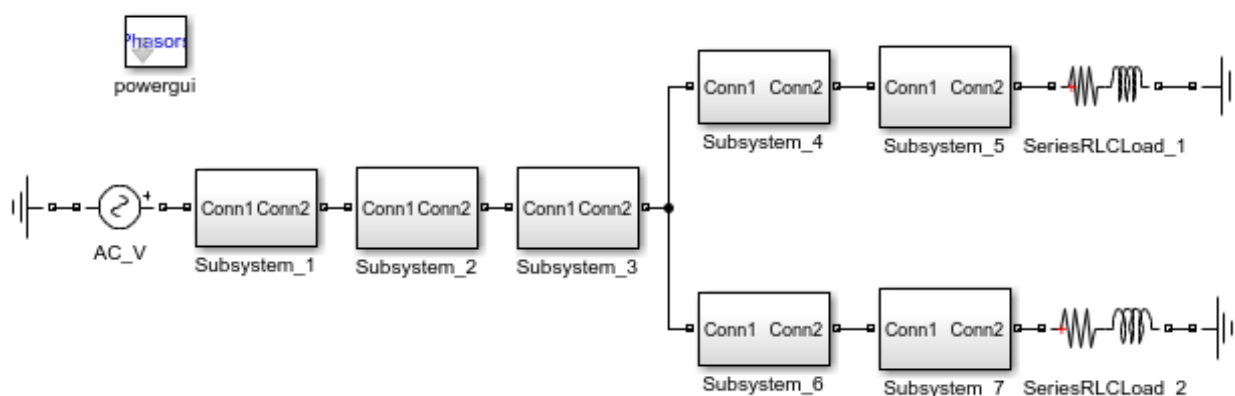


Рисунок 35 – Имитационная модель тестовой электрической схемы

Из результатов моделирования следует, что алгоритм конструирования имитационной моделей в среде MATLAB/Simulink может быть использован для программирования имитационных моделей в среде MATLAB/Simulink.

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.

2.7. Обоснование целесообразности использования имитационного подхода при решении задач интегрированных энергетических систем с помощью разработанных компьютерных средств

В основополагающей книге Р. Шеннона [18] «Имитационное моделирование систем – искусство и наука» приведен ряд условий, с учетом любого из которых целесообразно рассматривать имитационный подход и имитационное моделирование как предпочтительную технологию для решения

сложных системных задач. С точки зрения рассматриваемых в данной работе проблем из перечисленных в [18] условий наиболее актуальны следующие два:

1. Не существует законченной математической постановки рассматриваемой проблемы в виде оптимизационной задачи либо еще не разработаны аналитические методы решения сформулированной математической модели.

2. Аналитические методы имеются, но математические процедуры настолько сложны для реализации и трудоемки, что имитационное моделирование дает более простой способ решения поставленной задачи.

Приведенные условия использования имитационного подхода и имитационного моделирования при решении рассматриваемых в диссертации проблем становятся еще более актуальными с учетом многообразия используемых и разработанных дополнительно автором различных методов и алгоритмов и их взаимосвязей, что подчеркивает сложность иллюстрирующих эти разработки рисунков, приведенных в данной главе, а именно:

- Обобщенная схема методического подхода к имитационному моделированию интегрированных энергетических систем (Рисунок 17) и алгоритм конструирования имитационной модели (Рисунок 29).

- Технология конструирования модели энергетического хаба средствами программной среды MATLAB/Simulink (Рисунки 19, 20, 21).

- Библиотека стандартных простых элементов систем энергоснабжения (ЛЭП, трубопроводов и др.) в составе программной среды MATLAB/Simulink на основе базовой библиотеки SimPowerSystems.

- Библиотека специально разработанных на основе концепции энергетического хаба дополнительных элементов.

- Реализованные на базовом языке программной среды MATLAB упрощенные модели электрической и трубопроводных сетей.

- Программно-информационная среда Excel для первичной обработки и подготовки исходной информации.

Принимая во внимание изложенное, можно сделать вполне определенный вывод о том, что с учетом многообразия используемых компьютерных средств и технологий, сложности структуры их объединения, различной основы их реализации, имитационный подход и имитационное моделирование являются в данном случае единственно возможной технологией для реальной реализации целей данной диссертационной работы.

Выводы по второй главе

Моделирование интегрированных энергетических систем является прогрессивной тенденцией в развитии систем энергоснабжения. Совместное рассмотрение отдельных энергетических систем приводит к повышению экономической эффективности и надежности энергоснабжения потребителей. Концепция энергетического хаба является развивающимся способом моделирования интегрированных энергетических систем.

В этой главе представлена обобщенная схема методического подхода к имитационному моделированию интегрированных энергетических систем с использованием концепции энергетического хаба. Рассмотрены методические принципы построения имитационной модели интегрированной энергетической системы.

Новый методический подход основан на возможностях программного обеспечения MATLAB/Simulink с учетом элементов концепции 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.

Приведен пример реализации совмещенной схемы по двум каналам энергоснабжения, учитываются особенности имитационного моделирования в системе MATLAB/Simulink.

Использован метод поиска путей и сечений для решения задачи определения пропускных способностей сечений схемы и оценки на их основе

допустимости потокораспределения в каждой из схем индивидуальных систем энергоснабжения интегрированной энергетической системы. Анализ надежности системы электроснабжения относительно узла нагрузки для тестовой схемы показал, что система надежна.

Описан топологический метод анализа путей энергоснабжения для оценки надежности радиальной энергетической сети по критерию $n-i$.

Разработан алгоритм конструирования имитационной модели при использовании языка системы MATLAB.

С учетом многообразия средств для реализации задачи имитационной модели интегрированной энергетической системы сделан вывод о целесообразности использования имитационного подхода при функционировании и решении задач с применением разработанных компьютерных средств.

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.

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 37). Расчетная схема тепловой сети топологически аналогична, поскольку каждое общежитие является потребителем и электроэнергии, и тепла.

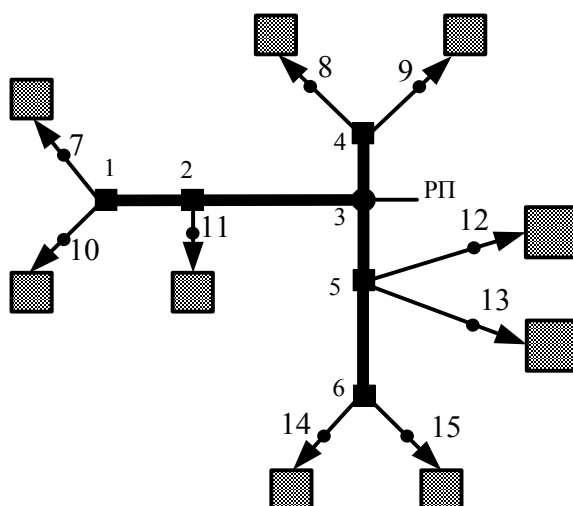


Рисунок 37 – Электрическая схема системы электроснабжения общежитий

Для некоторых задач рассматривается отдельно интегрированная система энергоснабжения в составе систем электро- и теплоснабжения блока энергорайона из 9 общежитий (Рисунок 38).

Расчетные схемы электрической и тепловой сетей интегрированной системы энергоснабжения показаны на Рисунке 38. 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 общежитиями 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. С учетом допущений связи электрической и тепловой сетей представляются их неизменными пропускными способностями.

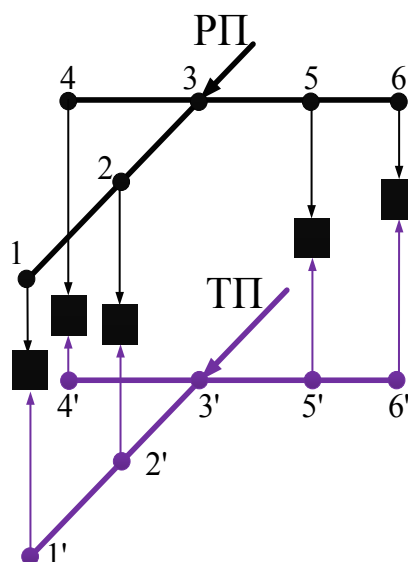


Рисунок 38 – Интегрированная система электро- и теплоснабжения блока из 9 общежитий

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 39.

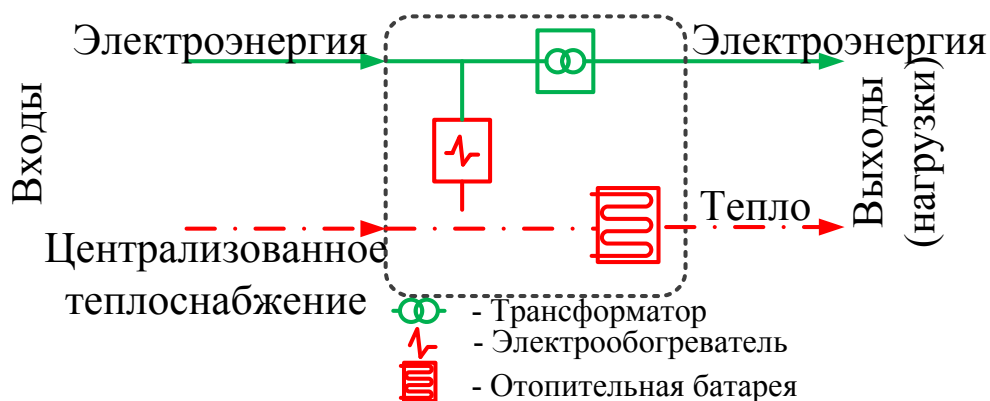


Рисунок 39 – Энергетический хаб потребителя

На рисунках 40 и 41 представлены суммарные по всему блоку общежитий годовые графики электро- и теплоснабжения, соответственно.

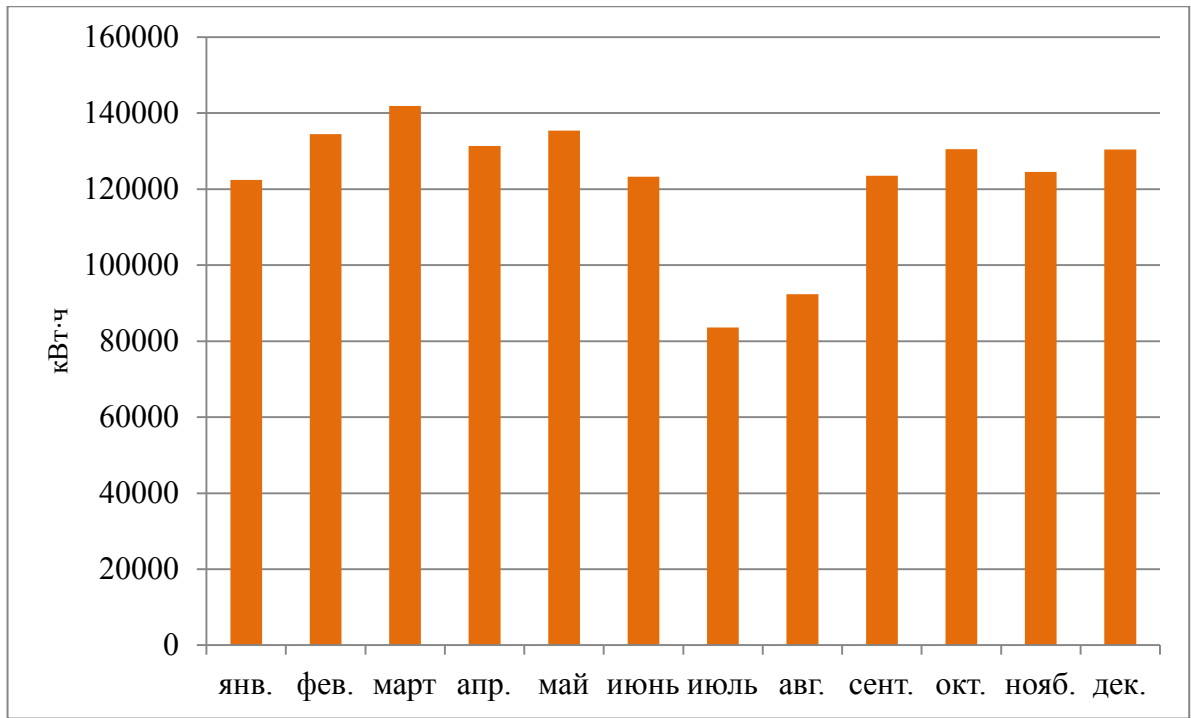


Рисунок 40 – Электропотребление 9 общежитий

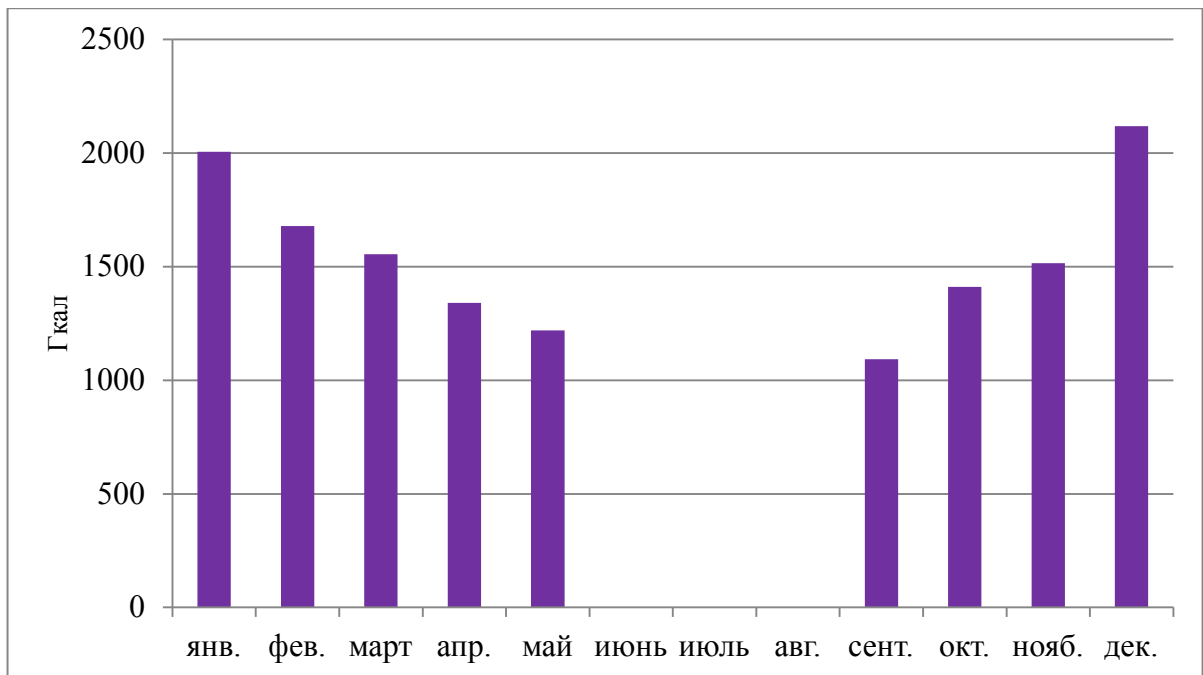


Рисунок 41 – Теплопотребление 9 общежитий

При этом принимаем, что тепловая энергия расходуется только на отопление. Суточный график тепловой нагрузки равномерный. Суточный график электрической нагрузки имеет коэффициент неравномерности, равный 0,4 (отношение значения нагрузки в период ночного минимума с 23:00 до 7:00 к значению пиковой нагрузки). Годовые графики электро- и теплопотребления

общежитий, принимаются одинаковыми.

3.2. Оценка надежности радиальной электрической сети по критерию $n-1$ методом анализа путей и сечений

Произведем оценку существования режима для системы электроснабжения. На Рисунке 42 представлена отдельно расчетная схема электрической сети микрорайона, преобразованная в соответствии с правилами, изложенными в пункте 2.3 и введением дополнительного узла суммарной нагрузки (узел 29) и связей с этим узлом. Нумерация связей выполнена в кружках. Пунктирными линиями обозначены дополнительные связи до узла суммарной нагрузки – 28-45.

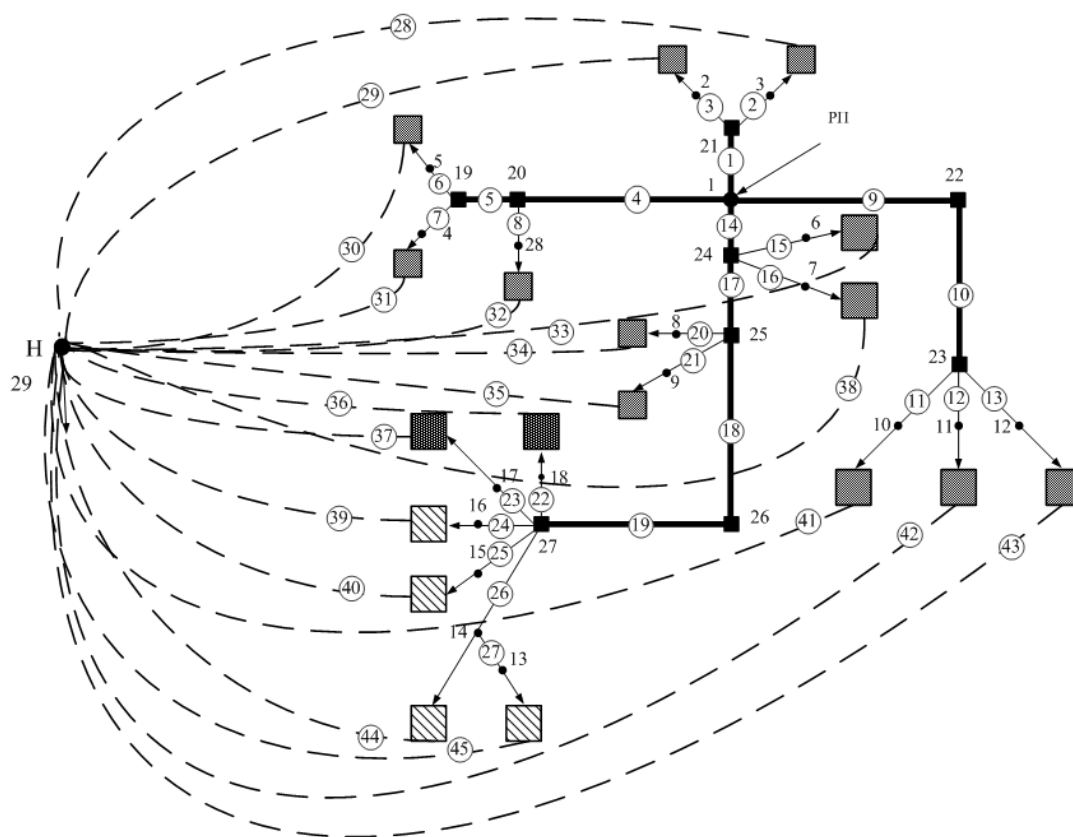


Рисунок 42 – Расчетная электрическая схема системы электроснабжения микрорайона
Составим матрицу путей согласно анализу схемы (Таблица 3).

Используя правило логического сложения (7), 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.

Таблица 3

Матрица путей схемы микрорайона

№ уз-лов	1-2 1	2-1-3	2-1-2	1-2-0	1-9-2-0	5-1-9	4-1-9	2-0-2-8	1-2-2	2-2-2-3	1-0-2-3	1-1-2-3	1-2-2-3	1-2-4	6-2-4	7-2-4	2-4-2-5	2-5-2-6	2-6-2-7	8-2-5	9-2-5	1-8-2-7	1-7-2-7	1-6-2-7	1-5-2-7	1-4-2-7	1-3-1-4	3-2-9	2-2-9	5-2-9	4-2-9	2-8-2-9	6-2-9	8-2-9	9-2-9	1-8-2-9	1-7-2-9	7-2-9	1-6-2-9	1-5-2-9	1-0-2-9	1-1-2-9	1-2-2-9	1-4-2-9	1-3-2-9			
№ свя-зей	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	5
П1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
П2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
П3	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
П4	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
П5	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
П6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
П7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
П8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
П9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
П10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
П11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
П12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
П13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
П14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
П15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
П16	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
П17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
П18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	

Для расчета пропускной способности от источника питания (РП) до нагрузки (Н) необходимо выполнить условие (7). Нагрузку общежитий принимаем равную 55 кВт, детских садов – 100 кВт, жилых домов – 15 кВт. Данные были взяты из среднего электропотребления по объектам. Расчет был выполнен в программе Microsoft Office Excel при использовании макросов.

Суммарный поток мощности по всем сечениям до узла 29 составляет:

$$P_{\Sigma} = 920 \text{ кВт}$$

Для пропускных способностей всех сечений выполняется условие (7). Далее произведем расчет дефицита мощностей по пропускным способностям сечений при безотказной работе связей схемы.

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

3.2.1. Оценка дефицитов мощности

Для оценки дефицитов мощности по сечениям необходимо определить суммарный поток мощности по всем сечениям. Для этого суммируем нагрузку по 442 750 сечениям. Суммарный поток мощности по всем сечениям – 405 218 000 кВт.

Дефициты мощности при отказах связей по критерию $n-1$ для схемы на Рисунке 42, представлены в Таблице 4.

Таблица 4

Дефицит мощности

Пропускная способность (P)	Сумма пропускных способностей связей ($\sum P$), кВт	Дефицит мощности (P_d), кВт
P при отказе связи 1	356 515 500	48 702 500
P при отказе связи 2	385 737 000	19 481 000
P при отказе связи 3	385 737 000	19 481 000

Продолжение Таблицы 4

<i>P</i> при отказе связи 4	332 164 250	73 053 750
<i>P</i> при отказе связи 5	360 943 000	44 275 000
<i>P</i> при отказе связи 6	387 508 000	17 710 000
<i>P</i> при отказе связи 7	387 508 000	17 710 000
<i>P</i> при отказе связи 8	383 080 500	22 137 500
<i>P</i> при отказе связи 9	332 164 250	73 053 750
<i>P</i> при отказе связи 10	339 469 625	65 748 375
<i>P</i> при отказе связи 11	385 737 000	19 481 000
<i>P</i> при отказе связи 12	385 737 000	19 481 000
<i>P</i> при отказе связи 13	385 737 000	19 481 000
<i>P</i> при отказе связи 14	243 452 000	161 766 000
<i>P</i> при отказе связи 15	380 897 000	24 321 000
<i>P</i> при отказе связи 16	380 897 000	24 321 000
<i>P</i> при отказе связи 17	243 716 000	161 502 000
<i>P</i> при отказе связи 18	292 930 000	112 288 000
<i>P</i> при отказе связи 19	297 330 000	107 888 000
<i>P</i> при отказе связи 20	381 018 000	24 200 000
<i>P</i> при отказе связи 21	381 018 000	24 200 000
<i>P</i> при отказе связи 22	362 978 000	42 240 000
<i>P</i> при отказе связи 23	362 978 000	42 240 000
<i>P</i> при отказе связи 24	398 882 000	6 336 000
<i>P</i> при отказе связи 25	398 882 000	6 336 000
<i>P</i> при отказе связи 26	394 658 000	10 560 000
<i>P</i> при отказе связи 27	400 994 000	4 224 000

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. Дефициты мощности при увеличении пропускной способности наиболее загруженных связей представлены в Таблице 5.

Таблица 5

Дефицит мощности при увеличении пропускной способности на коэффициент запаса

Пропускная способность (P)	Сумма пропускных способностей связей ($\sum P$), кВт	Дефицит мощности (P_d), кВт
P при отказе связи 1	459 388 188	0
P при отказе связи 2	495 428 038	0
P при отказе связи 3	495 428 038	0
P при отказе связи 4	427 997 213	0
P при отказе связи 5	464 081 338	0
P при отказе связи 6	497 730 338	0
P при отказе связи 7	497 730 338	0
P при отказе связи 8	491 974 588	0
P при отказе связи 9	427 975 075	0
P при отказе связи 10	436 010 988	0
P при отказе связи 11	495 428 038	0
P при отказе связи 12	495 428 038	0
P при отказе связи 13	495 428 038	0
P при отказе связи 14	310 134 138	95 083 863
P при отказе связи 15	489 136 038	0
P при отказе связи 16	489 136 038	0
P при отказе связи 17	310 424 538	94 793 463
P при отказе связи 18	374 321 338	30 896 663
P при отказе связи 19	380 041 338	25 176 663
P при отказе связи 20	489 293 338	0

Продолжение Таблицы 5

P при отказе связи 21	489 293 338	0
P при отказе связи 22	465 841 338	0
P при отказе связи 23	465 841 338	0
P при отказе связи 24	512 516 538	0
P при отказе связи 25	512 516 538	0
P при отказе связи 26	507 025 338	0
P при отказе связи 27	515 262 138	0

Диаграмма, показывающая наглядно как сократился дефицит мощности по связям, представлена на Рисунке 43. Как видно, дефициты мощности остались только по связям 14, 17, 18, 19.

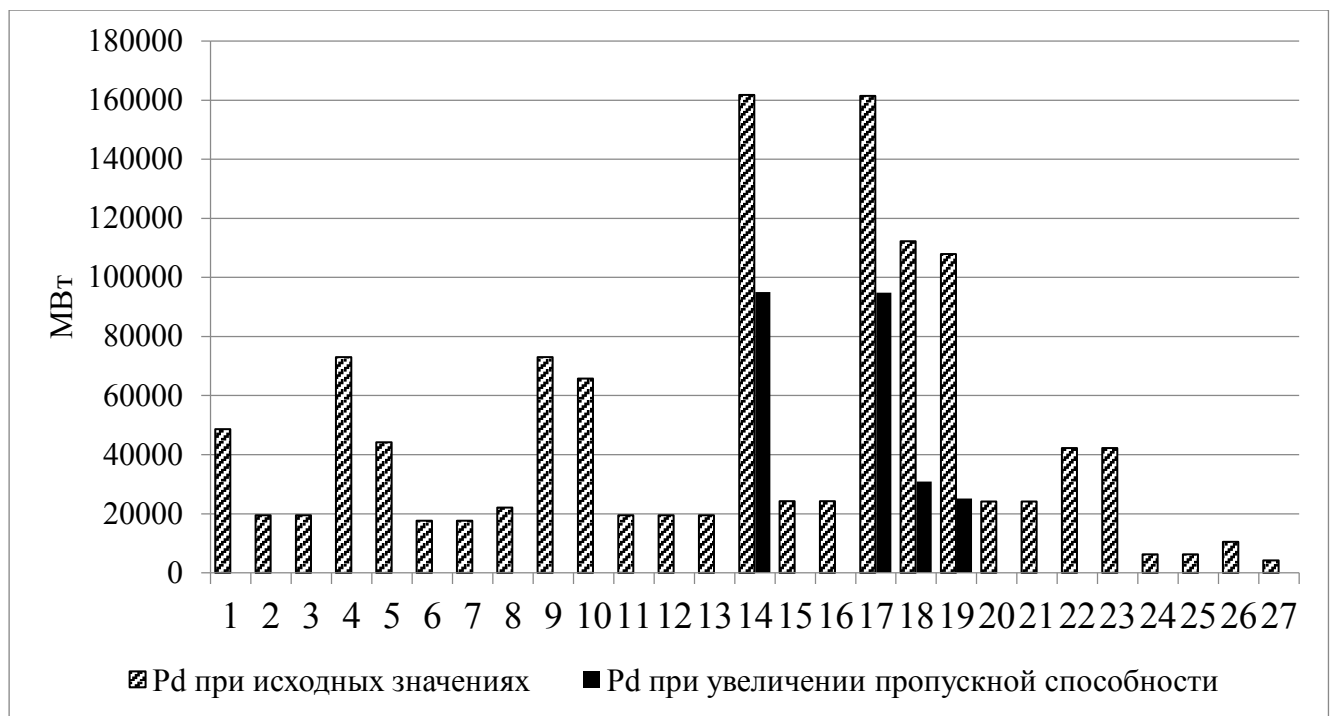


Рисунок 43 – Дефициты мощности из-за недостатка пропускных способностей сечений при оценке надежности

(1–27 – связи, P при отказе связи от 1 до 27)

Также был выполнен расчет дефицитов мощности жилого дома. К сети подключено 4 дома (узлы 14, 15, 16, 17). Подключение выполнено до «Распределительного электрического пункта», далее идет параллельная разводка

на каждую квартиру. Дом включает в себя 5 этажей, 3 подъезда, по 3 квартиры на этаже: 1, 2, 3-х комнатные соответственно. Итого на один дом приходится 45 квартир. Схема расположения представлена на Рисунке 36.

В Таблице 6 представлены пропускные способности связей, идущих от «Распределительного электрического пункта» до квартир. Для расчетов приняты одинаковые пропускные способности связей, идущих к 1, 2, и 3 –х комнатным квартирам.

Таблица 6

Пропускные способности связей жилого дома, кВт

1 подъезд		2 подъезд		3 подъезд	
№ квартиры	P	№ квартиры	P	№ квартиры	P
1	0,25	16	0,25	31	0,25
2	0,32	17	0,32	32	0,32
3	0,45	18	0,45	33	0,45
4	0,25	19	0,25	34	0,25
5	0,32	20	0,32	35	0,32
6	0,45	21	0,45	36	0,45
7	0,25	22	0,25	37	0,25
8	0,32	23	0,32	38	0,32
9	0,45	24	0,45	39	0,45
10	0,25	25	0,25	40	0,25
11	0,32	26	0,32	41	0,32
12	0,45	27	0,45	42	0,45
13	0,25	28	0,25	43	0,25
14	0,32	29	0,32	44	0,32
15	0,45	30	0,45	45	0,45

Суммарная нагрузка равна:

$$P_{\Sigma} = 15,3 \text{ кВт}$$

В Таблице 7 приведены результаты расчетов дефицитов мощности жилого дома.

Дефициты мощности жилого дома

P	ΣP , кВт	P_d , кВт	P	ΣP , кВт	P_d , кВт	P	ΣP , кВт	P_d , кВт
P при отказе 1	15,05	0,25	P при отказе 16	15,05	0,25	P при отказе 31	15,05	0,25
P при отказе 2	14,98	0,32	P при отказе 17	14,98	0,32	P при отказе 32	14,98	0,32
P при отказе 3	14,85	0,45	P при отказе 18	14,85	0,45	P при отказе 33	14,85	0,45
P при отказе 4	15,05	0,25	P при отказе 19	15,05	0,25	P при отказе 34	15,05	0,25
P при отказе 5	14,98	0,32	P при отказе 20	14,98	0,32	P при отказе 35	14,98	0,32
P при отказе 6	14,85	0,45	P при отказе 21	14,85	0,45	P при отказе 36	14,85	0,45
P при отказе 7	15,05	0,25	P при отказе 22	15,05	0,25	P при отказе 37	15,05	0,25
P при отказе 8	14,98	0,32	P при отказе 23	14,98	0,32	P при отказе 38	14,98	0,32
P при отказе 9	14,85	0,45	P при отказе 24	14,85	0,45	P при отказе 39	14,85	0,45
P при отказе 10	15,05	0,25	P при отказе 25	15,05	0,25	P при отказе 40	15,05	0,25
P при отказе 11	14,98	0,32	P при отказе 26	14,98	0,32	P при отказе 41	14,98	0,32
P при отказе 12	14,85	0,45	P при отказе 27	14,85	0,45	P при отказе 42	14,85	0,45
P при отказе 13	15,05	0,25	P при отказе 28	15,05	0,25	P при отказе 43	15,05	0,25
P при отказе 14	14,98	0,32	P при отказе 29	14,98	0,32	P при отказе 44	14,98	0,32
P при отказе 15	14,85	0,45	P при отказе 30	14,85	0,45	P при отказе 45	14,85	0,45

На Рисунке 44 представлены наглядно дефициты мощности при отказе связи подключения одной из квартир. Так как принято допущение что все дома имеют равную нагрузку, то расчеты для жилых домов одинаковые.

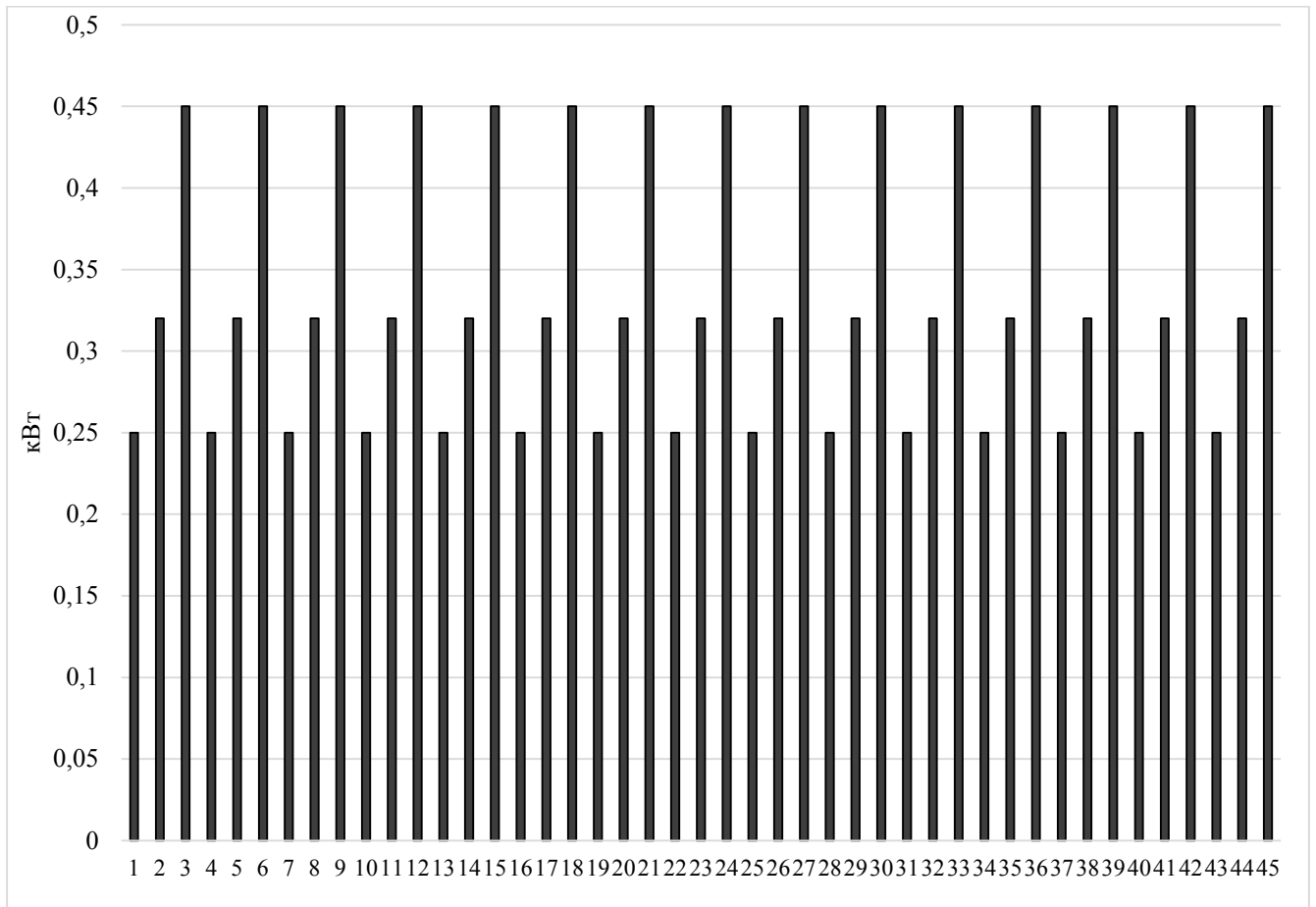


Рисунок 44 – Дефициты мощности жилого дома радиальной схемы микрорайона по критерию $n-l$ (1–45 – P при отказе связи от 1 до 45)

В следующем подразделе выполнена оценка рисков дефицитов мощности при отказах связей.

3.2.2. Оценка рисков дефицитов мощности

В случае радиальной (незамкнутой) схемы системы электроснабжения задача потокораспределения и поиск минимально необходимого уменьшения нагрузок потребителей для получения допустимого режима существенно упрощается. Произведем расчет частоты устойчивых отказов (ω) сети согласно расстоянию между узлами и определим риски отказов сети (R).

Согласно [5] показатель средней частоты устойчивых отказов ω , 1 /100 км·год:

- Номинальное напряжение до 1 кВ – 25 км·год;
- Номинальное напряжение до 6...10 кВ – 7,6 км·год.

Используя выражения (10), (11), 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 ω 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. Результаты расчетов представлены в Таблице 8.

Далее используя формулу (11), выполнен расчет риска отказа связей системы. Результаты расчета приведены также в Таблице 8.

Таблица 8

Средняя частота устойчивых отказов

Номинальное напряжение	Номера узлов	Номера связей	Расстояние, м	Расстояние, км	ω 1\100 км год	R отказов, км
6 кВ	1-21	1	50	0,05	0,000038	1850,695
0,4 кВ	3-21	2	95	0,095	0,0002375	4626,738
	2-21	3	10	0,01	0,000025	487,025
6 кВ	1-20	4	200	0,2	0,000152	11104,17
	19-20	5	40	0,04	0,0000304	1345,96
0,4 кВ	5-19	6	20	0,02	0,00005	885,5
	4-19	7	75	0,075	0,0001875	3320,625
	20-28	8	30	0,03	0,000075	1660,313
6 кВ	1-22	9	400	0,4	0,000304	22208,34
	22-23	10	200	0,2	0,000152	9993,753
0,4 кВ	10-23	11	60	0,06	0,00015	2922,15
	11-23	12	60	0,06	0,00015	2922,15

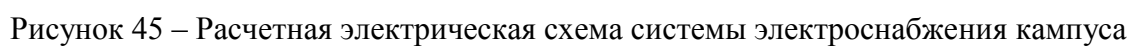
Продолжение Таблицы 8

	12-23	13	100	0,1	0,00025	4870,25
6 кВ	1-24	14	120	0,12	0,0000912	14753,06
0,4 кВ	6-24	15	30	0,03	0,000075	1824,075
	7-24	16	130	0,13	0,000325	7904,325
6 кВ	24-25	17	90	0,09	0,0000684	11046,74
	25-26	18	140	0,14	0,0001064	11947,44
	26-27	19	100	0,1	0,000076	8199,488
0,4 кВ	8-25	20	40	0,04	0,0001	2420
	9-25	21	15	0,015	0,0000375	907,5
	18-27	22	15	0,015	0,0000375	1584
	17-27	23	110	0,11	0,000275	11616
	16-27	24	60	0,06	0,00015	950,4
	15-27	25	285	0,285	0,0007125	4514,4
	14-27	26	100	0,1	0,00025	2640
	13-14	27	20	0,02	0,00005	211,2

В дальнейших исследованиях предлагается рассмотреть участок сети с высокой частотой отказов, который включает в себя 9 общежитий, и рассмотреть возможность преобразования электроэнергии в тепло в случае дифференцированных по зонам суток тарифов на электроэнергию для уменьшения рисков отказов системы. Выполнить оценку существования режима в интегрированной системе электро- и теплоснабжения по критериям $n-1$, $n-2$.

3.3. Оценка существования режима в интегрированной системе электро- и теплоснабжения

Рассмотрим поставленную задачу оценки существования режима для схемы блока общежитий (Рисунок 37) сначала для системы электроснабжения. На Рисунке 45 представлена отдельно расчетная схема электрической сети общежитий, преобразованная в соответствии с правилами, изложенными в пункте 2.3 и введением дополнительного узла суммарной нагрузки (узел 7) и связей с этим узлом. Нумерация связей выполнена в кружках. Пунктирными линиями обозначены дополнительные связи до узла нагрузки – ⑥, ⑦, ⑧, ⑨,



Номер связи	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
Номер узлов	1-2	2-3	3-4	3-5	5-6	4-7	1-7	2-7	6-7	5-7

Используя правило логического сложения (7), поэлементно складываются столбцы, содержащие 1.

Таблица 9

Номера связей, входящие в сечения

Номер сечения	Номер связей
C1	②, ③, ④
C2	②, ④, ⑥
C3	①, ③, ④, ⑧
C4	①, ④, ⑥, ⑧
C5	②, ⑤, ⑥, ⑨

Продолжение Таблицы 9

C6	②, ③, ⑤, ⑨
C7	②, ⑥, ⑨, ⑩
C8	②, ③, ⑨, ⑩
C9	③, ④, ⑦, ⑧
C10	④, ⑥, ⑦, ⑧
C11	①, ③, ⑤, ⑧, ⑨
C12	①, ③, ⑧, ⑨, ⑩
C13	①, ⑤, ⑥, ⑧, ⑨
C14	③, ⑤, ⑦, ⑧, ⑨
C15	③, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩

Далее составляем матрицу сечений согласно входящим в них связям.

Номер связи	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
Номера узлов	1-2	2-3	3-4	3-5	5-6	4-7	1-7	2-7	6-7	5-7
C1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
C2	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
C3	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0
C4	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0
C5	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
C6	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0
C7	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1
C8	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1
C9	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
C10	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0
C11	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
C12	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1
C13	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0
C14	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0
C15	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1

Сечения на схеме представлены на Рисунке 46 красным цветом.

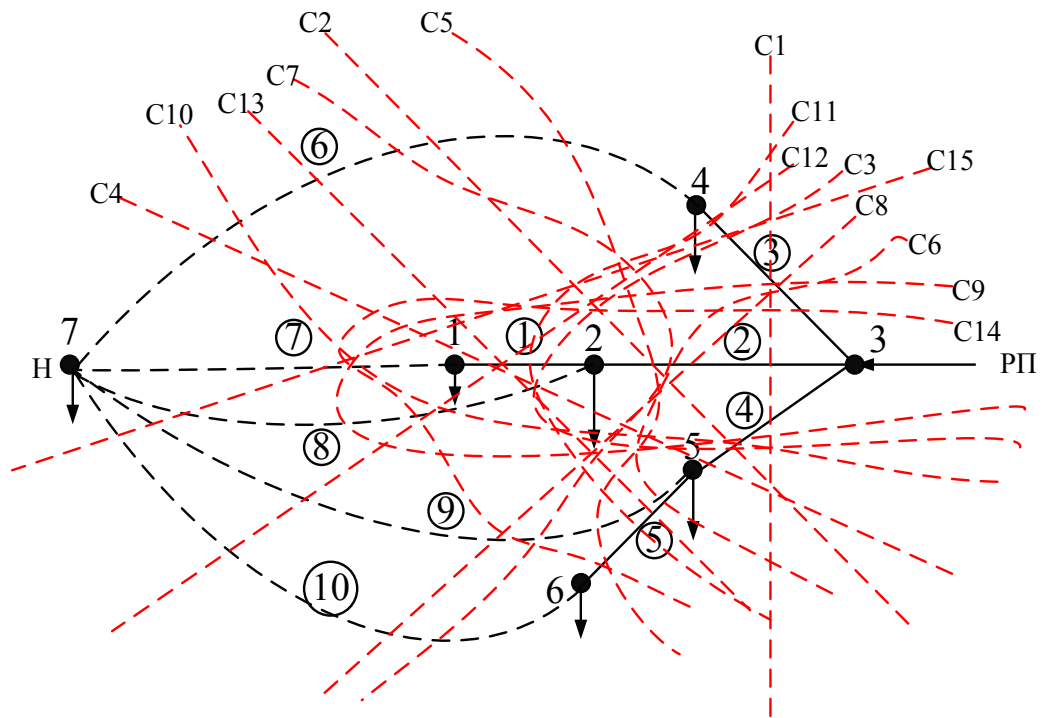


Рисунок 46 – Сечения в электрической схеме системы энергоснабжения

Далее составляем матрицу пропускных способностей связей электрической схемы, (кВт):

Номер связи	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
Номера узлов	1-2	2-3	3-4	3-5	5-6	4-7	1-7	2-7	6-7	5-7
$C1$	0	165	110	220	0	0	0	0	0	0
$C2$	0	165	0	220	0	110	0	0	0	0
$C3$	110	0	110	220	0	0	0	55	0	0
$C4$	110	0	0	220	0	110	0	55	0	0
$C5$	0	165	0	0	110	110	0	0	110	0
$C6$	0	165	110	0	110	0	0	0	110	0
$C7$	0	165	0	0	0	110	0	0	110	110
$C8$	0	165	110	0	0	0	0	0	110	110
$C9$	0	0	110	220	0	0	110	55	0	0
$C10$	0	0	0	220	0	110	110	55	0	0
$C11$	110	0	110	0	110	0	0	55	110	0
$C12$	110	0	110	0	0	0	0	55	110	110
$C13$	110	0	0	0	110	110	0	55	110	0
$C14$	0	0	110	0	110	0	110	55	110	0
$C15$	0	0	110	0	0	0	110	55	110	110

Для расчета пропускной способности от источника питания (РП) до нагрузки (Н) необходимо выполнить условие (7).

Суммарная нагрузка узла 7:

$$P_H = 110 + 110 + 55 + 110 + 110 = 495 \text{ кВт}.$$

Далее произведем расчет пропускных способностей сечений при безотказной работе связей схем (Таблица 10).

Таблица 10

Пропускные способности сечений связей без отказов в электрической схеме, кВт

Номер сечения	Пропускные способности сечений связей, кВт
C1	495
C2	495
C3	495
C4	495
C5	495
C6	495
C7	495
C8	495
C9	495
C10	495
C11	495
C12	495
C13	495
C14	495
C15	495
ΣP	7425

Для пропускных способностей всех сечений выполняется условие (7). Анализ структурной надежности в системе электроснабжения относительно узла нагрузки показал, что потокораспределение в данном режиме находится в допустимой области.

Далее произведем оценку надежности интегрированной энергетической системы для схемы теплоснабжения общежитий, представленную на Рисунке 47.

Пути и сечения схемы будут аналогичными электрической схеме.

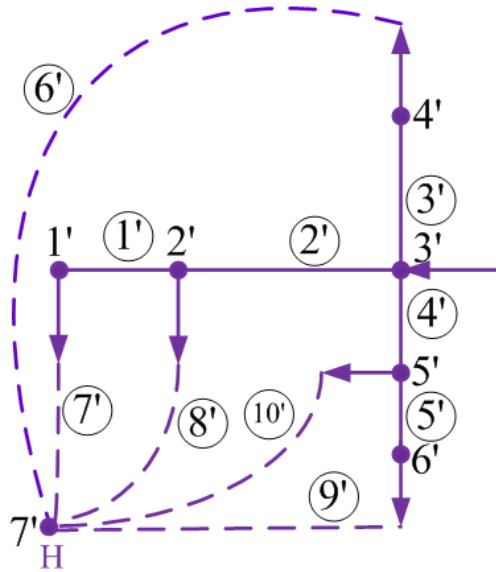


Рисунок 47 – Расчетная тепловая схема системы теплоснабжения кампуса

Соответственно, матрица путей и сечений примет такой же вид, что и в электрической схеме. Максимальное теплоснабжение одного общежития равно 8 Гкал/сутки. Это значение примем при расчете пропускных способностей участка тепловой сети. Примем за пропускную способность тепловой линии до узла нагрузки значение – 0,5 Гкал/ч.

Далее составляем матрицу пропускных способностей связей тепловой схемы, (Гкал/ч.):

Номер связи	①'	②'	③'	④'	⑤'	⑥'	⑦'	⑧'	⑨'	⑩'
Номера узлов	1'-2'	2'-3'	3'-4'	3'-5'	5'-6'	4'-7'	1'-7'	2'-7'	6'-7'	5'-7'
$C1'$	0	1,5	1	2	0	0	0	0	0	0
$C2'$	0	1,5	0	2	0	1	0	0	0	0
$C3'$	1	0	1	2	0	0	0	0,5	0	0
$C4'$	1	0	0	2	0	1	0	0,5	0	0
$C5'$	0	1,5	0	0	1	1	0	0	1	0
$C6'$	0	1,5	1	0	1	0	0	0	1	0
$C7'$	0	1,5	0	0	0	1	0	0	1	1
$C8'$	0	1,5	1	0	0	0	0	0	1	1
$C9'$	0	0	1	2	0	0	1	0,5	0	0
$C10'$	0	0	0	2	0	1	1	0,5	0	0
$C11'$	1	0	1	0	1	0	0	0,5	1	0
$C12'$	1	0	1	0	0	0	0	0,5	1	1
$C13'$	1	0	0	0	1	1	0	0,5	1	0
$C14'$	0	0	1	0	1	0	1	0,5	1	0
$C15'$	0	0	1	0	0	0	1	0,5	1	1

Для расчета пропускной способности от теплового пункта (ТП) до узла нагрузки (Н) необходимо выполнить условие (7).

Суммарная нагрузка узла 7':

$$P_H = 1 + 1 + 0,5 + 1 + 1 = 4,5 \text{ Гкал / ч.}$$

Далее произведем расчет пропускных способностей сечений при безотказной работе связей схем (Таблица 11).

Таблица 11

Пропускные способности сечений связей без отказов в тепловой сети

Номер сечения	Пропускные способности сечений связей, Гкал/ч.
C1'	4,5
C2'	4,5
C3'	4,5
C4'	4,5
C5'	4,5
C6'	4,5
C7'	4,5
C8'	4,5
C9'	4,5
C10'	4,5
C11'	4,5
C12'	4,5
C13'	4,5
C14'	4,5
C15'	4,5
ΣP	67,5

Для пропускных способностей всех сечений для системы теплоснабжения выполняется условие (7). Анализ структурной надежности относительно узла нагрузки показал, что потокораспределение тепла в данном режиме находится в

допустимой области.

3.4. Исследование структурной надежности интегрированной системы электро- и теплоснабжения по критерию $n-1$

3.4.1. Оценка при отказах в системе электроснабжения с возможностью резервирования в этой системе

Произведем оценку надежности интегрированной энергетической системы на основе критерия $n-1$ для схемы энергоснабжения общежитий, представленной на Рисунке 38.

Пропускные способности сечений при отказе связей в электрической схеме представлены в Таблице 12.

Таблица 12

Пропускные способности сечений при отказе связей в электрической схеме, кВт

Номер сечения	P при отказе связи ①	P при отказе связи ②	P при отказе связи ③	P при отказе связи ④	P при отказе связи ⑤
C1	495	330	385	275	495
C2	495	330	385	275	495
C3	385	330	385	275	495
C4	385	330	385	275	495
C5	495	330	385	275	385
C6	495	330	385	275	385
C7	495	330	385	275	385
C8	495	330	385	275	385
C9	385	330	385	275	495
C10	385	330	385	275	495
C11	385	330	385	275	385
C12	385	330	385	275	385
C13	385	330	385	275	385
C14	385	330	385	275	385
C15	385	330	385	275	385
ΣP	6435	4950	5775	4125	6435
Дефицит мощности (P_d)	990	2475	1650	3300	990

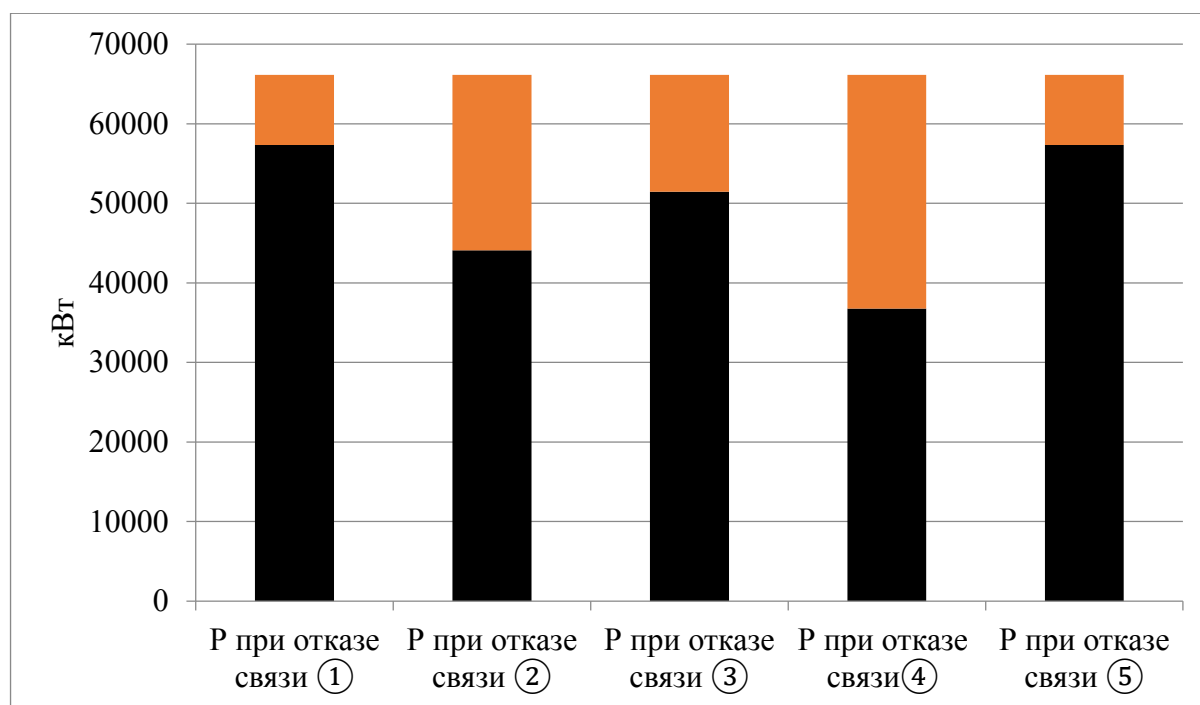


Рисунок 48 – Пропускные способности сечений при оценке надежности по критерию $n-I$ в электрической сети

На Рисунке 48 представлены пропускные способности при отказах связей в системе электроснабжения по критерию $n-I$. 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.

3.4.2. Оценка при отказах в системе теплоснабжения с возможностью резервирования в системе электроснабжения

Далее произведем оценку надежности интегрированной энергетической системы на основе критерия $n-I$ для схемы теплоснабжения общежитий. Также в тепловой сети требуется поддерживать необходимый уровень обеспечения теплом в аварийном режиме.

Оценка структурной надежности схемы по критерию $n-I$ определяется по

выражениям 9 и 10. Пропускные способности сечений при отказе связей в тепловой сети представлены в Таблице 13.

Таблица 13

Пропускные способности сечений при отказе связей в тепловой сети, Гкал/ч.

Номер сечения	P при отказе связи ①'	P при отказе связи ②'	P при отказе связи ③'	P при отказе связи ④'	P при отказе связи ⑤'
C1'	4,5	3	3,5	2,5	4,5
C2'	4,5	3	3,5	2,5	4,5
C3'	3,5	3	3,5	2,5	4,5
C4'	3,5	3	3,5	2,5	4,5
C5'	4,5	3	3,5	2,5	3,5
C6'	4,5	3	3,5	2,5	3,5
C7'	4,5	3	3,5	2,5	3,5
C8'	4,5	3	3,5	2,5	3,5
C9'	3,5	3	3,5	2,5	4,5
C10'	3,5	3	3,5	2,5	4,5
C11'	3,5	3	3,5	2,5	3,5
C12'	3,5	3	3,5	2,5	3,5
C13'	3,5	3	3,5	2,5	3,5
C14'	3,5	3	3,5	2,5	3,5
C15'	3,5	3	3,5	2,5	3,5
$\sum P$	58,5	45	52,5	37,5	58,5
Дефицит мощности (P_d)	9	22,5	15	30	9

На Рисунке 49 представлены пропускные способности сечений системы теплоснабжения при оценке структурной надежности по критерию $n-1$. Оранжевым цветом обозначены дефициты мощности по пропускной способности сечений и, соответственно, дефициты мощности для питания тепловой нагрузки. Красная линия показывает минимально допустимое значение тепловой нагрузки в аварийном режиме.

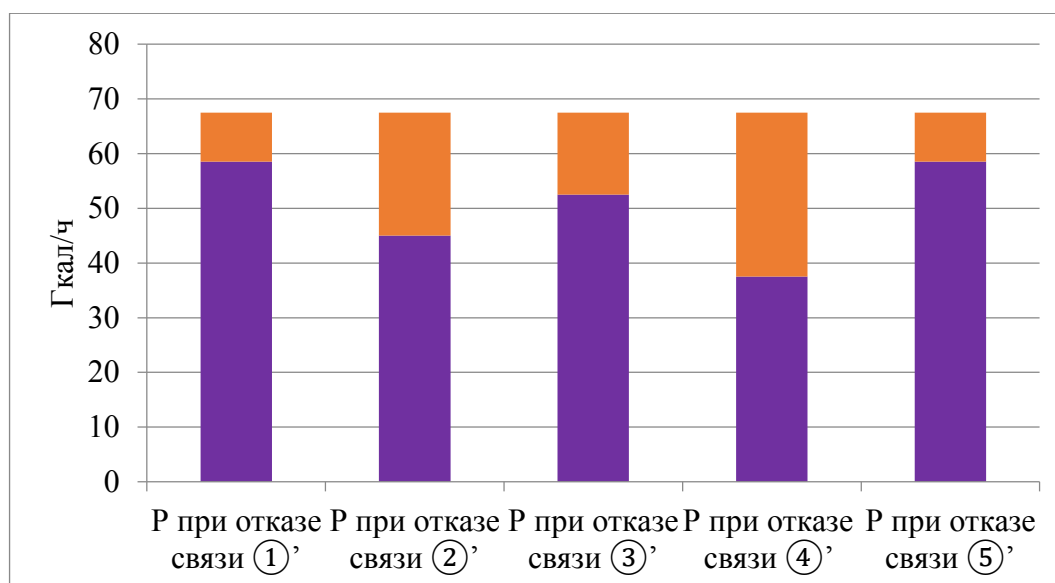


Рисунок 49 – Пропускные способности сечений при оценке надежности по критерию $n-I$ в тепловой сети

Из диаграммы видно, что при отказе связи (4) сеть не будет обеспечивать необходимый, даже минимально допустимый, уровень теплоснабжения. Очевидно, что нужно принимать меры по устранению этой ситуации. Наиболее простой путь – включить индивидуальные электронагревательные приборы в комнатах четырех общежитий – 12, 13, 14, 15. Количество жилых комнат в общежитии – 170. Потребляемая электрическая мощность каждого нагревательного прибора равна – 2 кВт. Суммарная мощность включенных нагревательных приборов будет составлять $340 \text{ кВт} \cdot 4 = 1360 \text{ кВт}$, при этом половина из них расположена в общежитиях 12 и 13, вторая половина – в общежитиях 14 и 15. Таким образом, на связь (4) схемы электроснабжения произойдет наброс нагрузки в размере 760 кВт и она будет отключена защитой от перегрузки. Вследствие этого будут обесточены общежития 12, 13, 14, 15.

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.

3.5. Исследование структурной надежности интегрированной системы электро- и теплоснабжения по критерию $n-2$

Произведем оценку надежности интегрированной энергетической системы на основе критерия $n-2$ для схемы электроснабжения общежитий представленную на Рисунке 38. Пропускные способности при отказе связей электрической схемы представлены в Таблице 14.

На Рисунке 50 представлены пропускные способности сечений схемы электроснабжения при оценке ее структурной надежности по критерию $n-2$. Оранжевым цветом обозначен дефицит мощности по пропускной способности сечений.

Таблица 14

Пропускные способности при отказе связей электрической схемы, кВт

Номер сечения	P при отказе ①, ②	P при отказе ①, ③	P при отказе ①, ④	P при отказе ①, ⑤	P при отказе ②, ③	P при отказе ②, ④	P при отказе ②, ⑤	P при отказе ③, ④	P при отказе ③, ⑤	P при отказе ④, ⑤
C1	330	385	275	495	220	110	330	165	385	275
C2	330	385	275	495	220	110	330	165	385	275
C3	330	275	165	385	220	110	330	165	385	275
C4	330	275	165	385	220	110	330	165	385	275
C5	330	385	275	385	220	110	220	165	275	275
C6	330	385	275	385	220	110	220	165	275	275
C7	330	385	275	385	220	110	220	165	275	275
C8	330	385	275	385	220	110	220	165	275	275
C9	330	275	165	385	220	110	330	165	385	275
C10	330	275	165	385	220	110	330	165	385	275
C11	330	275	165	275	220	110	220	165	275	275
C12	330	275	165	275	220	110	220	165	275	275
C13	330	275	165	275	220	110	220	165	275	275
C14	330	275	165	275	220	110	220	165	275	275
C15	330	275	165	275	220	110	220	165	275	275
ΣP	4950	4785	3135	5445	3300	1650	3960	2475	4785	4125
Дефицит (P_d)	2475	2640	4290	1980	4125	5775	3465	4950	2640	3300

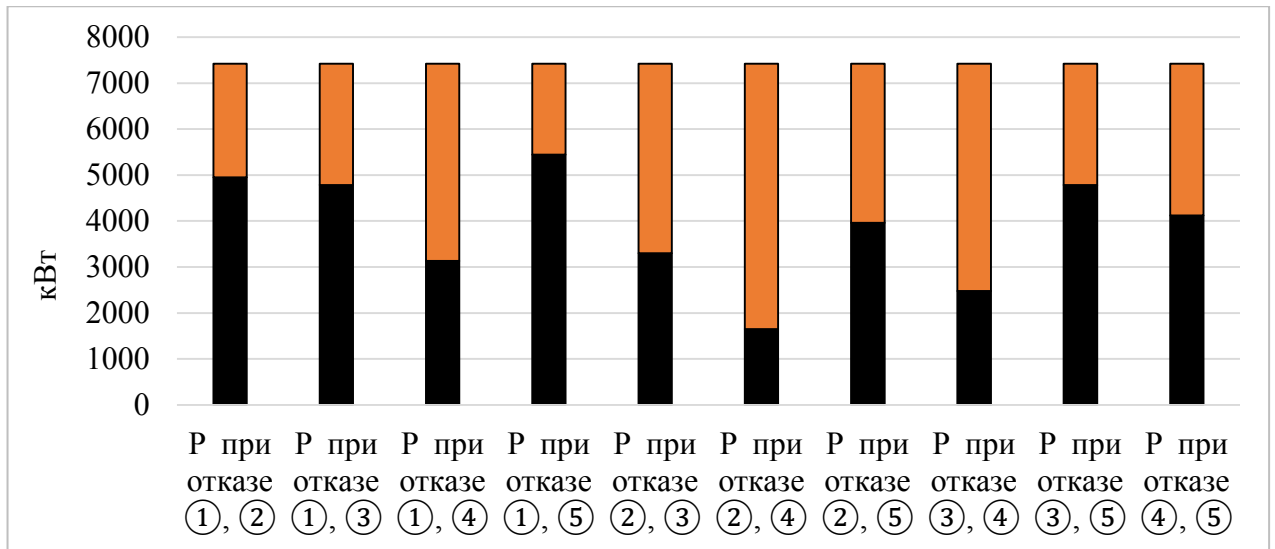


Рисунок 50 – Пропускные способности сечений по критерию $n-2$ электрической схемы

Аналогично произведем оценку надежности интегрированной энергетической системы на основе критерия $n-2$ для тепловой схемы общежитий. Пропускные способности сечений при отказе связей по критерию $n-2$ в тепловой сети представлены в Таблице 15.

Таблица 15

Пропускные способности сечений при отказе связей по критерию $n-2$ в тепловой сети, Гкал/ч.

Номер сечения	P при отказе ①', ②'	P при отказе ①', ③'	P при отказе ①', ④'	P при отказе ①', ⑤'	P при отказе ②', ③'	P при отказе ②', ④'	P при отказе ②', ⑤'	P при отказе ③', ④'	P при отказе ③', ⑤'	P при отказе ④', ⑤'
C1'	3	3,5	2,5	4,5	2	1	3	1,5	3,5	2,5
C2'	3	3,5	2,5	4,5	2	1	3	1,5	3,5	2,5
C3'	3	2,5	1,5	3,5	2	1	3	1,5	3,5	2,5
C4'	3	2,5	1,5	3,5	2	1	3	1,5	3,5	2,5
C5'	3	3,5	2,5	3,5	2	1	2	1,5	2,5	2,5
C6'	3	3,5	2,5	3,5	2	1	2	1,5	2,5	2,5
C7'	3	3,5	2,5	3,5	2	1	2	1,5	2,5	2,5
C8'	3	3,5	2,5	3,5	2	1	2	1,5	2,5	2,5
C9'	3	2,5	1,5	3,5	2	1	3	1,5	3,5	2,5
C10'	3	2,5	1,5	3,5	2	1	3	1,5	3,5	2,5
C11'	3	2,5	1,5	2,5	2	1	2	1,5	2,5	2,5
C12'	3	2,5	1,5	2,5	2	1	2	1,5	2,5	2,5

Продолжение Таблицы 15

C13'	3	2,5	1,5	2,5	2	1	2	1,5	2,5	2,5
C14'	3	2,5	1,5	2,5	2	1	2	1,5	2,5	2,5
C15'	3	2,5	1,5	2,5	2	1	2	1,5	2,5	2,5
ΣP	45	43,5	28,5	49,5	30	15	36	22,5	43,5	37,5
Дефицит мощности (P_d)	22,5	24	39	18	37,5	52,5	31,5	45	24	30

На Рисунке 51 представлены пропускные способности сечений при оценке структурной надежности схемы теплоснабжения по критерию $n-2$. Оранжевым цветом обозначен дефицит мощности по пропускной способности сечений.

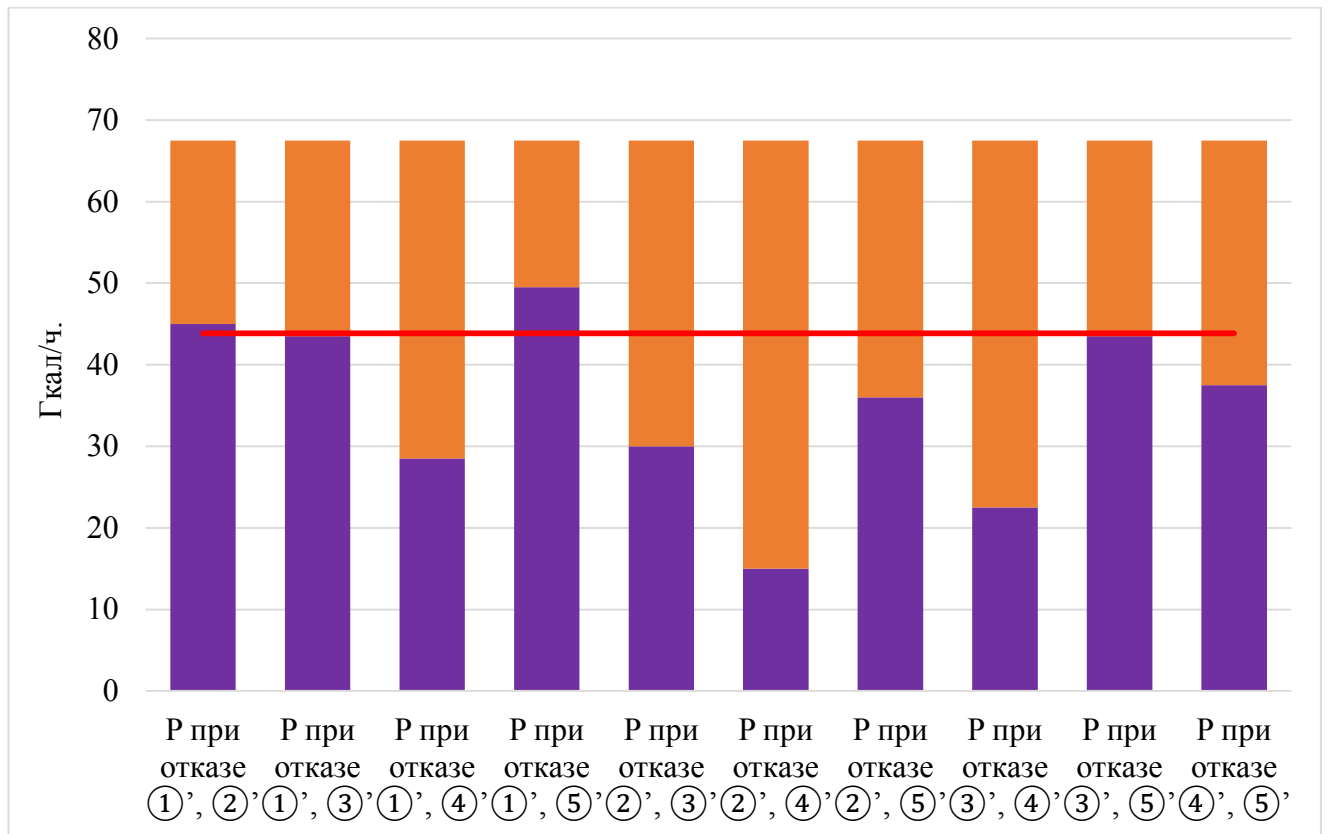


Рисунок 51 – Пропускные способности сечений при оценке структурной надежности по критерию $n-2$ тепловой сети

Из диаграммы видно, что при отказе связей (1, 4); (2, 3); (2, 4); (2, 5); (3, 4); (4, 5) сеть не будет обеспечивать даже необходимый минимальный уровень тепла. Дефициты мощности для случая отказа связей тепловой сети по критерию $n-2$ для обеспечения минимальной тепловой нагрузки при аварийном

режиме по сечениям можно уменьшить, преобразовав электроэнергию в тепло, используя электронагреватели. При отказе связей необходимо получить 15 Гкал/ч; 14 Гкал/ч; 29 Гкал/ч; 8 Гкал/ч; 21 Гкал/ч; и 6 Гкал/ч из электрической сети.

Для уменьшения дефицитов мощности по связям можно ввести дополнительные резервные линии и подключить источники резервного питания, например накопители энергии.

3.6. Оценка возможностей преобразования электроэнергии в тепловую энергию в случае дифференцированных по зонам суток тарифов на электроэнергию

В России за последние годы стоимость электроэнергии и тепла для населения, предприятий и организаций выросла в несколько раз. Плата за отопление составляет примерно четвертую часть общей суммы квитанции за коммунальные услуги. Тариф, стоимость одной единицы энергии (Гкал/м²), затрачиваемой на обогрев помещения, ежегодно повышается. Следовательно, увеличивается и размер расходов на коммунальное обслуживание для каждого потребителя. В связи с этим для потребителей актуальным становится вопрос поиска возможностей экономии при оплате за потребляемую энергию.

Для сокращения затрат на оплату энергии рассматривается преобразование электроэнергии в тепловую в интегрированной энергетической системе. Рассматривается интегрированная система энергоснабжения в составе систем электро- и теплоснабжения блока из 9 общежитий кампуса университета. Схема электрической сети интегрированной системы энергоснабжения показана на Рисунке 37. РП – питающая подстанция. Напряжение в узлах 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 – 0,4 кВ, напряжение в узлах 1, 2, 3, 4, 5, 6 – 6 кВ.

Рассматриваются условия недопущения перегрузки электрической сети. Для этого принимается, что суммарная мощность нагрузки в период ночного минимума суточного графика, включающая собственный уровень мощности плюс величину потребляемой мощности при преобразовании электроэнергии в тепло,

не должна превышать суточного максимума нагрузки. В этом случае потокораспределение в электрической сети в ночной период не превысит потокораспределения в суточный максимум нагрузки и перегрузок не будет (Рисунок 52).

В Таблице 16 приведены помесечные данные о параметрах электроснабжения потребителей кампуса университета.

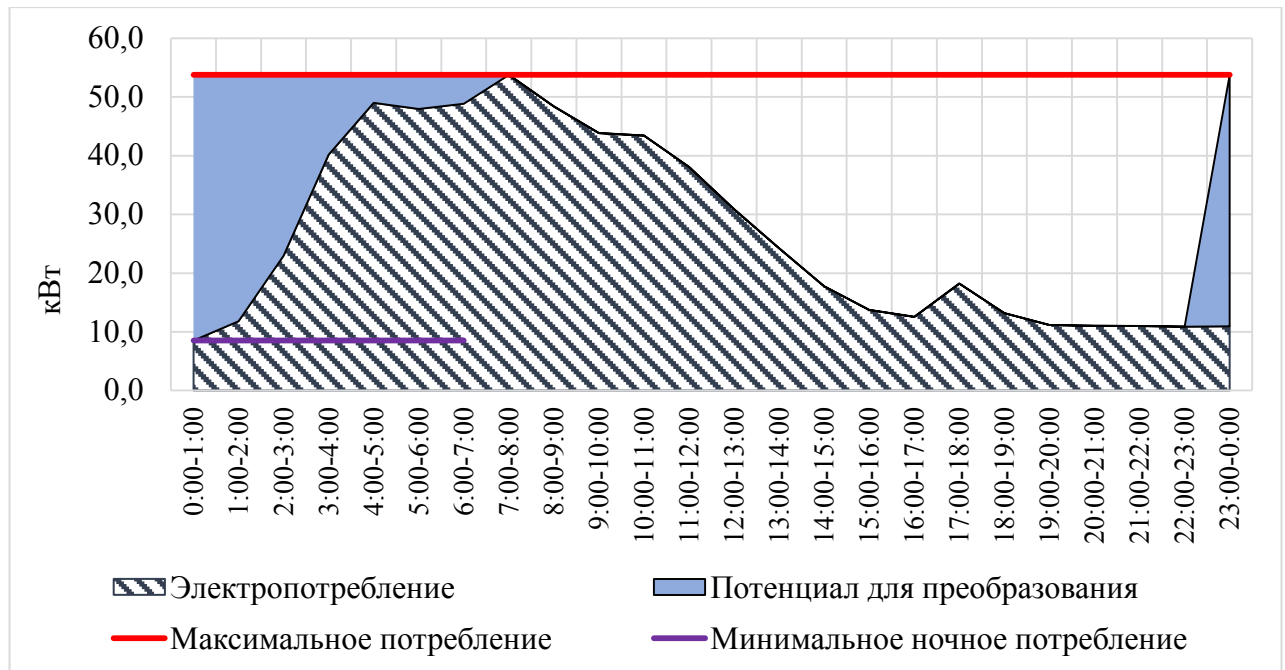


Рисунок 52 – Потенциал для преобразования электроэнергии в тепло

Таблица 16

Данные по электропотреблению 9 общежитий кампуса университета

Месяц	Электропотребление 9 общежитий, кВт·ч	Ночная зона (с 23-7), кВт·ч	Оплата за электропотребление в ночное время без учета преобразования, руб.	Суточный максимум нагрузки, кВт	Максимальное потребление электроэнергии в месяц, кВт	Количество электроэнергии (потенциал) для преобразования в тепло в месяц, кВт	50% электроэнергии для преобразования в тепло в месяц, кВт
январь	122400	47000	33900	480	343000	68000	34000
февраль	135000	50000	35600	460	331000	66000	33000
март	142000	53000	38000	420	301000	60000	30000
апрель	131400	48000	34300	390	282000	56000	28000
май	135000	50000	36000	490	352000	70000	35000

Продолжение Таблицы 16

Июнь	123300	48000	34000	440	318000	63000	31000
июль	84000	33000	24000	320	233000	46000	23000
август	92000	36000	26000	340	248000	49000	25000
сентябрь	124000	49000	35000	450	319000	63000	32000
октябрь	131000	51000	37000	410	295000	59000	29000
ноябрь	125000	49000	35000	450	324000	64000	32000
декабрь	130000	51000	36000	490	352000	70000	35000

На основании значений суточного максимума нагрузки рассчитываются величины условного максимально возможного электропотребления кампуса в месяц по формуле:

$$E_{\text{mon.max}} = (P_{\text{day.max}} \cdot 24) \cdot 30, \quad (18)$$

где $E_{\text{mon.max}}$ – максимально возможное условное значение потребления электроэнергии в месяц; $P_{\text{day.max}}$ – суточный максимум нагрузки.

Количество электроэнергии, возможной для преобразования в тепло (потенциал преобразования) определяется выражением:

$$E_p = E_{\text{mon.max}} \cdot 0,6 \cdot 0,33, \quad (19)$$

где E_p – потенциал преобразования электроэнергии в тепло в месяц; коэффициент 0,6 отражает долю свободной мощности в пределах ночного минимума нагрузки; коэффициент 0,33 определяет долю продолжительности ночного минимума суточного графика нагрузки (8 часов), в течение которого электроэнергия оплачивается по минимальному ночному тарифу.

Пересчет электроэнергии в тепло производится по соотношению:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 0,00086 \text{ Гкал} / \text{ч} \quad (20)$$

В Таблице 16 в последних двух столбцах приведены два варианта количества электроэнергии для преобразования в тепло: весь потенциал преобразования и 50% этого потенциала.

В соответствии с действующей системой ценообразования на

электроэнергию и тепло тарифы за электроэнергию дифференцированы в течение суток: льготный ночной тариф с 23:00 до 7:00 составляет 0,717 руб. за кВт·ч; тариф за тепло –1 339,34 руб./Гкал.

Стоимость электроэнергии и тепла без преобразования оцененных выше объемов электроэнергии и с ее преобразованием определяются по формулам:

$$C_e = E_p \cdot t_3, \quad (21)$$

C_e – стоимость электроэнергии до преобразования в тепловую.

$$C_m = E_t \cdot t, \quad (22)$$

t – тариф за тепло; E_t – тепловая энергия.

Справедливы следующие соотношения:

$$C_e = C_{en} + C_{ed} \quad (23)$$

$$C'_e = C_{en} + C'_{en} + C_{ed} \quad (24)$$

$$C_t = C_m + C_{td} \quad (25)$$

$$C'_t = C_m - C'_m + C_{td} \quad (26)$$

$$C'_{en} < C'_m \quad (27)$$

C_{en} – стоимость электроэнергии до преобразования в ночное время; C_{ed} – стоимость электроэнергии до преобразования в дневное время; C_t – стоимость тепловой энергии до преобразования; C_m – стоимость тепловой энергии в ночное время; C_{td} – стоимость тепловой энергии в дневное время; C'_e – стоимость электроэнергии после преобразования; C'_{en} – стоимость электроэнергии в ночное время после преобразования; C'_t – стоимость тепловой энергии после преобразования; C'_m – стоимость тепловой энергии после преобразования в ночное время.

Результаты расчетов рассматриваемых вариантов преобразования электроэнергии в тепловую представлены на рисунках 53 и 54.

Взаимодействие электрических сетей и сетей централизованного

теплоснабжения демонстрирует существенные преимущества для повышения энергоэффективности, повышения надежности и снижения эксплуатационных расходов, что выгодно для эволюции интеллектуальных сетей. Скоординированные сети электроснабжения и централизованного теплоснабжения становятся все более распространенными в городских районах.

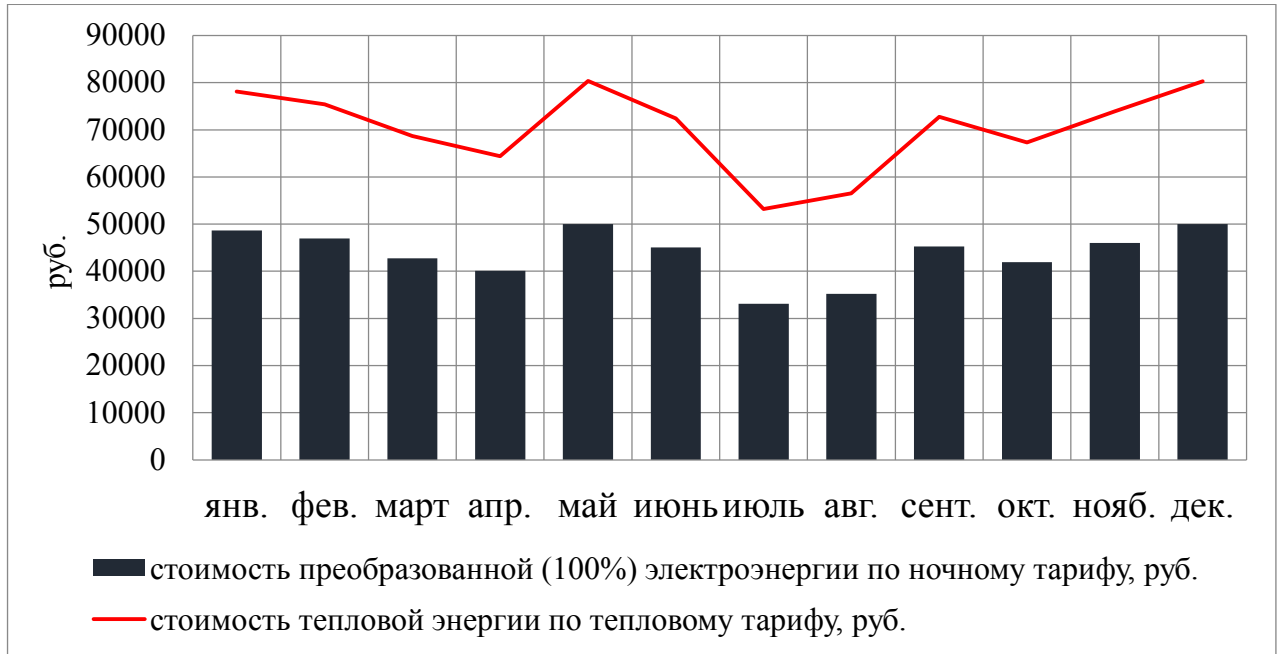


Рисунок 53 – Сравнение оплаты при учете преобразования электрической энергии в тепловую (100%)

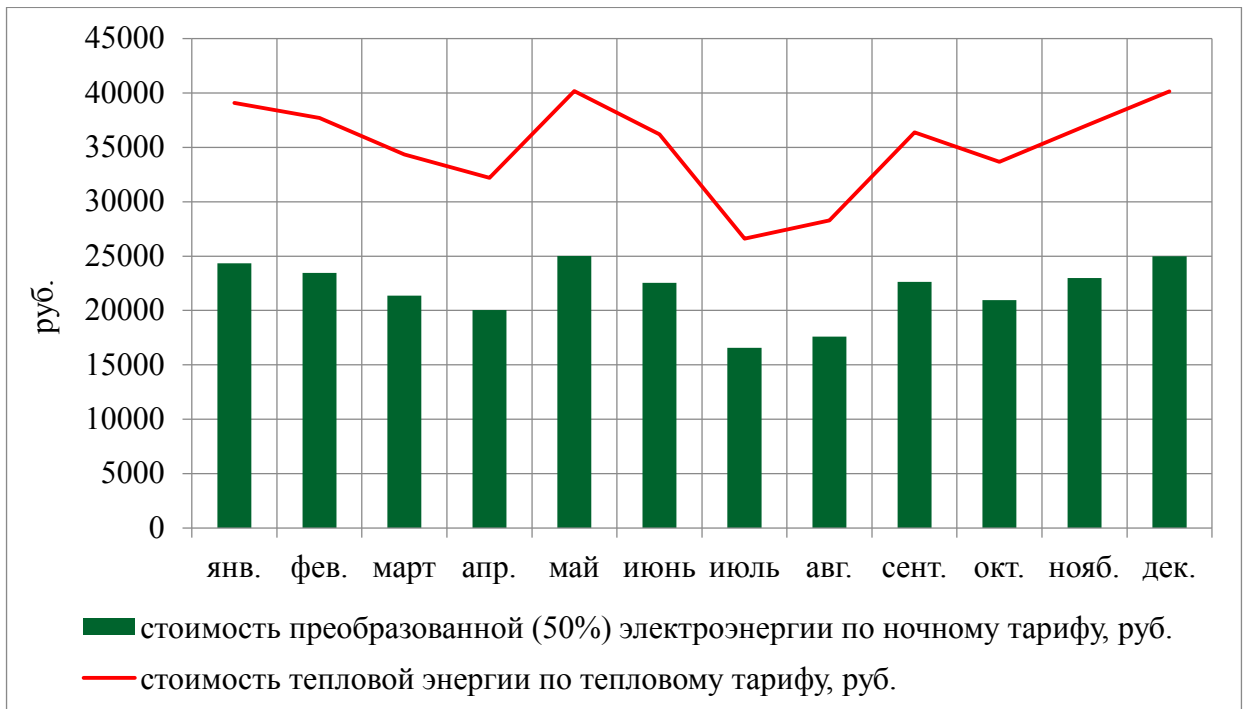


Рисунок 54 – Сравнение оплаты при учете преобразования электрической энергии в тепловую (50%)

Из расчетов видно, что используя подход интегрированной энергетической системы и льготных тарифов в ночной период времени, можно сократить затраты на 38%. Также необходимо учесть, что данный расчет был выполнен для иллюстрации концепции энергетического хаба и в расчете не были учтены затраты на покупку необходимого оборудования.

Вернемся к условию предотвращения перегрузок электрической сети. Анализ пропускной способности и загрузки отдельных линий связи применительно к схеме на Рисунке 27 в случае преобразования электроэнергии в тепло в соответствии с предполагаемым условием показывает, что эта загрузка неодинакова (см. таблицу 17).

Выполним расчет оценки некоторого предельного объема преобразования электроэнергии в тепло в ночное время с учетом возможностей электрической сети, решая оптимизационную задачу (12) – (17) п.2.5. Эти возможности зависят от свободных пропускных способностей связей и допустимой нагрузки трансформаторов на питающей подстанции. Необходимые параметры электрической сети и расчет расхода основной загрузки без учета активных потерь приведены в таблице 17. 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 17

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 (13)–(17) 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 27, 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 (13)–(17). При этом реализацию преобразования электроэнергии в тепло ограничивает малый запас пропускной способности (см. Рисунок 55).

Несколько начальных этапов оптимизации проходят по лучу 3 – 4, чтобы использовать возможность дополнительного преобразования электроэнергии в тепло, поскольку по этому лучу самый большой запас пропускной способности связи по сравнению с другими лучами. Эта ситуация аналогична наибольшему на начало расчета градиенту целевой функции. Результаты этих итераций составляют 42 кВт для потребителя 8 и 42 кВт для потребителя 9 в качестве дополнительных преобразованных объемов электроэнергии. Эти значения вдоль луча 3 – 4 являются верхними значениями для дополнительного преобразования. Следующая итерация имеет дело с лучом 2 – 3, где можно использовать 42 кВт

для потребителя 11, а остальные на этом луче 28 кВт ($235 - 165 - 42 = 28$ кВт) для потребителей 7 или 10. Итерация по лучу 3 – 5 позволяет использовать 15 кВт дополнительной преобразованной электроэнергии ($235 - 220 = 15$ кВт) для потребителей 12, или 13, или 14, или 15.

На Рисунке 55 представлен график сходимости процесса оптимизации. На оси абсцисс представлены номера связей по итерациям, на оси ординат – дополнительная в единицах мощности электроэнергии для преобразования в тепло.

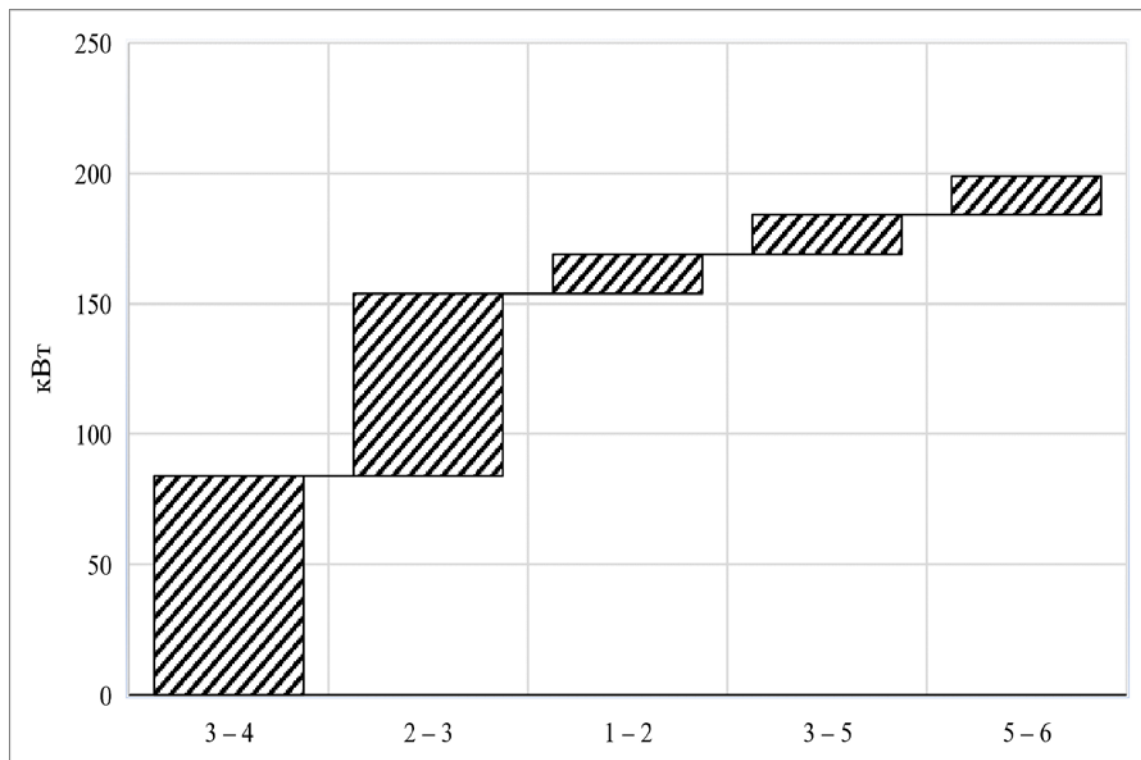


Рисунок 55 – Иллюстрация сходимости процесса оптимизации

Из расчета видно, что можно использовать потенциал электроэнергии для дополнительного преобразования в тепло. Разработка и использование имитационной модели позволяют видеть и «разыгрывать» различные процессы и ситуации. Имитационное моделирование является чрезвычайно ценным и полезным методом решения сложных задач.

Выводы по третьей главе

В третьей главе произведена оценка структурной надежности интегрированной энергетической системы энергоснабжения. Рассмотрена система электроснабжения микрорайона, а также рассмотрена интегрированная система электро- и теплоснабжения кампуса общежитий.

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. Анализ структурной надежности относительно узла нагрузки показал, что потокораспределение находится в допустимой области. Выполнена оценка надежности радиальной электрической сети по критерию $n-1$ методом анализа путей электроснабжения. Рассчитана частота отказов сети элементов. Произведена оценка надежности интегрированной энергетической системы на основе критериев $n-1$ и $n-2$. При отказе связей по критериям $n-1$, $n-2$ при преобразовании электроэнергии в тепло не покрывается полностью дефицит мощности. Предлагается ввести дополнительные резервные линии, а также подключить источники резервного питания, например накопители энергии.

Для сокращения затрат на оплату энергии рассмотрено преобразование электроэнергии в тепловую в интегрированной энергетической системе в ночной период при льготных тарифах на электроэнергию. Полученные результаты численных исследований показали, что преобразование электроэнергии в тепло существенно сокращает суммарные затраты на эти виды энергии.

Был оценен предельный объем преобразования электроэнергии в тепло в ночное время с учетом возможностей электрической сети. Так же расчеты показали, что можно использовать дополнительный потенциал электроэнергии для 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 автора

Публикации в изданиях по списку ВАК:

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. Технико-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.

Список использованных источников

1. Воропай, Н.И. Теория систем для электроэнергетиков: Учебное пособие / Н.И. Воропай // Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН. – 2000. – С. 268.
2. Воропай, Н.И. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы / Н.И. Воропай, В.А. Стенников //Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2014. – № 1. – С. 64-73.
3. Воропай, Н.И. Интегрированные энергетические системы: вызовы, тенденции, идеология / Н.И. Воропай, В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко //Проблемы прогнозирования. – 2017. – № 5. - С.39-49.
4. Воропай, Н.И. Исследование мультиэнергетического объекта методами имитационного моделирования / Н.И. Воропай, Е.В. Уколова, Д.О. Герасимов, К.В. Суслов, Пио Ломбарди, П. Комарницки //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 12 (143).
5. Воропай, Н.И. Надежность систем электроснабжения / Н.И. Воропай – Новосибирск: Наука, 2006. – 205 с.
6. 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.
7. Воропай, Н.И. Управление мощными энергообъединениями / Н.И. Воропай, В.В. Ершевич, Я.Н. Лугинский, Ю.Н. Руденко //М.: Энергоатомиздат. – 1984. – С. 256.
8. Григорьев, Л. Перспективы когенерации / Л. Григорьев, В. Гимади, А. Амирагян, И. Поминова, А. Курдин, О. Колобов, А. Мартынюк, С. Пих, А. Кутузова, С. Колобанов // Энергетический бюллетень. – 2018. – №59. – С.28.
9. Гулиев, Г.Б. Вероятностное моделирование потокораспределения в энергосистеме с распределенной генерацией и возобновляемыми источниками / Г.Б. Гулиев, Н.Р. Рахманов //Методические вопросы исследования надежности

больших систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай, А.Н. Назарычев.- СПб.: ИСЭМ СО РАН, 2015.- Вып. 65: Надежность либерализованных систем энергетики. - С. 511–516.

10. Ефимов, Д.Н. Модель потокораспределения в мультиэнергетической системе / Д.Н. Ефимов, Д.М. Быков //Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – 2019. – С. 137-146.

11. Киушкина В.Р. Проблемы автономных систем электроснабжения в индикативной оценке энергетической безопасности локальной энергозоны //Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 12-5. – С. 780-784.

12. Обухов, С.Г. Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности / С.Г. Обухов, М.А. Сурков, З.П. Хошнау //Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2011 – №2 – С. 25 – 30.

13. Папков, Б.В. Элементы теории графов в задачах электроэнергетики: учебное пособие / Б.В. Папков, А.Л. Куликов – Н.Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. – 176 с.

14. Рахманов, Н.Р. Моделирование процесса выработки мощности ветростанцией при прогнозировании режима покрытия мощности нагрузки в энергосистеме во внутрисуточных циклах / Н.Р. Рахманов, Г.Б. Гулиев, Ф.Ш. Ибрагимов //Проблемы энергетики. - 2015. - № 3. - С. 3–11.

15. Фалкерсон, Д. Потоки в сетях / Д. Фалкерсон, Л. Форд //Мир. – 1966. – 276 с.

16. Фокин, Ю.А. Надежность и эффективность сетей электрических систем / Ю.А. Фокин //М.: Высш. шк. – 1989. – 151 с.

17. Франк, Г. Сети, связь и потоки / Г. Франк, И. Фриш //под ред. Д.А. Поспелова. – 1978. – 445 с.

18. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем–искусство и наука / Р. Шеннон – 1978. – 420 с.

19. Almassalkhi, M. Optimization framework for the analysis of large-scale

networks of energy hubs / M. Almassalkhi, I. Hiskens //17th Power System Computation Conference, Stockholm, Sweden, August 22 – 26. - 2011 - P. 7.

20. Alvarado, F. Uncertainty in power system modeling and computation / F. Alvarado, Y. Hu, R. Adapa //1992 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. – IEEE, 1992. – pp. 754-760.

21. An, S. Natural gas and electricity optimal power flow / S. An, Q. Li, T.W. Gedra //2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No. 03CH37495). – IEEE, 2003. – vol. 1. – pp. 138-143.

22. Anders, G.J. Probability concepts in electric power systems. – New York: Wiley. – 1990. - pp. 455–507

23. Bakken, B.H. Energy distribution systems with multiple energy carriers / B.H. Bakken, M.M. Belsnes, J. Røystrand //District heating. – 2002. – vol. 14. – pp. 13 – 15.

24. Bakken, B.H. Energy service systems: Integrated planning case studies / B.H. Bakken, A.T. Holen //IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004. – IEEE, 2004. – pp. 2068-2073.

25. Bakken, B.H. Simulation and optimization of systems with multiple energy carriers / B.H. Bakken, A. Haugstad, K.S. Hornnes, S. Vist, B. Gustavsen, J. Røystrand //In Proceedings of the 1999 Conference of the Scandinavian Simulation Society (SIMS), Linköping, Sweden. – 1999.

26. Beccuti, G. Energy hub modelling and optimisation: an analytical case-study / G. Beccuti, T. Demiray, M. Batic N. Tomasevic, S. Vranes //2015 IEEE Eindhoven PowerTech. – IEEE, 2015. – pp. 1-6.

27. Carvalho, M. Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints / M. Carvalho, L.M. Serra, M.A. Lozano //Energy. – 2011. – vol. 36. – № 6. – pp. 3779-3790.

28. Chaudry, M. Multi-time period combined gas and electricity network optimization / M. Chaudry, N. Jenkins, G. Strbac //Electric Power System Research. - 2008. - vol. 78. - №5. - pp. 1265-1279.

29. Chen, P. Probabilistic load flow: A review / P. Chen, Z. Chen B. Bak-Jensen

//2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. – IEEE, 2008. – pp.1586-1591.

30. Chen, P. Study of power fluctuation from dispersed generations and loads and its impact on a distribution network through a probabilistic approach / P. Chen, Z. Chen, B. Bak-Jensen, R. Villafafila, S. Sorensen //2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. – IEEE, 2007. – pp. 1-5.

31. Chen, X. Robust restoration method for active distribution networks / X. Chen, W. Wu, B. Zhang //IEEE Transactions on Power Systems. – 2015. – vol. 31. – № 5. – pp. 4005-4015.

32. Dababneh, F. Integrated Electricity and Natural Gas Demand Response for Manufacturers in the Smart Grid / F. Dababneh, L. Li //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2018. – vol. 10. – № 4. – pp. 4164-4174.

33. De Mello, O.D. An integrated dispatch model of gas supply and thermoelectric systems / O.D. De Mello, T. Ohishi //Proc. 15th Power Systems Computation Conference (PSCC). – 2005.

34. Demetriou, P. System splitting strategy considering power system restoration / P. Demetriou, A. Kyriacou, E. Kyriakides, C. Panayiotou //2017 IEEE Manchester PowerTech. – IEEE, 2017. – pp. 1-6.

35. Dimitrijevic, S. An innovative approach for solving the restoration problem in distribution networks / S. Dimitrijevic, N. Rajakovic //Electric Power Systems Research. – 2011. – vol. 81. – № 10. – pp. 1961-1972.

36. Geidl, M. A greenfield approach for future power systems / M. Geidl, P. Favreperrod, B. Klöckl, G. Koeppel //Proc. of Cigre General Session. – vol. 41. – 2006. - P. 136.

37. Geidl, M. Energy hubs for the future / M. Geidl, G. Koeppel, P. Favre-Perrod, B. Klockl, G. Andersson, K. Frohlich //IEEE power and energy magazine. – 2006. – vol. 5. – № 1. – pp. 24-30.

38. Geidl, M. Operational and topological optimization of multi-carrier energy systems / M. Geidl, G. Andersson //2005 International Conference on Future Power Systems. – IEEE, 2005. – P. 6.

39. Geidl, M. Optimal coupling of energy infrastructures / M. Geidl, G. Andersson //2007 IEEE Lausanne Power Tech. – IEEE, 2007. – pp. 1398-1403.
40. Geidl, M. Optimal power flow of multiple energy carriers / M. Geidl, G. Andersson //IEEE Transactions on power systems. – 2007. – vol. 22. – № 1. – pp. 145-155.
41. Geidl, M. The energy hub—a powerful concept for future energy systems / M. Geidl, G. Koeppel, P. Favre-Perrod, B. Klöckl, G. Andersson, K. Fröhlich //Third annual Carnegie mellon conference on the electricity industry. – 2007. – vol. 13. – P. 14.
42. Gentle, J. E. Random Number Generation and Monte-Carlo Methods / J. E. Gentle. USA: Springer, 2003. – P. 381.
43. Gil, E.M. Modeling integrated energy transportation networks for analysis of economic efficiency and network interdependencies / E.M. Gil, A.M. Quelhas, J.D. McCalley, T. Van Voorhis //Proc. North American Power Symposium (NAPS). – 2003.
44. Hammons, T.J. Integrated natural gas-electricity resource adequacy planning in Latin America / T. J. Hammons, L.A. Barroso, H. Rudnick //International Journal of Power & Energy Systems. – 2010. – vol. 30. – № 1. – P. 1.
45. Hamouda A. Improved algorithm for radial distribution networks load flow solution / A. Hamouda, K. Zehar //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2011. – vol. 33. – № 3. – pp. 508-514.
46. Hashimov, A. M. Voltage Stability Problem for GRID with Distribution Generation and Renewable Sources / A.M. Hashimov, N.R. Rahmanov, S.T. Ahmedova, A.A. Mustafayev //Proceedings of the 11th International Conference on Technical and Physical Problems of Electrical Engineering, ICTPE-2015 (Bucharest, Romania). – 2015. – pp. 159-165.
47. Hecq, S. The integrated planning of the natural gas and electricity systems under market conditions / S. Hecq, Y. Bouffouly, P. Doulliez, P. Saintes //2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No. 01EX502). – IEEE, 2001. – vol. 1. – P. 5.
48. Hemmes, K. Towards multi-source multi-product energy systems /

K. Hemmes, J. Zachariahswolf, M. Geidl, G. Andersson //International Journal of Hydrogen Energy. – 2007. – vol. 32. – № 10-11. – pp. 1332-1338.

49. Jayasuriya, L. Energy hub modelling for multi-scale and multi-energy supply systems / L. Jayasuriya, M. Chaudry, M. Qadrdan, J. Wu, N. Jenkins //2019 IEEE Milan PowerTech. – IEEE, 2019. – pp. 1-6.

50. Katsavounis, K. Comparative study of integrated energy system modelling / K. Katsavounis, P. Hou, W. Hu, Z. Chen //2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe). – IEEE, 2017. – pp. 1-6.

51. Koeppel, G. Reliability modeling of multi-carrier energy systems / G. Koeppel, G. Andersson //Energy. – 2009. – vol. 34. – № 3. – pp. 235-244.

52. Korhonen J. A material and energy flow model for co-production of heat and power / J. Korhonen //Journal of Cleaner Production. – 2002. – vol. 10. – № 6. – pp. 537-544.

53. Krause, T. Modeling interconnected national energy systems using an energy hub approach / T. Krause, F. Kienzle, Liu Yang, G. Andersson //2011 IEEE Trondheim PowerTech. – IEEE, 2011. – pp. 1-7.

54. Le Blond, S. Towards an integrated approach to building energy efficiency: Drivers and enablers / S. Le Blond, T. Lewis, M. Sooriyabandara //2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. – IEEE, 2011. – pp. 1-8.

55. Li, G. Researches on the reliability evaluation of integrated energy system based on Energy Hub / G. Li, Y. Kou, J. Jiang, Y. Lin, Z. Bie //2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). – IEEE, 2016. – pp. 1-9.

56. Li, P. A Lyapunov Optimization-based energy management strategy for energy hub with energy router / P. Li, W. Sheng, Q. Duan, Z. Li, C. Zhu, X. Zhang //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2020. – vol. 11. – № 6. – pp. 4860-4870.

57. Lim, I.H. Design and implementation of multiagent-based distributed restoration system in DAS / I.H. Lim, T.S. Sidhu, M.S. Choi, S.J. Lee, S. Hong, S.I. Lim, S.W. Lee //IEEE Transactions on Power Delivery. – 2013. – vol. 28. – № 2. – pp. 585-593.

58. Lu, S. Hydraulic-thermal cooperative optimization of integrated energy systems: a convex optimization approach / S. Lu, W. Gu, C. Zhang, K. Meng, Z. Dong //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2020. – vol. 11. – № 6. – pp. 4818-4832.

59. Lu, S. Thermal inertial aggregation model for integrated energy systems / S. Lu, W. Gu, K. Meng, S. Yao, B. Liu, Z.Y. Dong //IEEE Transactions on Power Systems. – 2019. – vol. 35. – № 3. – pp. 2374-2387.

60. Ma, T. Energy flow modeling and optimal operation analysis of the micro energy grid based on energy hub / T. Ma, J. Wu, L. Hao //Energy conversion and management. – 2017. – vol. 133. – pp. 292-306.

61. Mancarella, P. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models / P. Mancarella //Invited Paper, Energy, under Review. - February 2014. – vol.65 - pp. 1–17.

62. Manshadi, S.D. Coordinated operation of electricity and natural gas systems: A convex relaxation approach / S.D. Manshadi, M.E. Khodayar //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2018. – vol. 10. – № 3. – pp. 3342-3354.

63. Maroufmashat, A. Design and operation of a multicarrier energy system based on multi objective optimization approach / A. Maroufmashat, S.S. Khavas, H. Bakhteyar //matrix. – 2014. – vol. 100. – P. 21.

64. Mayorov, G. Application of the multiagent approach to the research of integrated energy supply systems / G. Mayorov, V. Stennikov, E. Barakhtenko //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – vol. 114. – P. 1006.

65. McDonald, J. Adaptive intelligent power systems: Active distribution networks / J. McDonald //Energy Policy. – 2008. – vol. 36. – № 12. – pp. 4346-4351.

66. Mello, O.D. Natural gas transmission for thermoelectric generation problem / O. D. Mello, T. Ohishi //Proc. of IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (IX SEPOPE). – 2004.

67. Moeini-Aghtaie, M. A decomposed solution to multiple-energy carriers optimal power flow / M. Moeini-Aghtaie, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, E. Hajipour //IEEE Transactions on Power Systems. – 2013. – vol. 29. – № 2. – pp. 707-716.

68. Mohammadi, F. Multidimensional scenario selection for power systems with stochastic failures / F. Mohammadi, M. Sahraei-Ardakani //IEEE Transactions on Power Systems. – 2020. – vol. 35. – № 6. – pp. 4528-4538.

69. Mohammadi, M. Energy hub: from a model to a concept—a review / M. Mohammadi, Y. Noorollahi, B. Mohammadi-Ivatloo, H. Yousefi //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – vol. 80. – pp. 1512-1527.

70. Morales, M.S. Natural gas network pricing and its influence on electricity and gas markets / M. S. Morales, J.W. Lima //2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, – IEEE, 2003. – vol. 3. – P. 6.

71. Moslehi, K. Optimization of multiplant cogeneration system operation including electric and steam networks / K. Moslehi, M. Khadem, R. Bernal, G. Hernandez //IEEE Transactions on Power systems. – 1991. – vol. 6. – № 2. – pp. 484-490.

72. Oikonomou, K. Optimal coordinated operation of interdependent power and water distribution systems / K. Oikonomou, M. Parvania //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2020. – vol. 11. – № 6. – pp. 4784-4794.

73. Orehounig, K. Integration of decentralized energy systems in neighbourhoods using the energy hub approach / K. Orehounig, R. Evins, V. Dorer //Applied Energy. – 2015. – vol. 154. – pp. 277-289.

74. Page, J. A multi-energy modeling, simulation and optimization environment for urban energy infrastructure planning / J. Page, D. Basciotti, O. Pol, J.N. Fidalgo, M. Couto, R. Aron, L. Fournie //Proceedings of the 13th conference of international building performance simulation association, Chambéry, France. – 2013. – pp. 26-28.

75. Papaefthymiou, G. Integration of stochastic generation in power systems / G. Papaefthymiou, P.H. Schavemaker, L. Van der Sluis, W.L. Kling, D. Kurowicka, R.M. Cooke //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2006. – vol. 28. – № 9. – pp. 655-667.

76. Quelhas, A.M. Nodal prices in an integrated energy system / A.M. Quelhas, E. Gil, J.D. McCalley //International Journal of Critical Infrastructures. – 2006. – vol. 2. – № 1. – pp. 50-69.

77. Rahman, S. An efficient load model for analyzing demand side management impacts / S. Rahman, R. Rinaldy //IEEE Transactions on Power Systems. – 1993. – vol. 8. – №3. – pp. 1219-1226.

78. Romero, R. A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems / R. Romero, J.F. Franco, F.B. Leão, M.J. Rider, E.S. De Souza //IEEE Transactions on Power Systems. – 2015. – vol. 31. – № 2. – pp. 1259-1268.

79. Salimi, M. Optimal planning of energy hubs in interconnected energy systems: a case study for natural gas and electricity / M. Salimi, M. Adelpour, S. Vaez-Zadeh, H. Ghasemi //IET Generation, Transmission & Distribution. – 2015. – vol. 9. – № 8. – pp. 695-707.

80. Schulze, M. Network flow model for multi-energy systems / M. Schulze, G. Gasparovic //Proc. of the 5th IASME/WSEAS Int. Conf. on Energy & Environment 2010. – 2010. – pp. 172-177.

81. Sekhavatmanesh, H. A Multi-agent based analytical approach for service restoration in distribution networks / H. Sekhavatmanesh, R. Cherkaoui //2017 IEEE Manchester PowerTech. – IEEE, 2017. – pp. 1-6.

82. Shahidehpour, M. Impact of natural gas infrastructure on electric power systems / M. Shahidehpour, Y. Fu, T. Wiedman //Proceedings of the IEEE. – 2005. – vol. 93. – № 5. – pp. 1042-1056.

83. Sheikhi, A. Financial Analysis for a Multi-Carrier Energy System Equipped with CCHP / A. Sheikhi, S. Bahrami, A.M. Ranjbar, S Sattari, M. Adami//Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'13), Bilbao, Spain. – 2013. – pp. 20-22.

84. Söderman, J. Structural and operational optimisation of distributed energy systems / J. Söderman, F. Pettersson //Applied thermal engineering. – 2006. – vol. 26. – № 13. – pp. 1400-1408.

85. Stennikov, V. New Generation Algorithms for Determining of Optimal Parameters of Heating Systems / V. Stennikov, E. Barakhtenko, D. Sokolov //2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies

(FarEastCon). – IEEE, 2018. – pp. 1-6.

86. Su, C.L. Probabilistic load-flow computation using point estimate method / C.L. Su //IEEE Transactions on Power Systems. – 2005. – vol. 20. – №4. – pp. 1843-1851.

87. Van Beuzekom, I. A review of multi-energy system planning and optimization tools for sustainable urban development / I. Van Beuzekom, M. Gibescu, J. G. Slootweg //2015 IEEE Eindhoven PowerTech. – IEEE, 2015. – pp. 1-7.

88. Violante, W. An energy management system for isolated microgrids with thermal energy resources / W. Violante, C.A. Cañizares, M.A. Trovato, G. Forte //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2020. – vol. 11. – № 4. – pp. 2880-2891.

89. Voropai, N. Modeling of integrated energy supply systems: main principles, model, and applications / N. Voropai, V. Stennikov, S. Senderov, E. Barakhtenko, O. Voitov, A. Ustinov //Journal of Energy Engineering. – 2017. – vol. 143. – № 5.

90. 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.

91. Voropai, N.I. A Model for Control of Steady State of Intelligent Integrated Energy System / N.I. Voropai, V.A. Stennikov, E.A. Barakhtenko, O.N. Voitov, I.V. Postnikov //Energy Systems Research. – 2018. – vol. 1. – № 1. – pp. 57-66.

92. Wang, J. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system / J. Wang, H. Zhong, Z. Ma, Q. Xia, C. Kang //Applied Energy. – 2017. – vol. 202. – pp. 772-782.

93. Wu, T. Optimal operation of combined cooling heat and power microgrid with PEVs / T. Wu, W. Mai, M. Qin, C. Zhang, J. Li, Y. Nie, C.Y. Chung //2015 IEEE Eindhoven PowerTech. – IEEE, 2015. – pp. 1-6.

94. Xiang, Y. An Explicit Formula Based Estimation Method for Distribution Network Reliability / Y. Xiang, Y. Su, Y. Wang, J. Liu, X. Zhang //IEEE Transactions on Power Delivery. – 2019. – vol. 35. – № 4. – pp. 2109-2112.

95. Zhang, P. Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulants and Gram-Charlier expansion / P. Zhang, S.T. Lee //IEEE transactions on

power systems. – 2004. – vol. 19. – № 1. – p. 676-682.

96. Zhang, X. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures / X. Zhang, M. Shahidehpour, A. Alabdulwahab, A. Abusorrah //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2015. – vol. 6. – № 5. – pp. 2302-2311.

97. Zhou, Y. Distributionally robust co-optimization of energy and reserve for combined distribution networks of power and district heating / Y. Zhou, M. Shahidehpour, Z. Wei, Z. Li, G. Sun, S. Chen //IEEE Transactions on Power Systems. – 2019. – vol. 35. – № 3. – pp. 2388-2398.

98. Zhou, Y. Distributionally robust unit commitment in coordinated electricity and district heating networks / Y. Zhou, M. Shahidehpour, Z. Wei, Z. Li, G. Sun, S. Chen //IEEE Transactions on Power Systems. – 2019. – vol. 35. – № 3. – pp. 2155-2166.

99. Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы» (АО «СО ЕЭС») URL: <https://www.so-ups.ru/> (дата обращения: 28.11.2021)

100. Министерство энергетики Российской Федерации URL: <https://minenergo.gov.ru> (дата обращения: 28.11.2021)

Приложение А – Копии свидетельств на программный продукт

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018611255

**ПРОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
И ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МУЛЬТИ-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ») (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

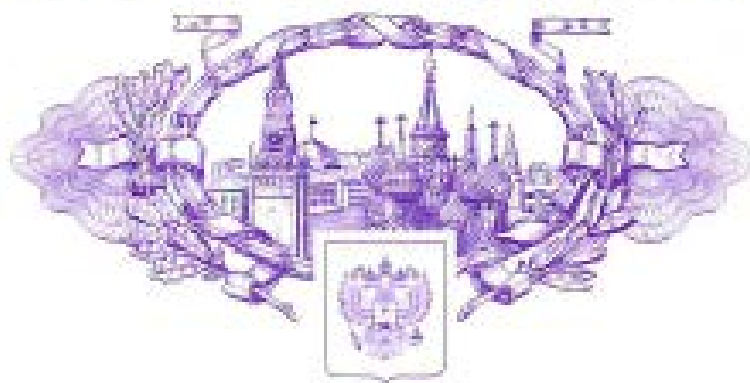
Заявка № **2017662368**
 Дата поступления **30 ноября 2017 г.**
 Дата государственной регистрации
 в Реестре программы для ЭВМ **26 января 2018 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Наливаев**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019614398

**Программа для определения динамических характеристик
мультимедийной энергетической системы**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Иркутский
национальный исследовательский технический университет»
(ФГБОУ ВО «ИРНИТУ») (RU)*

Авторы: *Герасимов Дмитрий Олегович (RU), Суслев Константин
Витальевич (RU), Уколова Екатерина Владимировна (RU)*

Заявка № 2019613116

Дата поступления 26 марта 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 апреля 2019 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Вельев

Приложение Б – Акт внедрения



«Утверждаю»

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО ИРНИТУ

к.т.н., доцент Смирнов В.В.

«18» ноября 2021г.

Акт

о внедрении результатов диссертационной работы
Сердюковой Екатерины Владимировны
в учебный процесс и производственную деятельность
Иркутского национального исследовательского технического университета

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Сердюковой Екатерины Владимировны «Имитационное моделирование интегрированных энергетических систем с использованием концепции энергетического хаба и потоковых методов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы» внедрены в учебный процесс Института энергетики ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет». Полученные в диссертационной работе материалы используются при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» при проведении занятий по дисциплинам: «Принципы управления энергопотреблением», «Интеллектуальные системы энергетики», «Распределенная генерация в системах электроснабжения».

Использование методических и экспериментальных научных результатов исследований, представленных в диссертационной работ, в учебном процессе при подготовке магистров позволили повысить уровень выпускников кафедры и усовершенствовать исследовательскую часть при выполнении лабораторных работ.

Служба 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 использования электроэнергии для преобразования 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.

Директор института энергетики
к.т.н., доцент

Главный энергетик
ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», к.т.н.

 В.В. Федчишин

Л.М. Чеботнягин

Приложение В – Заключение ФГБУН ИСЭМ СО РАН

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской
академии наук, чл.-корр. РАН, д.т.н.,
профессор



В.А. Стенников

Стенников Валерий Алексеевич

«29» *ноября* 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения
Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)**

Диссертация Екатерины Владимировны Сердюковой (до замужества Уколовой) «Имитационное моделирование интегрированных энергетических систем с использованием концепции энергетического хаба и потоковых методов» выполнена в Отделе электроэнергетических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель Е.В. Сердюкова обучалась в очной аспирантуре в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

В 2017 г. Е.В. Сердюкова с отличием окончила Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, направленность образовательной программы: энергоэффективность, энергоаудит и управление энергохозяйством, (магистратура).

В 2021 г. окончила очную аспирантуру в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук по направлению подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника», направленность «Энергетические системы и комплексы» (по специальности научных работников 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы). Диплом об окончании аспирантуры выдан в 2021 г.

Справка об обучении (периоде обучения) №21-4 выдана в 2021 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель – Воропай Николай Иванович, член-

корреспондент Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, научный руководитель Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения диссертации Е.В. Сердюковой принято следующее **заключение.**

Актуальность темы исследований. До недавнего времени инфраструктурные системы энергоснабжения, такие как системы электро-, тепло- и газоснабжения, в основном планировались и эксплуатировались независимо друг от друга, что приводило к недоиспользованию возможностей повышения их энергетической эффективности и надежности, а также увеличению эксплуатационных затрат.

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.

Эффективность интегрированной энергетической системы значительно повышается по сравнению с независимым рассмотрением отдельных систем в результате комплексного использования различных видов энергии.

Под влиянием интереса к интегрированным энергетическим системам возникло понятие энергетического хаба, под которым понимается объект с несколькими входами и несколькими выходами по энергии, а внутри него выполняются некоторые операции над различными видами энергии. Примером энергетического хаба может быть ТЭЦ на газе, входным источником 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 соответствующего математического анализа, в качестве которого можно рассматривать потоковые методы, что и определяет актуальность темы исследований диссертации Е.В. Сердюковой.

Наиболее существенными и новыми научными результатами работы являются:

1. 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.
2. Разработаны алгоритмы моделирования электрических и трубопроводных сетей в составе интегрированной энергетической системы с использованием методов потоков в сетях.
3. Разработан топологический метод оценки структурной надежности радиальных электрических и трубопроводных сетей.
4. Разработан имитационный метод оптимизации процесса преобразования электроэнергии в тепло при использовании дифференцированных тарифов на электроэнергию в течение суток.
5. На примерах различных задач имитационного моделирования интегрированных энергетических систем показана эффективность разработанного методического подхода, моделей, методов и алгоритмов.

Личный вклад автора.

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.

Практическая значимость и ценность работы.

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.

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

Достоверность и обоснованность результатов научных исследований.

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.

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

Публикации.

По теме исследования опубликовано 25 печатных работы (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.

Список основных публикаций:

Публикации в изданиях Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК:

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.

Полученные в диссертационной работе результаты достаточно полно отражены в публикациях.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационное исследование соответствует паспорту научной специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы по следующим пунктам:

п.1. *«Разработка научных основ исследования общих свойств, создания и принципов функционирования энергетических систем и комплексов, фундаментальные и прикладные системные исследования проблем развития энергетики городов, регионов и государства, топливно-энергетического комплекса страны».* Разработаны методические принципы и технология имитационного моделирования и конструирования имитационной модели интегрированной энергетической системы. 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.

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

Общее заключение по диссертационной работе.

Диссертационная работа Сердюковой Екатерины Владимировны «Имитационное моделирование интегрированных энергетических систем с использованием концепции энергетического хаба и потоковых методов» является законченной научно-квалификационной работой. Она выполнена на высоком методическом уровне по тематике, актуальной для систем энергоснабжения России и мира, обладает научной новизной, содержит оригинальные результаты, имеет теоретическое и практическое значение и вносит большой вклад в решение актуальных задач развития интегрированных энергетических систем, повышения структурной надежности интегрированных энергетических систем. Работа полностью соответствует пп. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 11.09.2021).

Диссертация «Имитационное моделирование интегрированных энергетических систем с использованием концепции энергетического хаба и потоковых методов» Сердюковой Екатерины Владимировны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы.

Заключение принято на расширенном заседании семинара Отдела электроэнергетических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Присутствовало на заседании 19 человек. Результаты голосования: «за» – 19 человек, «против» – 0 человек, «воздержались» – 0 человек. Протокол заседания № 8 от 25 ноября 2021 г.



Подковальников Сергей Викторович,
доктор технических наук,
заместитель директора института по
научной работе, заведующий
отделом электроэнергетических систем

Приложение Г – Заключение Международного научного семинара

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель Председателя
международного научного семинара,
заместитель директора Института систем
энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН, д.т.н.
С.М. Сендеров
«24» сентября 2021 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» по диссертации Сердюковой Е.В. «Имитационное моделирование интегрированных энергетических систем с использованием концепции энергетического хаба и потоковых методов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы».

Иркутск-Волжский

93-е заседание
13 – 17 сентября 2021г.

Диссертация Сердюковой Е.В. «Имитационное моделирование интегрированных энергетических систем с использованием концепции энергетического хаба и потоковых методов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 представлялась на 93-м заседании семинара. Диссертационная работа выполнена в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

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

На диссертацию получены отзывы рецензентов: д.т.н., доцент Ахметбаев Даурен Садыкович (АО «Казахский агротехнический университет им. Сакена Сейфуллина», г. Астана, Казахстан), к.т.н. Постников Иван Викторович (Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск). Отзывы положительные, с замечаниями.

В обсуждении диссертации приняли участие: д.т.н. Илюшин П.В. (ИНЭИ РАН, г. Москва), к.т.н. Ефимов Д.Н. (ИСЭМ СО РАН, г. Иркутск), Бык Ф.Л. (НГТУ, г. Новосибирск), Постников И.В. (ИСЭМ СО РАН, г. Иркутск), д.т.н. Ахметбаев Д.С. (КАУ им. С. Сейфуллина, г. Нур-Султан, Казахстан), д.т.н. Н.Л. Новиков (АО «НТЦ ФСК ЕЭС», г. Москва).

Диссертация изложена на 110 страницах машинописного текста и состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы из 94 наименований, приложений.

Актуальность темы диссертации. До недавнего времени инфраструктурные системы энергоснабжения, такие как системы электро-, тепло- и газоснабжения, в

основном планировались и эксплуатировались независимо друг от друга, что приводило к недоиспользованию возможностей повышения их энергетической эффективности и надежности, а также сокращению эксплуатационных затрат.

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. Эффективность интегрированной энергетической системы значительно повышается по сравнению с независимым рассмотрением отдельных систем в результате комплексного использования различных видов энергии.

Под влиянием интереса к интегрированным энергетическим системам возникло понятие энергетического хаба, под которым понимается объект с несколькими входами и несколькими выходами по энергии, а внутри него выполняются некоторые операции над различными видами 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 подход на основе концепции энергетического хаба имеет существенный недостаток, связанный с проблемами описания взаимосвязей между входами и выходами энергетического хаба. Необходимо разрабатывать альтернативный подход к моделированию энергетического хаба, что и составляет предмет исследований диссертации.

Объектом исследования является интегрированная энергетическая система. **Предметом исследования** является моделирование 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 продемонстрировать на примерах различных задач технологию имитационного моделирования этих систем с использованием программной среды MATLAB/Simulink.

Задачи исследования. В диссертационной работе ставятся следующие задачи исследований:

1. Выполнить анализ состояния исследований интегрированных энергетических систем.
2. Выполнить анализ существующих моделей для решения различных задач развития и функционирования интегрированных энергетических систем.
3. Разработать методические принципы имитационного моделирования интегрированных энергетических систем с использованием средств программной

среды MATLAB/Simulink на базе концепции энергетического хаба.

4. Разработать алгоритм моделирования электрических и трубопроводных сетей в составе интегрированной энергетической системы с использованием методов потоков в сетях.

5. Разработать топологический алгоритм оценки структурной надежности радиальной электрической сети по критерию $n-i$.

6. Разработать метод конструирования имитационной модели интегрированной энергетической системы с использованием средств программной среды MATLAB/Simulink и концепции энергетического хаба.

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

Методология и методы исследования. В работе использовались методы теории систем электроснабжения, математическое моделирование с использованием системы MATLAB, графическая среда для имитационного моделирования Simulink и ее подсистемы блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств SimPowerSystems, метод поиска путей и сечений, методы оценки структурной надежности систем энергоснабжения. Применялась теория энергетических хабов.

Научная новизна, положения, выносимые на защиту:

В результате выполнения работы получены следующие новые научные результаты:

1. Разработаны методические принципы и технология имитационного моделирования интегрированных энергетических систем в программной среде MATLAB/Simulink с использованием концепции энергетического хаба.

2. Разработана универсальная технология построения имитационной модели энергетического хаба средствами MATLAB/Simulink.

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

4. Разработан топологический алгоритм оценки надежности радиальной электрической или трубопроводной сети.

5. Разработан метод оптимизации использования потенциала преобразования электроэнергии в тепло в интегрированной энергетической системе.

6. Разработан метод конструирования имитационной модели интегрированной энергетической системы с использованием средств программной среды MATLAB/Simulink на основе концепции энергетического хаба.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

Разработан программный инструмент для исследований интегрированных энергетических систем на основе имитационного моделирования, который может быть использован для дальнейших практических исследований.

Получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (копии свидетельств приведены в Приложении).

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре электроснабжения и электротехники ИРНИТУ (акт внедрения приведен в

Приложении).

Выполненные в диссертационной работе исследования структурной надежности интегрированной системы электро- и теплоснабжения девяти общежитий кампуса, а также эффективности преобразования электроэнергии в тепловую энергию при использовании льготных ночных тарифов на электроэнергию будут использованы при выработке решений по повышению надежности и эффективности работы системы энергоснабжения кампуса ИРНИТУ.

Достоверность полученных результатов работы. Уровень достоверности научных положений и рекомендаций, изложенных в диссертационной работе, определяется их корректностью с точки зрения теории систем энергоснабжения. Обоснованность обеспечивается расчетными методами, применением фундаментальных физических принципов функционирования систем энергоснабжения, а также проверкой и сопоставлением результатов с классическими расчетами на традиционных моделях.

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

Ценность научных работ автора. В работах в полной мере отражены основные материалы диссертации: определена сущность и актуальность поставленных задач исследования, обоснованы применяемые теоретические и практические решения для достижения поставленной цели, изложены основные результаты работы.

Научные работы опубликованы в различных рецензируемых журналах, которые

входят в перечень журналов, рекомендованных ВАК РФ.

Публикации. По теме исследования опубликовано 25 печатных работ (включая сборники статей конференций), из них 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 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.

Замечания по диссертации касались уточнения постановок задач и полученных результатов, недостаточно подробного представления методов и моделей, необходимости сокращения обзора литературы, необходимости рассмотрения достаточно сложной системы энергоснабжения, редакционных замечаний.

Заключение. Диссертационная работа Сердюковой Е.В. «Имитационное моделирование интегрированных энергетических систем с использованием концепции энергетического хаба и потоковых методов» является законченной научной работой, характеризуется наличием системного подхода, содержит достаточный объем теоретических и экспериментальных исследований. Представленные результаты и выводы научно обоснованы и соответствуют требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук и паспорту специальности: 05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы», а диссертационная работа может быть рекомендована к защите после её доработки и устранения замечаний.

Заместитель Председателя
международного научного семинара,
заместитель директора Института систем
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, д.т.н.  С.М. Сендеров

Ученый секретарь семинара  Л.М. Ефимова