

На правах рукописи



Басалаев Александр Анатольевич

**РАСПРЕДЕЛЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ
НА ОСНОВЕ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск - 2018

Работа выполнена на кафедре «Автоматика и управление» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: Шнайдер Дмитрий Александрович
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры автоматике и управления,
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный
университет (национальный исследовательский
университет)»

Официальные оппоненты: Петрова Ирина Юрьевна
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры систем автоматизированного
проектирования и моделирования,
ГАОУ АО ВО «Астраханский государственный
архитектурно-строительный университет»,
г. Астрахань

Султангузин Ильдар Айдарович
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры промышленных
теплоэнергетических систем,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «МЭИ», г. Москва

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново

Защита состоится 26 ноября 2018 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте по адресу: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229803/basalaev-aleksandr-anatolevich>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», Ученый совет, тел. (351) 267-91-23, факс (351) 267-93-69.

Автореферат разослан «__»_____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. хим. наук



А.В. Голлай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Энергосбережение является актуальной проблемой развития российской энергетики. Концепция энергосберегающей политики, проводимой в Российской Федерации, изложена в государственной программе «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года». Основные положения реализации данной концепции установлены федеральным законом № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Перспективным направлением развития технологий энергосбережения в рамках приоритетного направления государственной политики является автоматизация управления теплоснабжением зданий и сооружений. Для организации контроля и управления системами теплоснабжения современный уровень развития программно-технических комплексов способствует повсеместному внедрению сенсорных сетей и распределенных систем управления. В результате работы сенсорных сетей становится возможным получение большого количества разнообразной информации о различных параметрах микроклимата помещений, характеризующих качество теплоснабжения зданий и сооружений.

Теоретические основы построения автоматизированных систем управления теплоснабжением зданий изложены в работах Апарцева М.М., Благих В.Т., Бродача М.М., Зингера Н.М., Ливчака В.И., Матросова Ю.А., Соколова Е.Я., Табунщикова Ю.А., Туркина В.П. Исследованиям систем управления теплоснабжением с использованием сенсорных сетей посвящены работы Грудзинского М.М., Зингера Н.М., Петровой И.Ю., Fanger P.O., Kintner-Meyer M., Kuntze H.-V., Metzger C., Norton P., Spencer B., Zamora-Martinez F. и др. В развитие подходов к моделированию теплопотребления значительный вклад внесли работы Волова Г.Я., Казаринова Л.С., Панферова В.И., Султангузина И.А., Шнайдера Д.А. и др.

Полученная с использованием сенсорных сетей информация позволяет оценить текущее влияние совокупности различных факторов на микроклимат помещений в зданиях. При этом в различных исследовательских работах на основании больших объемов собранной статистической информации отмечается существенное влияние на температуру помещений разнонаправленных климатических и эксплуатационных факторов, приводящих к нарушению требуемых температурных диапазонов.

Для выполнения температурных условий в помещениях зданий развертывают системы распределенного управления на базе сетей датчиков и управляющих устройств. Однако, системы отопления обладают существенными особенностями:

- 1) между потребителями тепловой энергии внутри зданий осуществляется теплообмен через внутренние ограждающие конструкции и за счет

инфильтрации воздуха, что затрудняет поддержание независимых индивидуальных температурных режимов помещений;

2) независимое управление исполнительными устройствами для индивидуального регулирования температуры помещений может привести к гидравлической разбалансировке системы отопления;

3) применение группового управления с целью снижения количества управляющих устройств и удешевления системы автоматического регулирования в условиях воздействия разнонаправленных факторов на теплотребление различных помещений может приводить к несовместности выполнения температурных условий этих помещений в пределах группы управления.

Указанные особенности характеризуют автоматизированные системы теплоснабжения зданий как распределенные объекты управления, требующие решения задачи согласованного управления исполнительными устройствами для оперативного разрешения несовместных температурных условий. Указанная задача распределенного управления системами теплоснабжения, построенными на базе сенсорных сетей, в настоящее время решена еще недостаточно, что и определяет актуальность научно-технической задачи, решаемой в данной работе.

Целью диссертационной работы является обеспечение максимальной степени комфортности микроклиматических условий объектов со сложной структурой при разнообразии их теплоэнергетических характеристик на основе систем распределенного управления с использованием сенсорных сетей при противоречивых температурных условиях.

В работе решаются следующие задачи:

1. Формализация постановки задачи оперативного управления теплоснабжением зданий на базе сенсорных сетей при противоречивых температурных условиях.

2. Разработка алгоритма решения задачи оперативного управления теплоснабжением зданий на базе сенсорных сетей температур воздуха помещений в противоречивых температурных условиях.

3. Разработка методики размещения минимально достаточного количества приемников радиосигнала и беспроводных датчиков температуры воздуха в помещениях для представительного контроля теплового режима здания в рамках автоматизированной системы распределенного управления отоплением.

4. Разработка структурной схемы автоматизированной системы управления отоплением зданий на базе сенсорных сетей.

5. Разработка имитационной макромодели теплоэнергетического комплекса университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

6. Апробация предложенных алгоритмов распределенного управления в системе управления теплоэнергетическим комплексом ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Объектом исследования являются автоматизированные системы теплоснабжения, построенные на базе сетей датчиков и управляющих устройств.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы распределенного управления системой теплоснабжения с использованием сетей датчиков и управляющих устройств.

Методы исследования. Для решения задач, поставленных в диссертационной работе, использовались методы теории систем теплоснабжения, оперативного управления, математического моделирования, нелинейного программирования, оптимизации, математической статистики, автоматизированных информационных систем.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Формализована постановка задачи оперативного управления теплоснабжением зданий на базе сенсорных сетей по критерию выполнения максимального числа противоречивых температурных условий в помещениях с учетом их значимости.

2. Разработан новый алгоритм оперативного управления отоплением здания на основе сенсорных сетей, обеспечивающего распределенное регулирование подачи тепловой энергии по критерию максимального выполнения взвешенных температурных условий в помещениях здания.

3. Предложен новый алгоритм оперативного управления отоплением группы зданий в дефицитном режиме на основе сенсорных сетей, обеспечивающего распределенное регулирование подачи тепловой энергии по критерию максимального выполнения взвешенных температурных условий в помещениях зданий, подключенных к системе централизованного теплоснабжения с ограниченной располагаемой мощностью источников тепловой энергии.

Практическая ценность:

1. Разработанный метод распределенного управления теплоснабжением зданий с применением имитационного моделирования в комплексе с автоматизированной системой оперативного управления, построенной на базе сенсорных сетей, позволяет удовлетворить максимальное количество температурных условий с учетом текущих теплотехнических характеристик объектов теплоэнергетического комплекса.

2. Разработанная автоматизированная система оперативного управления теплоснабжением зданий на основе сенсорных сетей позволяет оперативно осуществлять контроль и управление теплопотреблением зданий, производить оперативный анализ энергетической эффективности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Формализованное представление задачи распределенного управления теплоснабжением зданий с использованием сенсорных сетей при противоречивых температурных условиях.

2. Алгоритм оперативного управления теплопотреблением здания на базе сенсорных сетей в противоречивых температурных условиях.

3. Интерактивный алгоритм оперативного управления централизованной системой теплоснабжения группой зданий на базе сенсорных сетей в дефицитном режиме с ограниченной располагаемой мощностью источников тепловой энергии.

4. Методика расстановки беспроводных датчиков температур воздуха в помещениях и приемников радиосигнала для представительного контроля теплового режима здания.

5. Структурная схема системы модельно-прогнозирующего управления отоплением зданий на базе сенсорных сетей.

6. Результаты внедрения системы оперативного управления теплоснабжением зданий на основе сенсорных сетей в университетском городке ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Реализация работы. Диссертационное исследование выполнялось в рамках приоритетного направления развития «Энергосбережение в социальной сфере» Программы развития ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в соответствии с Соглашением о предоставлении субсидии №14.577.21.0026 от 05.06.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0026.

Разработанное методическое, алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированной системы управления теплоснабжением на базе сенсорных сетей внедрено в ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на 11 конференциях: IV научная конференция аспирантов и докторантов «Южно-Уральского государственного университета» (г. Челябинск, 2012); V научная конференция аспирантов и докторантов «Южно-Уральского государственного университета» (г. Челябинск, 2013); научно-практическая конференция «Актуальные проблемы автоматизации и управления» (г. Челябинск, 2013); международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов, ученых «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере» (г. Челябинск, 2013); XXXIV международная научно-практическая конференция «Коммерческий учет энергоносителей» (г. Санкт-Петербург, 2014); международная конференция «International Conference on Modeling, Simulation and Control 2014» (г. Беркли, Калифорния, США, 2014); IX всероссийская техническая конференция «Автоматизация инженерных систем» в рамках всероссийского форума «Технологии Энергоэффективности-2015» (г. Екатеринбург, 2015 г.); международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (г. Челябинск, 2015); VIII научная конференция аспирантов и докторантов «Южно-Уральского государственного университета» (г. Челябинск, 2016); международная конференция «8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings» (г. Турин, Италия, 2016); международная научно-практическая конференция «2nd International Ural Conference on Measurements» (г. Челябинск, 2017).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК; 5 статей в рецензируемых зарубежных изданиях, входящих в ведущие международные системы цитирования *Web of Science, Scopus*.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, четыре главы, основные выводы, список использованной литературы, содержащий 126 наименований, 2 приложения. Диссертация изложена на 197 страницах и содержит 72 рисунка и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проводится анализ проблем и задач автоматизированного распределенного контроля и управления централизованными системами теплоснабжения, построенными на базе сенсорных сетей.

Современные централизованные системы теплоснабжения обладают следующими особенностями:

- 1) наличие разнотипных источников и разнообразных потребителей;
- 2) разветвленная структура сетей теплоснабжения;
- 3) большое количество факторов, влияющих на потребление тепловой энергии;
- 4) наличие потребителей с нетиповыми режимами функционирования.

В связи с этим автоматизированная система управления (АСУ) современной централизованной системой теплоснабжения должна учитывать все приведенные особенности в целом, что предъявляет повышенные требования к гибкости конфигурации организационной, структурной и функциональной схем АСУ. Создание подобных систем управления представляет собой сложную, недостаточно исследованную научно-техническую задачу.

Для анализа разнообразных режимов функционирования систем теплоснабжения и их элементов в настоящее время широко применяются сенсорные сети сбора и передачи данных. В сложных энергетических комплексах с разнородными потребителями и источниками, а также нетиповыми режимами их работы для учета различных факторов, влияющих на теплопотребление, создаваемые сенсорные сети сбора данных могут включать в себя сотни и тысячи датчиков. При этом количество управляющих устройств, применяемых для регулирования теплопотребления, может быть значительно меньше, что обусловлено гидравлической схемой системы теплоснабжения. В результате в таких системах образуются взаимосвязанные подсистемы управления, в которых одно или несколько управляющих устройств регулируют теплоснабжение группы потребителей, а качество функционирования этих управляющих устройств характеризуется совокупностью большого количества датчиков. Такие объекты управления являются распределенными объектами управления (РОУ).

Датчики температуры воздуха характеризуют состояние микроклимата объектов, обладающих различными характеристиками, находящимися под

влиянием различных факторов и функционирующих в различных режимах. Управление этими объектами осуществляется с применением управляющих устройств, количество которых обычно значительно меньше количества используемых датчиков. В результате возникают ситуации, при которых за счет ограниченного количества управляющих устройств невозможно удовлетворять одновременно на всех подсистемах РОУ всем температурным требованиям, предъявляемым к качеству теплоснабжения подсистем РОУ.

Устранению нарушений температурных условий способствует проведение локальных энергосберегающих мероприятий и балансировки сегментов системы отопления. В этом случае корректирующие управляющие воздействия будут исполняться посредством организационно-технических мероприятий.

Поскольку технологические требования к качеству функционирования РОУ представлены в виде диапазонов допустимых значений, основной задачей системы распределенного управления является определение таких корректирующих воздействий для управляющих устройств, чтобы в каждый момент времени обеспечивать удовлетворение максимально возможному количеству температурных условий помещений с учетом их значимости. Решению указанной задачи посвящена данная работа.

Во второй главе предлагается метод оперативного управления теплоснабжением зданий при противоречивых условиях на основе сенсорных сетей.

Рассмотрим базовую модель управления распределенным объектом теплопотребления, предлагаемую в данной работе. Общая структура модели представлена на рисунке 1.

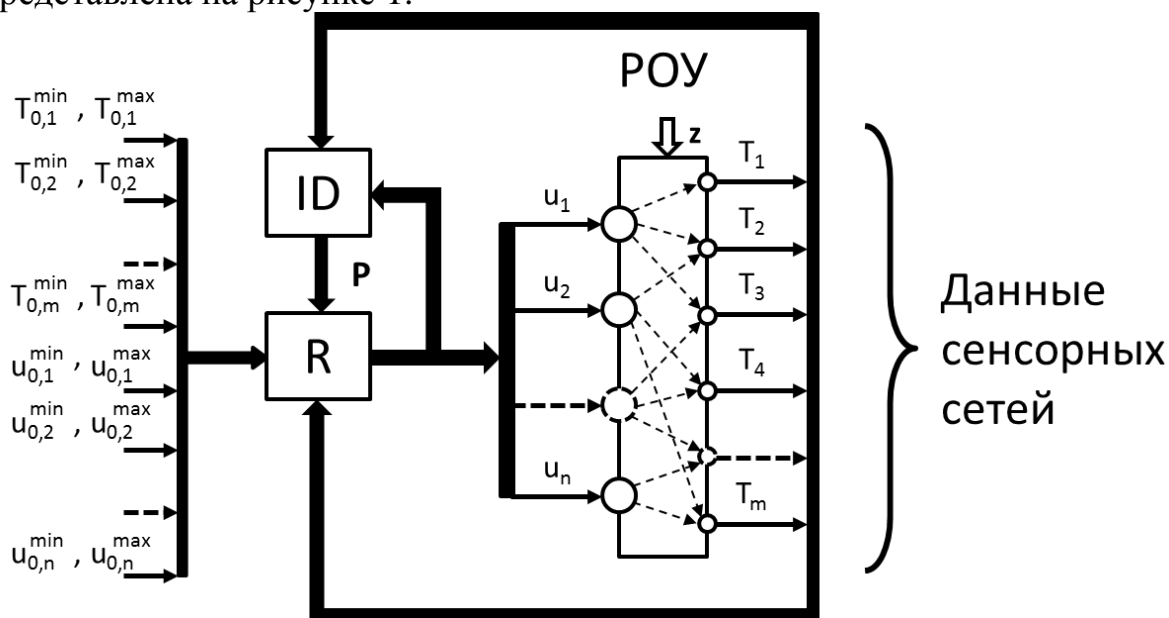


Рисунок 1 – Общая структура модели управления РОУ

РОУ характеризуется множеством температур $\{T_i; i=1..m\}$, измеряемых с помощью сенсорных сетей. Управляющими воздействиями являются входные факторы $\{u_j; j=1..n\}$, на которые наложены ограничения $\{u_j^{\min}, u_j^{\max}; i=1..n\}$. Неуправляемые воздействия обозначены вектором \mathbf{z} . На основе текущей

статистики о входных воздействиях и выходных параметрах в блоке идентификации (ID) определяются динамические связи \mathbf{P} входных воздействий с выходными параметрами. В блоке многосвязного регулятора (R), исходя из заданных интервалов изменения температур $\{T_i^{\min}, T_i^{\max}; i=1..m\}$ и текущих значений температур $\{T_i; i=1..m\}$, с использованием информации о динамических связях \mathbf{P} определяются значения управляющих воздействий $\{u_j; j=1..n\}$, обеспечивающих решение задачи удовлетворения заданным интервалам изменения температур.

Рассмотрим формализованную постановку задачи удовлетворения заданным интервалам изменения температур. В работе рассмотрены 2 задачи управления РОУ в противоречивых условиях:

1) нахождение корректирующих воздействий для управляющих устройств при несовместных температурных условиях, возникающих в помещениях здания;

2) нахождение корректирующих воздействий для регуляторов группы зданий, подключенных к системе централизованного теплоснабжения, функционирующей в дефицитном режиме в условиях наличия ограничений количества генерируемой тепловой энергии на источниках.

1. Управление теплоснабжением здания при несовместных температурных условиях.

Дана система взвешенных неравенств:

$$\begin{aligned} T_i^{\min} \leq F_i(\mathbf{u}) \leq T_i^{\max} : \alpha_i, \quad \forall \alpha_i \geq 0, \quad i \in I_T, \\ T_i = F_i(\mathbf{u}) \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{u} – вектор входных воздействий, F_i – факторная зависимость температур T_i от вектора управляющих воздействий \mathbf{u} , α_i – вес соответствующего требования принадлежности температуры T_i заданному интервалу изменения температур $\{T_i^{\min}, T_i^{\max}\}$, I_T – множество значений индексов неравенств (1).

Система взвешенных неравенств (1) в общем случае является несовместной. Это вытекает из того факта, что с математической точки зрения данная система является переопределенной, так как число неравенств m значительно превышает число управляющих факторов n ($m \gg n$). Данное условие отражает техническую особенность измерения температур с помощью сенсорных сетей. Сенсорные сети могут содержать десятки и сотни датчиков температуры, в то время как число органов управления системой теплоснабжения ограничено. Вследствие этого обычные методы настройки систем теплоснабжения обладают ограниченными возможностями, так как не учитывают фактор противоречивости постановки задачи (1) обеспечения выполнения технических требований к температурам распределенного объекта теплоснабжения, сформулированных для случая использования сенсорных сетей.

В связи с этим для решения задачи настройки системы теплоснабжения при заданных температурных условиях в противоречивой постановке в рамках автоматизированной системы управления разработан специальный алгоритм решения подобных задач.

Для решения задач настройки систем теплоснабжения в противоречивой постановке формулируется следующая экстремальная задача:

$$C(\mathbf{u}) = 100\% \cdot \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot \mu_i(\mathbf{u}) / \sum_{i=1}^m \alpha_i \rightarrow \max_{\{\mathbf{u}\}}, \quad (2)$$

где $\mu_i(\mathbf{u})$ – характеристическая функция, отражающая выполнение i -го температурного условия:

$$\mu_i(\mathbf{u}) = \begin{cases} 1, & T_i = F_i(\mathbf{u}) \in [T_i^{\min}, T_i^{\max}] \\ 0, & T_i = F_i(\mathbf{u}) \notin [T_i^{\min}, T_i^{\max}] \end{cases} \quad (3)$$

Технический смысл данной экстремальной задачи состоит в том, что на основе ее решения находятся такие управляющие воздействия \mathbf{u} , которые обеспечивают выполнение максимального количества взвешенных температурных условий объектов $C(\mathbf{u})$ в измеряемых точках с учетом их значимости, определяемой весами α_i . Оптимальность данного решения состоит в том, что выделяется подсистема наиболее значимых температурных условий, практически реализуемых на данном объекте управления. В число нереализуемых условий попадают те условия, значимость которых является более низкой. Дальнейшее решение задачи осуществляется в интерактивном режиме. При этом предлагается использовать следующие подходы к интерактивной обработке недостижимых температурных условий:

1. Первый подход является методом уступок. Он состоит в том, что по невыполненным температурным условиям ослабляются требования к диапазону изменения температур и решение задачи снова повторяется. Подобное решение повторяется итеративно до тех пор, пока на основе последовательных уступок не будут выполнены все температурные условия.

2. Второй подход является методом ограничений. Метод ограничений исходит из предпосылки, что все температурные условия должны быть выполнены. В этом случае невыполненные температурные условия свидетельствуют о том, что соответствующие динамические связи РОУ являются узкими местами, препятствующими решению поставленной задачи. В этом смысле решение задачи (2)-(3) играет диагностическую роль, так как указывает на те места РОУ, которые препятствуют выполнению температурных условий.

Далее, рассмотрим решение задачи (2)-(3) с использованием переборного алгоритма с поиском перспективных направлений решения методом ветвей и границ. Для этого необходимо привести задачу (1) к каноническому виду:

$$\begin{cases} f_i(\mathbf{u}) \leq 0 \\ f_{m+i}(\mathbf{u}) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$f_i(\mathbf{u}) = T_i^{\min} - F_i(\mathbf{u}),$$

$$f_{m+i}(\mathbf{u}) = F_i(\mathbf{u}) - T_i^{\max},$$

или:

$$f_p(\mathbf{u}) \leq 0, p = 1 \dots 2 \cdot m. \quad (5)$$

Тогда весовые коэффициенты для $i=1\dots m$ запишутся как $\alpha'_i=\alpha_i$ и $\alpha'_{m+i}=\chi_i\alpha_i$, где χ_i – весовой коэффициент ($\chi_i \geq 0$), определяющий значимость выполнения верхних границ температурных условий по сравнению с выполнением нижних границ.

Далее вводятся частные производные по компонентам вектора \mathbf{u} :

$$d_{pj}(\mathbf{u}) = f_p^+(\mathbf{u}) \cdot \frac{\partial f_p(\mathbf{u})}{\partial u_j}, \quad j=1..n, \quad (6)$$

где $f_p^+(\mathbf{u})$:

$$f_p^+(\mathbf{u}) = \begin{cases} f_p(\mathbf{u}), & \text{если } f_p(\mathbf{u}) > 0, \\ 0, & \text{если } f_p(\mathbf{u}) \leq 0. \end{cases} \quad (7)$$

На основании (6) вводятся оценки перспективных частных направлений поиска решений по отдельным соотношениям системы (5):

$$\sigma_{pj}(\mathbf{u}) = \begin{cases} 1, & \text{если } f_p(\mathbf{u}) > 0 \text{ и } d_{pj}(\mathbf{u}) > 0, \\ 0, & \text{если } f_p(\mathbf{u}) \leq 0 \text{ или } d_{pj}(\mathbf{u}) = 0, \\ -1, & \text{если } f_p(\mathbf{u}) > 0 \text{ и } d_{pj}(\mathbf{u}) < 0. \end{cases} \quad (8)$$

Также вводятся частные направления поиска решения:

$$\delta_j = \begin{cases} 1, & \text{если } u_j \text{ возрастает,} \\ 0, & \text{если } u_j \text{ неизменна,} \\ -1, & \text{если } u_j \text{ убывает.} \end{cases} \quad (9)$$

Далее для l -го направления поиска вводится значение характеристической функции p -ого неравенства системы (5):

$$\mu_p^{\text{ож}}(l) = \begin{cases} 1, & \text{если } \forall j: \sigma_{pj}(\mathbf{u}) \cdot \delta_j(l) \geq 0, \\ 0, & \text{если } \exists j: \sigma_{pj}(\mathbf{u}) \cdot \delta_j(l) < 0. \end{cases} \quad (10)$$

На основе (10) для текущего значения $\mu_p^{\text{ож}}(l)$ считается ожидаемое значение целевой функции $C(\mathbf{u})$ в l -ом направлении поиска:

$$C^{\text{ож}}(l) = \sum_{p=1}^{2 \cdot m} \alpha'_p \cdot \mu_p^{\text{ож}}(l). \quad (11)$$

Реальное значение целевой функции в l -ом направлении поиска вычисляется на основании вектора \mathbf{u} , полученного из решения системы неравенств по квадратичному критерию:

$$\min_{\{\mathbf{u}\}} Q^{\text{ож}}; \quad Q^{\text{ож}} = \sum_{p=1}^{2m} \mu_p^{\text{ож}}(l) \cdot \left(f_p^+(\mathbf{u}) \right)^2. \quad (12)$$

Решение задачи (12) может быть выполнено, например, градиентным методом на основе рекуррентного соотношения:

$$\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_{r-1} - \gamma \sum_{p=1}^{2m} \left(\mu_p^{\text{ож}}(l) \cdot f_p^+(\mathbf{u}_{r-1}) \cdot \mathbf{grad} f_p(\mathbf{u}_{r-1}) \right), \quad (13)$$

где γ – коэффициент релаксации, **grad** – градиент функции $f_p(u_{r-1})$, r – шаг алгоритма градиентного поиска.

Для l -го направления поиска решающий алгоритм пытается найти точку максимально совместного решения $\mathbf{u}_{\text{сов}}$, чтобы перевести систему, характеризуемую вектором $\mu_p^{\text{ож}}(\mathbf{u}, l)$ в состояние совместной.

Реальное значение целевой функции для l -го направления поиска:

$$C^P(\mathbf{u}_{\text{сов}}, l) = \sum_{p=1}^{2 \cdot m} \alpha'_p \cdot \mu_p(\mathbf{u}_{\text{сов}}, l). \quad (14)$$

Далее составляется таблица перспективных направлений поиска решений:

$$Tab_s \left\{ \{ \mu_p^{\text{ож}}(l) \}, C^{\text{ож}}(l) : l \in L_{s-1} \cup L_s, C^{\text{ож}}(l) > \max \{ C_{s-1}^P(\mathbf{u}), C_s^P(\mathbf{u}) \} \right\}, \quad (15)$$

где L_{s-1} – множество перспективных направлений поиска, попавших в таблицу на предыдущих шагах; L_s – множество перспективных направлений поиска, рассматриваемых на текущем шаге.

Из таблицы (15) выбирается наиболее перспективное направление поиска решений с наибольшим ожидаемым значением целевой функции $C_s^{\text{ож}}$, для которого еще не определено реальное значение целевой функции C^P . Для выбранного направления поиска находится новая точка максимально совместного решения $\mathbf{u}_{\text{сов},s}$ и считается реальное значение целевой функции C_s^P .

На конечном шаге переборного алгоритма в таблице перспективных направлений поиска решений не остается перспективных направлений, для которых не найдено реальное значение целевой функции. В качестве оптимального выбирается решение, в направлении поиска которого было достигнуто максимальное реальное значение целевой функции.

2. Управление теплоснабжением группы зданий при работе системы централизованного теплоснабжения в дефицитном режиме.

В дефицитном режиме появляется ограничение на суммарную вырабатываемую тепловую энергию $Q^{\text{мин}}$, равную сумме располагаемых в данный момент времени генерирующих мощностей всех источников.

Поэтому общим критерием обеспечения минимально достаточного уровня качества теплоснабжения в дефицитном режиме является выполнение системы неравенств:

$$\begin{aligned} Q(\mathbf{u}) &\leq Q^{\text{мин}} \\ T_i^{\text{мин}} &\leq F_i(\mathbf{u}) \leq T_i^{\text{макс}}, \quad i \in I_T. \\ T_i &= F_i(\mathbf{u}) \end{aligned} \quad (16)$$

Чтобы при нехватке генерирующих мощностей повысить температуру помещений T_i до требуемого уровня $T_i^{\text{мин}}$ и выполнить неравенство (16), при централизованном управлении теплоснабжением необходимо повышать температуру теплоносителя на источнике или высвободить тепловую энергию за счет понижения температуры помещений в других зданиях.

Дефицитный режим может возникнуть при некорректном расчете источников для пиковых нагрузок или при аварийном режиме работы источников в случае отключения одной или нескольких генерирующих установок. При отсутствии резервных генерирующих мощностей в условиях пиковых нагрузок, превышающих располагаемые генерирующие мощности, или аварийного режима работы источников для поддержания требуемых температур помещений более значимых потребителей необходимо преднамеренно снижать температуру помещений менее значимых объектов или полностью их отключать.

Ввиду вышесказанного система взвешенных неравенств для задачи управления в дефицитном режиме примет вид:

$$\begin{cases} T_i^{\min} \leq F_i(\mathbf{u}) : \alpha_i \\ F_i(\mathbf{u}) \leq T_i^{\max} : \alpha_{m+i} \\ T_i^{\text{off}} \leq F_i(\mathbf{u}) : \alpha_{2m+i} \\ Q(\mathbf{u}) \leq Q^{\min} : \alpha_{3m+1} \end{cases}, \quad T_i = F_i(\mathbf{u}), \quad Q(\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^m Q_i(\mathbf{u}) + Q_{\text{потери}}, \quad (17)$$

$$i=1 \dots m, \quad \forall i : \alpha_i = \alpha_{m+i}, \quad i \in I_T,$$

$$p=1 \dots (3m+1), \quad \forall p : \alpha_p \geq 0,$$

где T_i^{\min} – уставка комфортной температуры помещений i -го здания; T_i^{off} – уставка минимальной температуры помещений i -го здания, при нарушении которой необходимо отключать систему отопления в i -ом здании; $F_i(\mathbf{u})$ – функциональная зависимость i -ой температуры от вектора управляющих воздействий \mathbf{u} ; $Q(\mathbf{u})$ – функциональная зависимость суммарного потребления тепловой энергии от управляющих воздействий \mathbf{u} , задаваемых для потребителей; Q^{\max} – располагаемая максимальная мощность источников тепловой энергии; $Q_{\text{потери}}$ – суммарные потери тепловой энергии при передаче теплоносителя в трубопроводной сети от источников к потребителям.

На уставки налагаются следующие ограничения:

1) уставка минимальной температуры помещений должна быть не больше уставки комфортной температуры: $\forall i : T_i^{\text{off}} \leq T_i^{\min}$;

2) в дефицитном режиме сначала следует снижать температуру во всех помещениях до достижения температуры T_i^{off} , далее отключать наименее значимых потребителей. Поэтому каждый вес условий соблюдения минимальной температуры помещений должен быть выше любого из весов условий соблюдения комфортной температуры:

$$\forall i : \alpha_{2m+i} > \max_{i=1 \dots m} \alpha_i; \quad (18)$$

3) вес ограничения мощности должен быть много больше весов температурных ограничений: $\forall p=1 \dots 3m : \alpha_p \ll \alpha_{3m+1}$.

Для решения задачи (17) необходимо привести ее к каноническому виду:

$$\begin{cases} f_i(\mathbf{u}) \leq 0 & f_i(\mathbf{u}) = T_i^{\min} - F_i(\mathbf{u}), \\ f_{m+i}(\mathbf{u}) \leq 0 & f_{m+i}(\mathbf{u}) = F_i(\mathbf{u}) - T_i^{\max}, \\ f_{2m+i}(\mathbf{u}) \leq 0 & f_{2m+i}(\mathbf{u}) = T_i^{\text{off}} - F_i(\mathbf{u}), \\ f_{3m+1}(\mathbf{u}) \leq 0 & f_{3m+1}(\mathbf{u}) = Q(\mathbf{u}) - Q^{\max}, \end{cases} \quad (19)$$

или:

$$f_p(\mathbf{u}) \leq 0, \quad p=1 \dots (3m+1). \quad (20)$$

Далее решение задачи (20) выполняется по методу ветвей и границ (6)-(15) для $3m+1$ неравенств.

Управление централизованной системой теплоснабжение по предложенному алгоритму должно осуществляться интерактивно в диалоговом режиме. В этом случае при дефиците тепловой энергии на основании фактических данных алгоритм должен предлагать оператору в режиме советчика, на каких объектах требуется понизить температуру помещений с указанием соответствующих заданий для контроллеров, а какие объекты необходимо отключить целиком с проведением мероприятий, предотвращающих размораживание отключаемых зданий.

Для проверки работы алгоритма распределенного управления группой зданий в дефицитном режиме в данной работе используется имитационная макромодель системы централизованного теплоснабжения, математическое описание которой представлено во второй главе диссертации.

В третьей главе описана структура и состав программно-технического комплекса автоматизированной системы оперативного управления теплоснабжением зданий на основе сенсорных сетей, реализованной на базе программно-технического комплекса (ПТК) «ПолиТЭР». Структурная схема комплекса технических средств, используемых для реализации разработанных подсистем АСУ теплоэнергетического комплекса университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Структурная схема автоматизированной системы оперативного управления теплоснабжением зданий на основе сенсорных сетей

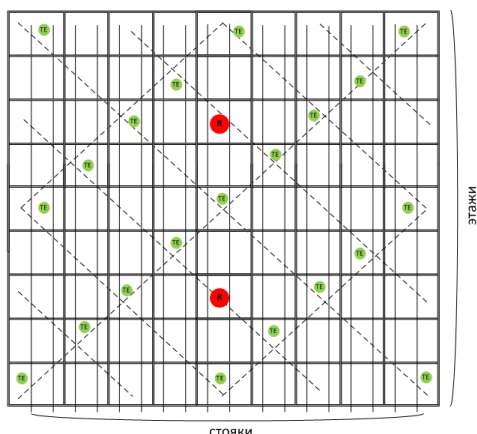
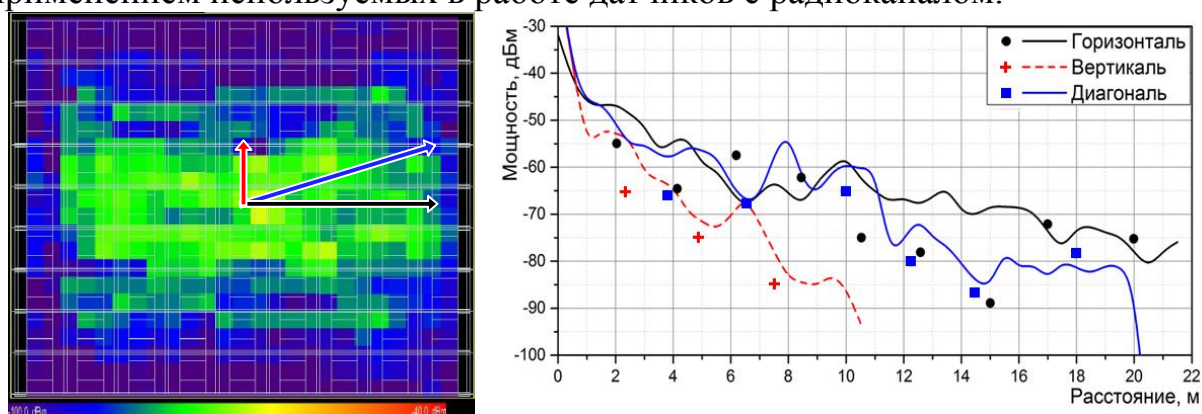


Рисунок 3 – Схема расстановки датчиков температуры помещений и приемников радиосигнала

Для реализации системы сбора данных с использованием сенсорной сети предложена схема расстановки датчиков температуры в зданиях. Схема включает в себя беспроводные датчики температуры воздуха в помещениях зданий (250 шт.) и обратного теплоносителя на стояках систем отопления (64 шт.), объединенные в радиосеть. Передача данных с беспроводных датчиков осуществляется на частоте 868 МГц с использованием модуляции 2GFSK. Период опроса составляет 1 минуту.

Пример схемы выбора помещений для расстановки датчиков в секции фасада представлен на рисунке 3. В представленной секции фасада 9 этажей с 9 помещениями на этаже. Через каждое помещение проходит 2 стояка. К каждому стояку в каждом помещении подключен 1 радиатор. Зелеными точками отмечено размещение беспроводных датчиков температуры воздуха.

Для проверки технической возможности применения предложенной схемы расстановки беспроводных датчиков температуры помещений и минимизации количества приемников радиосигнала было выполнено моделирование прохождения сигнала через стены и перекрытия здания. Диаграмма и графики смоделированного распределения мощности радиосигнала в сегменте здания представлены на рисунке 4. Точками обозначены фактические измерения уровня радиосигнала в корпусе ЗБВ ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», полученные в результате эксперимента с применением используемых в работе датчиков с радиоканалом.



а) диаграмма распределения мощности радиосигнала

б) графики распределения мощности радиосигнала

Рисунок 4 – Результаты моделирования распространения радиосигнала в помещении

Диаграмма распределения мощности используемых приемников и передатчиков показывает, что для квадратного сегмента здания с бетонными перекрытиями оптимальным по охвату всех передатчиков в предложенной схеме расстановки будет расположение приемников на 3 и 7 этажах в середине сегмента в горизонтальном направлении (красные точки на рисунке 3). Уровень сигнала, достаточный для передачи данных в используемых приемниках и передатчиках, равен -95дБм.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований эффективности автоматизированной системы управления теплоэнергетическим комплексом на примере университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». В работе была выполнена проверка предложенных алгоритмов распределенного управления.

1. На основании полученных данных сенсорных сетей была произведена идентификация параметров имитационной макромодели южной стороны системы теплоснабжения ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» и проведена проверка алгоритма распределенного управления централизованной системой теплоснабжения, функционирующей в дефицитном режиме.

В имитационном эксперименте рассмотрено распределение тепловой энергии в условиях дефицита между семью зданиями учебно-лабораторных корпусов (УЛК) (ангары автотракторного факультета; корпус факультета валеологии; учебно-спортивный комплекс; УЛК 2АК, 2АТ, 3Д и 3Г) за счет изменения уставок температуры подаваемого теплоносителя для контроллеров АИТП. Температура наружного воздуха принята равной 20 °С, требуемая суммарная тепловая мощность – 3,46 Гкал/ч, располагаемая тепловая мощность – 3 Гкал/ч.

В таблице 1 приведены результаты расчета параметров теплопотребления рассматриваемых зданий (расход теплоносителя из системы теплоснабжения G (т/ч); температура теплоносителя T_1 (°С), подаваемого из системы теплоснабжения; температура обратного теплоносителя T_2 (°С); средняя температура воздуха помещений $T_{п}$ (°С); потребляемая зданием тепловая мощность Q (Гкал/ч)) с использованием разработанной имитационной макромодели и алгоритма управления для трех режимов функционирования централизованной системы теплоснабжения:

- 1) при отсутствии дефицита тепловой энергии на источнике;
- 2) при дефиците генерирующих мощностей источника без перераспределения тепловой энергии между зданиями;
- 3) при дефиците тепловой энергии с распределением по алгоритму (17).

В третьем режиме заданы 3 приоритетных объекта (УЛК 3Д, УЛК 2АК и УЛК 2АТ), для которых снижение температуры помещений ниже установленного значения наиболее критично. При этом для здания УЛК 3Д и здания УЛК 2АК принята минимальная комфортная температура воздуха помещений, равная 17 °С; для здания УЛК 2АТ – 19 °С. Для остальных зданий температура помещений в рамках модельного эксперимента могла понижаться до более низких отметок.

В исходной ситуации, когда генерируемой энергии достаточно, температура в помещениях всех зданий определяется настройками их АИТП и является приемлемой. При этом температура подаваемого от источника теплоносителя соответствует температурному графику. В ситуации, когда вводится ограничение по вырабатываемой на источнике тепловой мощности, источник при максимальной нагрузке не может поддерживать заданный температурный график, и температура подаваемого теплоносителя начинает снижаться. Из-за пониженной температуры подаваемого от источника теплоносителя на потребителях контроллеры погодного регулирования пытаются компенсировать недостаток тепла, увеличивая расход теплоносителя. Это, в свою очередь, приводит к еще большему снижению температуры теплоносителя, подаваемого в сеть от источника.

Таблица 1 – Результаты моделирования

Потребители	Режим	G, т/ч	T ₁ , °C	T ₂ , °C	T _п , °C	Q, Гкал
УЛК 2АК (T ^{min} =17 °C)	1	7,0	84,9	63,9	19,7	0,147
	2	8,3	68,2	51,6	17,1	0,137
	3	5,1	84,9	57,9	17,0	0,137
УЛК 2АТ (T ^{min} =19 °C)	1	15,0	84,9	66,0	20,8	0,283
	2	25,4	68,2	57,8	18,0	0,264
	3	11,8	84,9	62,0	19,0	0,271
УЛК 3Г	1	10,3	84,8	55,3	20,4	0,304
	2	9,7	68,1	38,7	18,1	0,287
	3	6,8	84,8	45,6	15,5	0,267
УЛК 3Д (T ^{min} =17 °C)	1	12,2	84,6	48,3	22,3	0,441
	2	12,0	67,9	37,1	15,5	0,370
	3	6,6	84,6	26,5	17,0	0,386
Ангары АТ-факультета	1	13,8	84,9	53,4	21,7	0,435
	2	13,6	68,3	39,9	16,3	0,385
	3	6,4	84,9	26,7	15,5	0,370
Корпус факультета валеологии	1	7,5	84,9	69,3	22,1	0,117
	2	7,4	68,2	55,0	15,4	0,098
	3	2,1	84,9	38,8	15,5	0,098
Учебно-спортивный комплекс	1	56,6	85,0	54,9	21,6	1,700
	2	59,2	68,3	43,9	15,3	1,440
	3	31,8	85,0	39,4	15,5	1,450

Чтобы обеспечить требуемую минимальную температуру для УЛК 3Д, УЛК 2АК и УЛК 2АТ, вводится централизованное управление потребителями с использованием предложенного алгоритма. Применяя имитационную модель, предложенный алгоритм на менее приоритетных зданиях осуществляет снижение температуры воздуха в помещениях до определенного уровня, полученного в ходе расчета заданий для температурных графиков контроллеров погодного регулирования. При этом у приоритетных потребителей обеспечивается выполнение заданных температурных условий.

2. На основании полученных данных сенсорных сетей проведен анализ эффективности функционирования системы управления отоплением семи учебно-лабораторных корпусов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». Выполнена оценка потенциала энергосбережения в отопительном периоде с 15.10.17 по 15.04.18 при применении предложенного алгоритма управления для семи учебно-лабораторных корпусов: 2АК, 2АТ, 3А, 3БВ, 3Г, 3Д и здания факультета валеологии. Нормативные диапазоны температур помещений: для аудиторий и кабинетов – 19-23 °C; для коридоров – 14-20 °C. Оценка экономии представлена в таблице 2.

Таблица 2– Потенциал экономии тепловой энергии

Здание	Базовое потребление	Расчетное потребление	Расчетная экономия за отопительный период	
	Гкал	Гкал	Гкал	%
2АК	465,9	424,8	41,1	8,8%
2АТ	1405,5	1272,3	133,3	10,7%
3А	1371,3	1223,6	147,7	10,8%
3ВВ	1855,8	1657,6	198,2	10,7%
3Г	501,7	443,6	58,2	13,2%
3Д	942,3	785,2	157,0	16,7%
Валеология	342,9	299,2	43,8	12,8%
Сумма	6885,5	6106,2	779,3	11,3%

3. Рассмотрено применение предложенного алгоритма управления для учебно-лабораторного корпуса 2АТ ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Связи РОУ, определяющие зависимость между управляющими и возмущающими воздействиями и температурами помещений, были идентифицированы на основе показаний сенсорной сети температур помещений. При идентификации динамических связей и управлении РОУ использовалась макро модель, блок-схема которой представлена на рисунке 5.

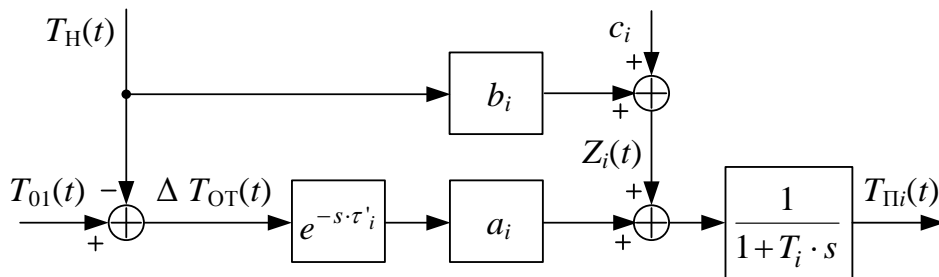


Рисунок 5 – Блок-схема макро модели динамической системы i -ой связи РОУ

Макромодель динамических связей РОУ, представленная на рисунке 5, описывается следующей рекуррентной факторной зависимостью, используемой в качестве $F_i(\mathbf{u})$ в выражении (1), где управляющее воздействие \mathbf{u} представлено температурой подаваемого теплоносителя T_{01} :

$$T_{\Pi i, k} = \frac{T_i}{T_i + \Delta t} \cdot T_{\Pi i, k-1} + a_i \cdot \frac{\Delta t}{T_i + \Delta t} \cdot \Delta T_{OT, k - \tau'_i} + b_i \cdot \frac{\Delta t}{T_i + \Delta t} \cdot T_{H, k} + \frac{\Delta t}{T_i + \Delta t} \cdot c_i, \quad (21)$$

где $T_{\Pi i, k}$ – температура воздуха i -ого потребителя на k -ом шаге алгоритма управления; T_i – постоянная времени переходного процесса i -ого потребителя; $\Delta T_{OT, k} = T_{01, k} - T_{HВ, k}$ – разность между температурой подаваемого теплоносителя $T_{01, k}$ и наружного воздуха $T_{HВ, k}$; τ'_i – задержка по каналу $T_{\Pi i}(\Delta T_{OT})$. Наличие параметра c_i связано с внутренними теплопоступлениями и свободным членом оценки прямого влияния температуры наружного воздуха на температуру потребителей, принимаемыми постоянными на интервале управления.

Для выполнения идентификации производятся следующие замены:

$$\alpha_i = \frac{T_i}{T_i + \Delta t}; \beta_i = a_i \cdot \frac{\Delta t}{T_i + \Delta t}; \gamma_i = b_i \cdot \frac{\Delta t}{T_i + \Delta t}; \nu_i = \frac{\Delta t}{T_i + \Delta t} \cdot c_i. \quad (22)$$

Идентификация α_i , β_i , γ_i , ν_i выполняется с использованием метода наименьших квадратов. Поиск величины задержки τ'_i выполняется по

критерию минимальной квадратичной ошибки при идентификации параметров $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \nu_i$.

На рисунке 6 представлена идентификация и прогноз температуры помещений здания корпуса 2АТ. С целью верификации модели прогноз выполнен с использованием фактической известной температуры наружного воздуха. При работе алгоритма для текущего момента времени прогнозирование температуры помещений может осуществляться с использованием прогноза температуры наружного воздуха, получаемого, например, из внешних *web*-ресурсов.

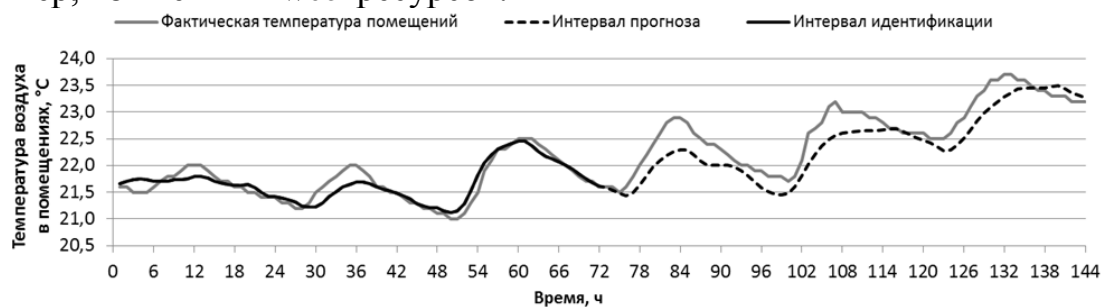


Рисунок 6 – Графики идентификации и прогнозирования температуры помещений здания корпуса 2АТ

На интервале идентификации (3 суток) были определены следующие статистические показатели по температуре помещений: средняя ошибка – $ME_I = -0,013^\circ\text{C}$; СКО – $RMSE_I = 0,147^\circ\text{C}$. На интервале прогноза (3 суток) статистические показатели по температуре помещений составили: $ME_P = -0,255^\circ\text{C}$; $RMSE_P = 0,213^\circ\text{C}$.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности практического использования разработанной модели для управления температурой помещений здания. При этом необходимо отметить, что предложенная модель управления является адаптивной, так как идентификация выполняется на каждом шаге работы системы управления.

На рисунке 7 представлена структурная схема разработанной системы модельно-прогнозирующего управления РОУ, включающая макромоделли динамических связей РОУ. На шаге времени k под воздействием возмущающего воздействия в виде температуры наружного воздуха $T_{\text{НВ}}[t_k]$ и фактического управляющего воздействия в виде температуры подаваемого в систему отопления теплоносителя $T'_{01}[t_k]$ в РОУ формируется множество температур помещений $T_{\text{П}i}[t_k]$. Данные по температурам помещений, наружного воздуха и подаваемого теплоносителя сохраняются в базу данных с глубиной архива H . В текущий момент времени k модуль идентификации ID определяет параметры динамических связей РОУ $\mathbf{P}[t_k]$. Начиная от текущего момента времени k , модуль поиска решения на основе предложенного алгоритма (шаги s переборного алгоритма) ищет такие корректирующие воздействия (шаги r решающего алгоритма) для температуры теплоносителя $\Delta T_{01,sr}[t_k]$, чтобы получить максимальное количество удовлетворенных температурных условий ($T_{\text{П}i}^{\min} \leq T_{\text{П}i,sr}(t_k) \leq T_{\text{П}i}^{\max}$) в пределах горизонта прогноза F . Для прогноза температуры помещений может быть использован прогноз температуры

наружного воздуха $T_{\text{НВ}}[t_k, t_{k+F}]$ на горизонт прогноза F . Из задания температуры теплоносителя $T'_{01}[t_k, t_{k+F}]$, найденного на конечном шаге предложенного алгоритма, выбирается $k+1$ шаг управления, и считается коррекция $\Delta T_{01}[t_{k+1}]$ для исходного задания температуры теплоносителя $T_{01}[t_{k+1}]$ контроллера погодного регулирования.

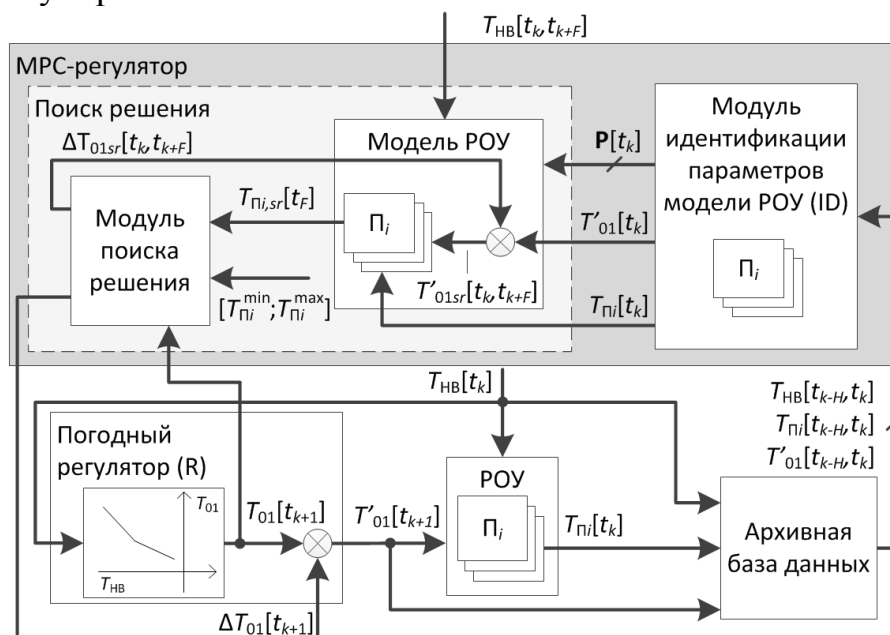


Рисунок 7 – Структурная схема системы управления РОУ

На основании проведенной идентификации динамических связей РОУ по данным сенсорных сетей был проведен эксперимент по реализации предложенного алгоритма управления зданием корпуса 2АТ. Эффективность управления теплоснабжением здания по предложенному алгоритму показана с использованием области Парето. В отчетный период в сопоставимых температурных условиях экономия тепловой энергии составила 8,53 Гкал (16,5%). При этом в здании корпуса 2АТ количество помещений с выполненными нормативными диапазонами температур воздуха было повышено с 34% до 56% от общего количества контролируемых помещений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен анализ характерных особенностей задач оперативного управления теплоснабжением зданий на базе сенсорных сетей. Показано, что особенностью указанных задач является большая размерность измерительной информации при значительно меньшей размерности управляющих воздействий, что приводит к противоречивым постановкам задач управления. В работе предложена формализованная постановка задачи оперативного управления теплоснабжением зданий на базе сенсорных сетей по критерию выполнения максимального числа противоречивых температурных условий с учетом их значимости.

2. Для реализации задачи оперативного управления теплоснабжением зданий на базе сенсорных сетей в противоречивых постановках предложен алгоритм по типу метода ветвей и границ, обеспечивающий распределенное

регулирование подачи тепловой энергии по критерию максимального выполнения взвешенных температурных условий. Проведено исследование области Парето, на основе которого выявлены преимущества предложенного алгоритма по отношению к широко используемому алгоритму управления по температурному графику. Проведен сравнительный анализ эффективности алгоритмов регулирования по критерию максимального выполнения взвешенных температурных условий в сравнении с алгоритмами управления по температурному графику и средней температуре помещений различного назначения.

3. Для решения задач оперативного управления теплоснабжением группой зданий в дефицитных режимах предложен интерактивный алгоритм, являющийся модификацией общего алгоритма оперативного управления теплоснабжением зданий при противоречивых условиях.

4. Для решения рассмотренных задач предложена структурная схема автоматизированной системы модельно-прогнозирующего управления отоплением зданий, включающая модуль идентификации динамических характеристик распределенного объекта управления в режиме реального времени.

5. Предложенные в работе алгоритмы распределенного управления теплоснабжением зданий с использованием сенсорных сетей реализованы в виде программного модуля для автоматизированных систем диспетчерского управления теплоснабжением объектов широкого класса.

6. Разработана методика и типовая схема размещения минимально достаточного количества приемников радиосигнала и беспроводных датчиков температуры воздуха в помещениях для представительного контроля теплового режима зданий в рамках автоматизированной системы распределенного управления отоплением. Проверка предложенной типовой схемы была произведена с использованием моделирования и экспериментальных исследований распространения радиосигнала внутри зданий.

7. Разработанная автоматизированная система оперативного управления отоплением зданий реализована в виде системы оперативного управления режимными параметрами семи зданий теплоэнергетического комплекса университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

8. Для решения задач оперативного управления теплоэнергетическим комплексом университетского городка разработана имитационная макромодель с различными видами источников и потребителей тепловой энергии. Идентификация параметров модели осуществлялась с использованием показаний сенсорных сетей.

9. Результаты работы положены в основу оперативного управления в рамках автоматизированной системы диспетчеризации теплоснабжения университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». Выявленный потенциал экономии от внедрения разработанных методов управления для семи учебно-лабораторных корпусов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» составил 11,3%.

10. С целью оценки эффективности предложенного алгоритма управления были проведено детализированное экспериментальное

исследование теплового состояния зданий на основе энергоаудита с использованием данных сенсорных сетей и тепловизионных обследований. В результате экспериментальных исследований было получено, что фактическая экономия тепловой энергии для одного здания составила 16,5% при увеличении количества помещений с выполненными температурными условиями с 34% до 56% от общего количества контролируемых помещений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. Абдуллин, В. В. Подход к оперативному анализу эффективности теплоснабжения зданий / Абдуллин В. В., Д. А. Шнайдер, А. А. Басалаев // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2011. – Вып. 13. – №2 (219). – С. 70–73.

2. Басалаев, А. А. Модель системы энергоэффективного теплоснабжения зданий / А. А. Басалаев // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2012. – № 23. – С. 216–218.

3. Басалаев, А. А. Оперативный анализ энергетической эффективности теплоснабжения зданий в автоматизированных системах диспетчеризации и управления / А. А. Басалаев, Д. А. Шнайдер, А. Р. Хасанов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – Т. 11. – № 1. – С. 16–23.

4. Басалаев, А. А. Распределенное имитационное моделирование системы теплоснабжения зданий в среде Vissim / А. А. Басалаев // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – Том 13. – № 2. – С. 82–87.

5. Басалаев, А. А. Метод расчета норм потребления технической воды для металлургических предприятий / А. А. Басалаев, Д. А. Шнайдер, Л. С. Казаринов // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2014. – Том 14. – № 4. – С. 99–106.

6. Басалаев, А. А. Автоматизированный энергоменеджмент теплоэнергетического комплекса университетского городка / А. А. Басалаев // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2015. – Том 15. – № 4. – С. 26–32.

7. Басалаев, А. А. Метод оптимизации температуры подаваемого теплоносителя в системе централизованного теплоснабжения зданий на основе имитационного моделирования / А. А. Басалаев, Д. А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника. – 2017. – Том 17. – № 1. – С. 15–22.

Статьи в зарубежных изданиях,

входящих в международные реферативные базы данных и ведущие международные системы цитирования Web of Science, Scopus

8. Shnaider, D. A. Building Heating Feed-forward Control Based on Indoor Air Temperature Inverse Dynamics Model / D. A. Shnaider, V. V. Abdullin, A. A. Basalaev // Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The

World Congress on Engineering and Computer Science 2014. Volume II. October 22–24, 2014. San Francisco, USA. – Hong Kong: Newswood Limited; International Association of Engineers, 2014. – P. 886–892.

9. Shnaider, D. A. Building Heating Feed-Forward Control Method and Its Application in South Ural State University Academic Building / D. A. Shnaider, V. V. Abdullin, A. A. Basalaev // Transactions on Engineering Technologies. – Heidelberg; New York; London: Springer Dordrecht, 2015. – P. 69–85.

10. Basalaev, A. A. Simulation Study on Supply Temperature Optimization of University Campus Heating System / A. A. Basalaev, T. A. Barbasova, D. A. Shnaider // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 587–594.

11. Filimonova, A. A. Heat supply modes optimization based on macromodeling technology / A. A. Filimonova, T. A. Barbasova, D. A. Shnaider, A. A. Basalaev // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 111. – P. 710–719.

12. Basalaev, A. A. Optimal Solutions to Indoor Temperature Control Problems for District Heating Systems in Short Supply Conditions / A. A. Basalaev // 2nd International Ural Conference on Measurements, 16-19 October 2017, Chelyabinsk, Russia. – New York : IEEE, 2017. – P. 351–356.

Статьи в других журналах и сборниках трудов, материалах конференций

13. Басалаев, А. А. Распределенное имитационное моделирование систем теплоснабжения / А. А. Басалаев, Т. А. Барбасова, А. Р. Хасанов, В. В. Абдуллин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых 22-26 апреля 2013 г. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С. 55–59.

14. Шнайдер, Д. А. ПТК «ПолиТЭР» – единое решение для диспетчерского управления и коммерческого учета энергоресурсов / Д. А. Шнайдер, В. В. Абдуллин, А. А. Басалаев // Энергонадзор. – 2014. – №4 (56). – С. 127–128.

15. Шнайдер, Д. А. Диспетчерское управление и коммерческий учет энергоресурсов в ЖКХ на базе программно-технического комплекса «ПолиТЭР» / Д. А. Шнайдер, В. В. Абдуллин, А. А. Басалаев // Коммерческий учет энергоносителей : Материалы XXXIV международной научно-практической Конференции. – СПб., 2014. – С. 90–100.

16. Басалаев, А. А. Поддержка принятия решений и мониторинг эффективности энергосберегающих проектов в системах тепло-, водоснабжения на основе ПТК «ПолиТЭР» / А. А. Басалаев, Д. А. Шнайдер // Всероссийский форум «Технологии Энергоэффективности-2015», сборник докладов и статей, 15-16 апреля 2015 г. – Екатеринбург : ООО ПК «Артикул», 2015. – С. 88–90.

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать ____ .09.2018. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ ____.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76