

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент
Шнайдер Дмитрий Александрович

Челябинск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЗАДАЧ И ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ	11
1.1. Задачи управления теплоснабжением зданий с использованием сенсорных сетей.....	11
1.2. Обзор литературы	21
1.3. Постановка цели и задач исследования.....	42
Выводы к главе 1	44
ГЛАВА 2. МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ ПРИ ПРОТИВОРЕЧИВЫХ УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ	46
2.1. Формализация задач оперативного управления теплоснабжением зданий при противоречивых условиях.....	46
2.1.1. Общая структура модели управления распределенным объектом теплопотребления.....	46
2.1.2. Задача удовлетворения заданным интервалам изменения температур в помещениях здания	51
2.1.3. Задача удовлетворения заданным интервалам изменения температур помещений группы зданий, подключенных к системе централизованного теплоснабжения, функционирующей в дефицитном режиме	53
2.2. Алгоритмы решения задач оперативного управления теплоснабжением зданий при противоречивых условиях.....	55
2.2.1. Вычислительный алгоритм решения задачи удовлетворения заданным интервалам изменения температур в помещениях здания	55
2.2.2. Вычислительный алгоритм решения задачи управления группой зданий системы централизованного теплоснабжения в дефицитном режиме	59

2.3. Схема оценки технико-экономического эффекта от применения алгоритма распределенного управления по критерию максимального выполнения температурных условий.....	60
2.4. Модельно-прогнозирующего управление системой теплоснабжения зданий в противоречивых условиях.....	64
2.4.1. Общая структура модельно-прогнозирующего управления системой теплоснабжения зданий.....	64
2.4.2. Факторные зависимости для управляющих воздействий.....	69
2.4.3. Идентификация динамических характеристик каналов связи распределенного объекта управления.....	71
2.4.4. Решение многомерной задачи управления с учетом динамических характеристик связей РОУ.....	76
2.4.5. Имитационная макро модель системы централизованного теплоснабжения	78
Выводы к главе 2.....	105
ГЛАВА 3. СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ	
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ.....	106
3.1. Общая структура АСУ.....	106
3.2. Техническое обеспечение.....	111
3.3. Программное обеспечение.....	114
3.4. Методика и схема расстановки беспроводных датчиков температуры помещений и приемников радиосигнала.....	117
3.5. Использование беспроводных датчиков температуры помещений.....	119
Выводы к главе 3.....	122
ГЛАВА 4. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ	
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ НА ПРИМЕРЕ УНИВЕРСИТЕТСКОГО	
ГОРОДКА ФГАОУ ВО «ЮУРГУ (НИУ)».....	124
4.1. Характеристики объекта управления.....	124
4.2. Автоматизированная управляющая информационно-измерительная система теплоснабжения университетского городка на базе сенсорных сетей.....	126

4.3. Экспериментальные исследования применения алгоритмов распределенного управления	137
4.3.1. Расстановка датчиков температуры воздуха в помещениях	137
4.3.2. Проверка алгоритма распределенного управления в дефицитном режиме с использованием имитационной макромоделли	143
4.3.3. Идентификация динамических характеристик распределенного объекта управления	145
4.3.4. Реализация системы регулирования отоплением здания с использованием модельно-прогнозирующего управления на основе предложенного алгоритма .	153
4.3.5. Проверка алгоритма распределенного управления с гарантированным обеспечением качества микроклимата.....	157
4.3.6. Анализ энергоэффективности и качества теплоснабжения здания	161
4.3.7. Оценка потенциала экономии от применения предложенного алгоритма для семи корпусов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».....	168
Выводы к главе 4	173
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ	175
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	178
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ	
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	194
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СПРАВКА О СОГЛАСОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ	
И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В	
СОАВТОРСТВЕ	196

ВВЕДЕНИЕ

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.-B., 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, следовательно, 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.

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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЗАДАЧ И ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

1.1. Задачи управления теплоснабжением зданий с использованием сенсорных сетей

Система управления на базе сенсорных сетей включает в себя множество различных датчиков, устанавливаемых на объектах управления. Эти датчики передают данные на концентраторы посредством проводных или беспроводных технологий. Далее данные с концентраторов через локальные или глобальные вычислительные сети, обладающих большей пропускной способностью, передаются на сервер сбора и обработки данных, где происходит их агрегация и анализ. После обработки этих данных, сервер может передавать информацию автоматизированным рабочим местам (АРМ) пользователей и передавать управляющим устройствам коррекции настроек, полученные либо от пользователей (автоматизированный режим управления), либо в результате работы внутренних алгоритмов управления (автоматический режим управления). Передача корректирующих воздействий может быть осуществлена как на общие для нескольких объектов управляющие устройства (групповые управляющие устройства), так и на индивидуальные управляющие устройства. Передача данных управляющим устройствам может осуществляться с использованием аналогичных технологий и каналов передачи данных. Таким образом, сети передачи данных могут использоваться не только для индивидуального контроля, но и для индивидуального управления и включать в себя не только датчики, но и управляющие устройства, если в используемых сетях передачи данных реализован двусторонний канал обмена информацией. Структура систем управления теплоснабжением зданий на базе сенсорных сетей представлена на рисунке 1.1.

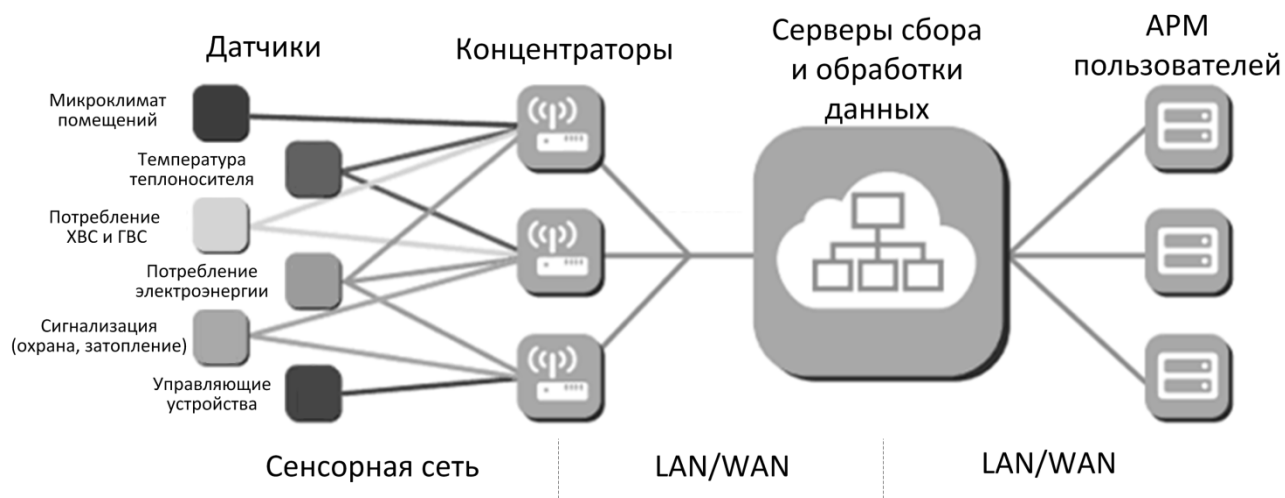


Рисунок 1.1 – Структура систем управления теплоснабжением зданий на базе сенсорных сетей

Основным преимуществом сенсорных сетей является получение всесторонней информации о функционировании отдельных элементов объектов управления теплоснабжением. Это позволяет более подробно изучить объект теплоснабжения, учесть индивидуальные характеристики его отдельных элементов и действующие на них возмущающие воздействия, а также идентифицировать внутренние взаимосвязи между элементами объекта. Благодаря информации о температуре большого числа помещений здания, становится возможным получение более адекватной оценки текущего состояния как отдельных помещений, так и здания в целом [110]. Однако, получив большой объем данных по различным помещениям здания, появляется проблема их оптимального использования в управлении, особенно когда управление теплоснабжением осуществляется для всего здания в целом. Таким образом, основной задачей в системах теплоснабжения на базе сенсорных сетей становится учет потребностей большого числа разнородных потребителей.

Разнообразие потребителей связано с их назначением и применяемыми в них теплопотребляющими установками. К основным видам теплопотребляющих установок относят:

1. Системы отопления, в которых необходимо поддерживать температуру отапливаемых помещений зданий на требуемом постоянном уровне при

варьирующихся погодных условиях (прежде всего, при изменяющейся температуре наружного воздуха), от которых, соответственно, зависит количество потребляемой тепловой энергии.

2. Системы горячего водоснабжения, в которых необходимо поддерживать температуру горячей воды на требуемом постоянном уровне при варьирующемся расходе воды. При этом расход воды зависит от назначения объекта и от потребности в горячей воде людей, находящихся в здании, в каждый конкретный момент времени. Потребность в горячей воде, в свою очередь, зависит от режима деятельности людей в каждом конкретном здании.

В качестве потребителей в крупных системах теплоснабжения могут выступать следующие объекты:

1. Жилые и административные здания, потребление тепловой энергии в которых распределяется на системы отопления и ГВС. В этих зданиях дополнительным существенным источником тепловой энергии являются внутренние теплопоступления, связанные с пребыванием в здании людей и работой бытовой техники и оргтехники. Поэтому фактическое потребление тепловой энергии в таких помещениях зависит от рабочего графика. При этом в административных и жилых зданиях нормы температуры помещений различны. Кроме того здания могут быть комбинированного типа, т.е. включать как жилые, так и административные помещения.

2. Спортивные комплексы. Эти здания характеризуются повышенным, но при этом более стабильным, потреблением тепловой энергии на ГВС по сравнению с жилыми и общественными зданиями.

3. Производственные помещения различных организаций. К крупным системам теплоснабжения могут присоединяться малые производства, находящиеся в пределах города, района, микрорайона или даже отдельного здания. Потребление тепловой энергии на предприятиях в значительной степени зависит от используемого оборудования, поэтому в балансе теплопотребления может преобладать и отопительное оборудование, и ГВС на нужды производства, и внутренние теплопоступления от производственного оборудования. В случае с

преобладанием внутренних теплопоступлений от производственного оборудования потребление будет зависеть от режимных карт используемого агрегатов.

Таким образом, при совмещении в одной системе теплоснабжения большого количества разнообразных потребителей значительно усложняется и контроль, и управление теплопотреблением во всей системе, поскольку в такой системе в различные моменты времени будут присутствовать потребители, которые находятся в различных условиях, функционируют в различных режимах и требуют поддержания различных температурных условий.

В крупных системах теплоснабжения также могут присутствовать различные источники тепловой энергии. Они могут различаться как по мощности и эффективности, так и по принципам генерации. Для теплогенерирующих установок выделяют следующие принципы генерации:

1) моногенерация – выработка тепловой энергии посредством сжигания определенного вида топлива (угля, мазута, природного газа и др.). Управление генерацией тепловой энергии в этих установках в основном ориентировано на удовлетворение спроса потребителей на тепловую энергию;

2) когенерция – комбинированная выработка электрической и тепловой энергии, в которой основным вырабатываемым видом энергии является электрическая, а вырабатываемая тепловая энергия является утилизируемой – получаемой от выхлопных газов и охлаждения генерирующих установок. Поэтому выработка тепловой энергии в таких установках зависит от количества выработанной электрической энергии, и для повышения эффективности всей системы тепловая энергия должна использоваться максимально полно.

Основной целью теплоснабжения является поддержание комфортных условий труда и проживания человека в помещениях зданий, строений и сооружений. В связи с этим для оценки качества теплоснабжения используются соответствующие показатели микроклимата помещений (температура воздуха), для которых в нормативно-технической документации установлены соответствующие нормативные величины [78]. При этом на каждое отдельное

помещение могут воздействовать множество различных факторов различного характера, влияющих на соблюдение этих норм.

Первая группа факторов относится к возмущающим воздействиям, которые влияют на фактическую температуру воздуха и не зависят от системы управления. К таким факторам относятся:

1. Погодные факторы – температура и влажность наружного воздуха, скорость и направление ветра, солнечная радиация.

2. Внутренние тепловыделения, связанные с режимом использования данного помещения: количеством людей в помещении и длительностью их пребывания в нем, характером деятельности людей в этом помещении, количеством теплоизлучающих приборов в помещении и длительностью их использования.

Вторая группа факторов носит конструктивный характер и связана с влиянием свойств теплоограждающих конструкций помещения и излучающей способности отопительных приборов на теплопотери и интенсивность нагрева воздуха в помещении. В этом случае изменение параметров теплопроводности происходит с течением времени в результате отклонения характеристик материалов от заявленных при их старении, а также при проведении ремонтных работ, связанных с теплоограждающими конструкциями.

Третья группа факторов носит структурный характер и связана с назначением и расположением помещения внутри здания, а также с типом подключения отопительных приборов.

1. *Назначение помещения* непосредственно связано с характером деятельности людей в этом помещении, от которого зависят нормативные диапазоны температур. При этом совокупность помещений, имеющих одинаковые нормативные температурные требования, объединяют в температурные зоны внутри здания. В зданиях с различным назначением количество температурных зон и их температурные режимы могут значительно различаться.

2. *Расположение помещения в здании* в совокупности с погодными факторами может также влиять на его температурный режим. Здесь влияние погодных факторов с учетом расположения помещения в здании проявляется в зависимости от:

а) площади поверхности помещения, охлаждаемой наружным воздухом (внутренние, торцевые и угловые помещения);

б) степени попадания солнечной радиации на смежный с помещением фасад здания (северный и южный фасады, западный и восточный фасады в различное время суток);

в) скорости и направления ветра к смежному с помещением фасаду здания.

3. В системах отопления зданий существуют *различные схемы присоединения отопительных приборов*, устанавливаемых в помещениях. В многоэтажных зданиях наибольшее распространение получили схемы с вертикальной разводкой: однотрубные и двухтрубные системы отопления. Основным недостатком однотрубной системы является сложность теплогидравлического расчета и настройки. В этой схеме изменение расхода на предыдущем отопительном приборе ведет к изменению температуры теплоносителя, подаваемого на следующий отопительный прибор. Такое последовательное влияние потребителей существенно ограничивает возможности независимого индивидуального управления. При реализации двухтрубной системы длина трубопроводов возрастает примерно в 2 раза. Но при такой схеме присоединения возможно реализовать независимое индивидуальное управление потреблением тепловой энергии. Также необходимо отметить использование схемы с горизонтальной разводкой, при которой на каждом этаже к общему стояку подключаются несколько лежачков, подающих тепло в различные квартиры, что позволяет реализовать независимое индивидуальное управление теплоснабжением отдельных квартир и упрощает балансировку теплоснабжения между этажами. При этом необходимо учитывать, что на тепловой режим помещений при индивидуальном управлении оказывает влияние

инфильтрация воздуха внутри здания и теплообмен между помещениями через межэтажные перекрытия и внутренние ограждающие конструкции.

При группировке помещений по принципу их присоединения можно соотносить эти группы с группами управления, если для таких групп, связанных одним участком трубопроводной сети, установить регуляторы расхода или температуры на вводах соответствующих им участков трубопроводов. В этом случае группировку помещений можно осуществлять:

1) на уровне здания, устанавливая локальные регуляторы (по отношению к групповому регулятору автоматизированного индивидуального теплового пункта (АИТП) здания) на стояки или отдельные отопительные приборы;

2) на уровне групповых тепловых пунктов (ГТП) микрорайонов или городских тепловых сетей, устанавливая локальные регуляторы (по отношению к групповому регулятору на источнике тепловой энергии сети теплоснабжения) на вводах зданий в АИТП.

При этом для группового регулятора можно проводить группировку не только по принципу присоединения, но и, например, по назначению помещений или по географическому расположению зданий.

4. Также здесь стоит отметить такую структурную составляющую, как *протяженность трубопроводных сетей* в крупных зданиях. С учётом возможных теплопотерь на различных участках трубопровода, связанных с конструктивными факторами, характеристики теплоносителя, поступающего на конечные отопительные приборы, даже при параллельном присоединении, также могут отличаться.

5. *Комбинация различных видов структурных факторов* выражается в пересечении групп помещений по нормативным температурным зонам, по влиянию погодных условий с учетом расположения помещения в здании и по виду присоединения к системе отопления (группе управления).

Четвертая группа факторов. С конструктивными особенностями теплоограждающих конструкций и отопительных приборов, а также со структурными особенностями расположения помещений связаны динамические

характеристики теплотребления этих помещений. В зависимости от действующих в различное время различных погодных и режимных факторов температурный напор через ограждающие конструкции и излучающую поверхность отопительных приборов может быть различен в однотипных помещениях. В связи с этим температура воздуха в этих помещениях будет изменяться с различной скоростью. Поэтому в установившемся режиме нормативная температура помещений может соблюдаться, а в переходных режимах – может нарушаться.

Пятая группа факторов относится к факторам оперативного управления. Основными факторами управления системами отопления являются расход подаваемого теплоносителя (фактор количественного регулирования) и температура подаваемого теплоносителя (фактор качественного регулирования). Наиболее распространённым принципом регулирования подачи тепловой энергии в систему отопления является качественное регулирование, при котором температура теплоносителя, подаваемого на ввод группы потребителей, изменяется по температурному графику в зависимости от температуры наружного воздуха [5,35,80]. Расход теплоносителя в управляемой группе потребителей (помещений) стараются поддерживать постоянным, поскольку зависимость теплового потока отопительных приборов от расхода носит нелинейный характер, а от температуры подаваемого теплоносителя – близкий к линейному.

Шестая группа факторов – экономические факторы. Система отопления здания, обеспечивающая более качественное поддержание требуемого уровня микроклимата, должна быть гибкой в управлении и учитывать как можно большее количество описанных выше факторов. Для этого такая система должна обладать не только достаточно большим количеством датчиков и управляющих устройств, но использовать достаточно сложное математическое обеспечение, позволяющее реализовывать обработку больших массивов данных и управление распределенными группами объектов. Использование большого количества технических средств и разработка соответствующего математического аппарата требует значительных капиталовложений. Поэтому при разработке стараются

оптимизировать структуру и математическое обеспечение системы управления, снижая её сложность путем ввода определенных физических и математических допущений и за счет исключения малозначимых факторов, а также ослабления некоторых ограничений, накладываемых на качественные показатели теплоснабжения зданий. При этом недопустимо нарушение требований нормативно-технической документации, в которой, однако, уже заложены не фиксированные значения, а диапазоны показателей качества микроклимата. Это обстоятельство дает возможность для системы управления обеспечивать не максимально комфортные значения показателей качества микроклимата в каждом помещении, а значения, близкие к максимально комфортным. В этом случае в каждом помещении отклонения температуры от максимально комфортного значения допускаются в установленных пределах и могут быть как в большую, так и в меньшую сторону.

Седьмая группа факторов связана с человеческим фактором: ошибки проектирования, наладки и эксплуатации зданий, отопительной арматуры и отопительных установок могут приводить к значительным отклонениям качественных показателей микроклимата помещений от их нормативных значений. Именно благодаря этому фактору влияние вышеописанных факторов со временем возрастает, приводя к ещё более существенным нарушениям тепловых режимов отдельных помещений, зданий или системы теплоснабжения в целом.

Таким образом, при использовании детерминированных подходов к управлению системой отопления по температурному графику без обратной связи температурный режим помещений в зданиях под влиянием вышеописанных факторов может существенно отклоняться от нормативных значений. Поэтому для достижения комфортных условий труда и проживания людей в помещениях зданий все чаще начинают применяться системы с обратной связью.

Обратная связь в таких системах управления отопления реализуется посредством применения проводных и беспроводных сенсорных сетей температуры воздуха помещений. Такие сети позволили получать информацию от каждого датчика независимо и объединять эти датчики в группы по

произвольному принципу. Применительно к системам контроля и управления микроклиматом помещений основными типами датчиков, предоставляющие информацию в систему контроля и управления, являются:

1) датчики температуры наружного воздуха и температуры воздуха помещений. Иногда их совмещают с датчиками влажности и атмосферного давления;

2) датчики температуры теплоносителя, устанавливаемые для контроля температуры подаваемого и возвращаемого теплоносителя как на отдельных отопительных приборах, так и на отдельных стояках системы отопления;

3) счетчики импульсов, подключаемые к расходомерам, измеряющим расход теплоносителя как на отдельных отопительных приборах, так и на отдельных стояках системы отопления.

На базе датчиков температуры теплоносителя строятся системы поквартирного учета потребления тепловой энергии. Такие системы учета используются в системах отопления с вертикальной разводкой и учитывают распределение потребляемой энергии на стояке по квартирам в зависимости от доли падения температуры теплоносителя на отопительном приборе потребителя в суммарном падении температуры теплоносителя на стояке.

С точки зрения управления интерес представляют беспроводные приводы для регулирующих клапанов, устанавливаемые на стояках или отдельных отопительных приборах, но ввиду их значительного потребления энергии по сравнению с измерительными датчиками, их целесообразно подключать к электрической сети. Тем не менее, использование беспроводных приводов упрощает их монтаж за счёт отсутствия линий связи с устройством сбора и передачи данных.

Таким образом, основной задачей систем регулирования отопления зданий на базе сенсорных сетей становится оперативная балансировка контуров управления группами потребителей с целью равномерного распределения тепловой энергии между отдельными помещениями для поддержания требуемых температурных условий в нормативных диапазонах.

1.2. Обзор литературы

Температура помещений отражает влияние всех действующих на теплотребление факторов и является непосредственным критерием оценки качества работы системы отопления. При использовании детерминированных подходов к управлению системой отопления (по температурному графику без обратной связи) температурный режим помещений в зданиях под влиянием вышеописанных факторов может существенно отклоняться от нормативных значений. Поэтому для достижения требуемых комфортных условий труда и проживания людей в помещениях зданий применяются системы с обратной связью.

В качестве инструмента, реализующего обратную связь от объектов управления (потребителей тепловой энергии), в системах управления применяются сенсорные сети. Исследования систем с обратной связью на базе сенсорных сетей начались в 80-х годах XX века. В частности, в исследованиях Грудзинского М.М., Ливчака В.И., Поза М.Я. [36] экспериментально установлено, что использование показаний датчиков температур воздуха помещений в системах регулирования отопления зданий с использованием ГТП снижает расход тепловой энергии на отопление.

Первые сенсорные сети, применяемые в системах управления ГТП, были проводными. В работах Зингера Н.М. [40] выделены два основных подхода к снятию показаний с датчиков температуры помещений – использование аналоговых датчиков температуры (например, термометры сопротивления и полупроводниковые терморезисторы) и контакторных датчиков температуры, замыкающих сигнальную цепь при достижении температуры заданного уровня. При этом величина оценки влияния различных факторов на температуры помещений производилась на основе электрических характеристик единой измерительной сети, к которой подключались эти датчики. Датчики подключались к цепи измерения последовательно или параллельно. В результате

усреднение выполнялось с помощью самой измерительной схемы с учетом количества используемых датчиков.

В системе управления с контакторными термометрами, разработанной в лаборатории Сибирского филиала Всесоюзного теплотехнического института им. Ф.Э. Дзержинского, температурные датчики соединялись параллельно и подключались через терморезистор к измерительному блоку системы управления. При превышении температуры воздуха в помещении установленного диапазона срабатывал контактор температурного датчика. Чем больше срабатывало датчиков, тем больший ток проходил через измерительную цепь (для ограничения тока каждый датчик температуры соединялся последовательно с резистором с постоянным сопротивлением). Терморезистор, устанавливался в инерционном устройстве, приближенно имитирующем теплоинерционные характеристики отапливаемых зданий, на крыше ГТП и вносил коррекцию на измеряемый ток в зависимости от температуры наружного воздуха. При увеличении измеряемого тока снижался расход теплоносителя, подаваемого от ГТП [39,41]. Зингер Н.М. сделал заключение, что применение такой аналогово-релейной логики управления с использованием контактных датчиков снижает монтажные и эксплуатационные затраты, поскольку для подключения контактных датчиков в протяженной сети требуется двухжильный кабель, в то время как для подключения аналоговых датчиков в протяженной сети требуется минимум трехжильный кабель.

Однако такой подход обладал существенным эксплуатационным недостатком – при выходе из строя измерительной цепи (обрыв, перегорание и короткое замыкание измерительного элемента) в большой сети было крайне проблематично найти неисправный компонент.

С удешевлением элементной базы и появлением цифровых микроконтроллеров более широкое распространение получили системы с разделением измерительных каналов. Каждый терморезистор или измерительная цепь, включающая небольшую группу терморезисторов (сегмент), подключался на отдельный вход контроллера, а контроллеры, в свою очередь, передавали измеренную информацию по проводной сети передачи данных.

Тем не менее, количество датчиков в больших системах всё равно оставалось достаточно велико, что требовало наличия большого количества измерительных входов контроллеров. Кроме того, установка датчиков во всех помещениях здания также была затруднительна по организационным (получение доступа в помещения собственников для установки датчика, согласование мест установки и монтажных работ) и эксплуатационным причинам (получение повторного доступа к месту установки для диагностики и ремонта) [40].

Для решения данной проблемы применялся принцип установки датчиков в представительных помещениях. Температуры в представительных помещениях должны приближенно отражать влияние значимых с точки зрения управления возмущающих факторов, а также текущий тепловой режим здания в целом или отдельных его частей, критичных для контроля состояния системы отопления.

Выбору представительных помещений посвящены работы Грудзинского М.М. Под его руководством в Московском научно-исследовательском и проектном институте типологии, экспериментального проектирования (МНИИТЭП) были разработаны рекомендации по выбору контрольных помещений для расстановки датчиков температуры воздуха. Интересным в указанных рекомендациях является предложение располагать датчики температуры в вентиляционных кухонных шахтах для измерения воздуха, поступающего из жилых помещений [36]. На базе опыта МНИИТЭП по проектированию и эксплуатации средств автоматизации систем теплоснабжения отделом научно-технической информации Академии коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова под руководством В.С. Фаликова и В.П. Великанова были разработаны «Рекомендации по применению средств автоматического регулирования систем отопления и горячего водоснабжения эксплуатируемых жилых зданий» [75].

Также выбору представительных помещений посвящены работы Зингера Н.М., Бестолченко В.Г., Жидкова А.А. [40]. В частности, было рекомендовано устанавливать температурные датчики в помещениях с наиболее неблагоприятными условиями. Например, в системах с вертикальной верхней

разводкой необходимо устанавливать датчики в помещениях первого этажа, поскольку они наиболее удалены от теплового ввода здания, на котором выдерживается расчетная температура теплоносителя. Кроме того, была рекомендована установка датчиков в угловых помещениях, поскольку у этих помещений площадь ограждающих конструкций, через которые они теряют тепловую энергию наибольшая по сравнению с другими помещениями здания.

Для реализации систем управления отоплением с использованием представительных помещений профессором кафедры звукотехники Санкт-Петербургского Государственного Университета Кино и Телевидения Харитоновым В.Б. был разработан регулятор Т-48 с 8 аналоговыми входами для подключения датчиков температур воздуха в помещениях. Температура воздуха помещений оценивалась путем осреднения показаний с этих датчиков [3].

Помимо этого, в работах Зингера Н.М. был математически обоснован выбор количества помещений, в которых необходимо контролировать температуру воздуха. Например, для обеспечения уровня точности в $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и доверительной вероятности 0,95 из 100 помещений было необходимо выбрать не менее 19, в которых должны были устанавливаться датчики температуры воздуха [40].

Измерение температуры в обслуживаемых зонах помещения с постоянным пребыванием людей регламентировано в рекомендациях, указанных в ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» [31]. В указанном документе также представлены оптимальные и допустимые нормы параметров микроклимата помещений и, в частности, температуры помещений в зависимости от их назначения.

Таким образом, состояние системы отопления анализировалось по набору характерных точек. При этом внутри объекта управления некоторых потребителей можно было группировать по различным факторам, влияние которых приводило к поддержанию близких статических или динамических значений температур помещений внутри группы. Группу помещений, схожих по указанным признакам, объединяли в температурные зоны. Также такие группы

могли разделяться и по назначению помещений, и, соответственно, по требуемым в них температурным режимам.

Аналогичным документом, предоставляющим рекомендации по установке датчиков температуры воздуха в помещениях, является Протокол измерений температуры и влажности воздуха в помещениях от команды исследователей *Building America*, составленного Метзгер Ч. и Нортон П. при поддержке Национальной лаборатории по изучению возобновляемой энергии *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*. Помимо рекомендаций по установке датчиков в различных температурных зонах, в документе представлены весовые коэффициенты для оценки температуры помещений [113].

С развитием цифровой техники и появлением архитектуры открытых систем [85] аналоговые проводные сенсорные сети стали вытесняться цифровыми проводными сенсорными сетями. Такие сети позволили:

- 1) объединять в единую сеть значительное большее количество датчиков, поскольку обмен данными с датчиками шел по одному интерфейсу устройства сбора данных;
- 2) получать информацию от каждого датчика независимо, за счет распределенных во времени сеансов обмена данными с датчиками;
- 3) объединять эти датчики в группы по произвольному принципу не зависимо от их местоположения.

Поскольку в цифровых сетях обмен данными распределен по времени, появилась возможность опроса несколькими устройствами различных датчиков, находящимися в одной сети (мультимастерность). Благодаря этому начали развиваться децентрализованные системы управления, в которых решение об управлении отдельными потребителями могло приниматься не только центральной системой управления, но и локальными системами. Таким образом, начали появляться системы с различной степенью децентрализации контроля и управления.

При появлении сенсорных цифровых сетей стали развиваться локальные системы управления типа «умный дом», объединяющие в себе управление

различными источниками и потребителями внутри малых потребителей. Основным требованием к объектам, на которых могла быть развернута такая система, являлась независимость объекта автоматизации от других потребителей. Если теплоснабжение в частных домах являлось автономным, то в многоквартирных домах потребители тепловой энергии зависели друг от друга. И в случаях, когда потребители являются независимыми, системы «умный дом» применяются достаточно часто. В таких системах контур управления потреблением тепловой энергией использует сеть датчиков для измерения различных показателей микроклимата помещения и может управлять несколькими видами нагревательных приборов, такими как водяная система отопления, воздушное отопление, «теплый пол». Проектированию систем управления «интеллектуальных» зданий и систем типа «умный дом» посвящены работы Петровой И.Ю., Зариповой В.М., Лежниной Ю.А., Шумак К.А. [43,72].

Также необходимо отметить быстрое развитие технологии «интернета вещей», согласно которой различные бытовые и промышленные устройства должны оснащаться встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой [103]. Концепция «интернета вещей» рассматривает сети передачи данных как самоорганизующиеся системы управления, которые могут быть вовлечены в экономические и общественные процессы без непосредственного участия человека. В жилищно-коммунальном секторе данная технология широкое применение получила в системах сбора показаний о потреблении энергоресурсов.

Изучению отклонений температур помещений для различных типов зданий с использованием сенсорных сетей посвящена работа Матса Дахлблома [101]. В его исследовании производился сбор температур 3248 комнат в 1177 квартирах города Лунд в Швеции. Для поддержания температуры помещений, равной 21 °С, на радиаторах были установлены термостатические клапаны. Данные собирались в отопительный период с интервалом измерений в 15 минут. При проведении экспериментов были использованы датчики температуры воздуха с абсолютной

погрешностью $\pm 0,15$ °С. При этом было установлено, что даже при применении однотипных регуляторов с одинаковым заданием температуры температура помещений была в среднем на $0,5$ °С выше уставки со стандартным отклонением до $1,4$ °С. Разброс температур между комнатами внутри квартир варьировался в пределах от $0,1$ °С до $0,5$ °С и возрастал с увеличением площади квартиры. Также было замечено, что с увеличением количества комнат (что связывается авторами с увеличением проживающих в квартирах) температура помещений также увеличивалась. При использовании интервальных графиков было отмечено наличие на отдельных объектах значительных отклонений в измеряемых температурах до 2 °С.

Х.-Б. Кунце и Т. Бернхард [112] для построения системы управления микроклиматом помещений применили нечеткую логику, использующую данные сенсорной сети, включающую датчики температуры, влажности и давления воздуха, содержания CO_2 и освещенности. Пользователю предлагалось выбирать уровень, задающий соотношение между комфортностью микроклиматических условий и экономией энергоресурсов. Такая постановка задачи облегчает управление микроклиматом помещений с индивидуальным управлением. Однако для многоквартирных жилых и административных зданий с ограниченным количеством управляющих устройств подобная субъективная оценка микроклимата в зависимости от состояния человека может существенно увеличивать несовместность температурных условий между отдельными помещениями. В подобных системах отсутствует четкая связь с физикой тепловых процессов регулируемой величины, в качестве которой выступает уровень комфортности микроклиматических условий, оцениваемый человеком.

Д. Колокоца использовал данные сенсорных сетей для реализации локальных систем управления с применением контроллеров, использующих алгоритмы нечеткой логики и генетические алгоритмы [107]. В частности, для анализа микроклимата использовался индекс комфортности PMV (Predicted Mean Vote), предложенный Фангером П.О. [104]. Индекс включает в себя показатели

температуры и относительной влажности, скорость движения воздуха в помещениях, оценку внутренних тепловыделений, исходящих от людей, и рабочий режим помещений. Кроме того, управление осуществлялось не только системой отопления, но и системой вентиляции и освещения по критериям максимума комфортности и минимума потребляемой энергии. В связи этим также использовались датчики освещенности и концентрации углекислого газа. В результате использования генетического алгоритма удавалось решать задачу достижения наиболее комфортных условий с минимизацией потребления, однако отмечалось, что в некоторых случаях результат был не самым оптимальным из-за наступления противоречивых условий. Например, в январе при самой низкой температуре наружного воздуха система предлагала занавесить окна из-за высокого уровня освещенности, тем самым уменьшая поступление солнечной энергии в помещение, а, следовательно, повышая потребление тепловой энергии. На данном примере проявляется конфликт слабосвязанных задач комфортности освещенности и температуры, которые решались в рамках работы одного генетического алгоритма посредством выставленных фиксированных весовых коэффициентов значимости для каждой из этих задач при малом количестве параметров (генов), участвующих в анализе по каждой задаче, в рамках одной локальной системы управления.

В работе Файды Е.Л., Файды Л.Ф. и Варганова В.В. [87] описано использование сети температурных датчиков и управляющих устройств в виде электронагревательных приборов. В работе рассматривается релейный принцип управления с ограничением по суммарной потребляемой мощности. Система управления циклично включала обогреватели в самых холодных помещениях, а в помещениях с температурами, близкими к норме, отключала нагревательные приборы. При этом допускалось включение такого количества приборов, суммарное потребление которых не превышало максимальной установленной нагрузки для системы электротеплоснабжения.

В работе Валека Б. балы приведена экспертная система на базе нечеткой логики [98], которая для управления температурой теплоносителя использовала

показания сети датчиков температуры, влажности и скорости воздуха в помещении, а также датчиков температуры наружного воздуха. Пользователь системы определял комфортные и некомфортные показатели микроклимата помещений. На основании этого выбора происходило обучение экспертной системы, которая в процессе работы генерировала соответствующие управляющие воздействия с целью удержания показателей микроклимата в комфортной зоне.

Ф. Замора-Мартинез, П. Ромеу, П. Ботелла-Рокамра и Дж. Падро в работе [116] исследовали различные методики прогнозирования температуры помещений в модульных зданиях с солнечными коллекторами, используемыми для систем вентиляции, отопления и кондиционирования. В работе сравнивались методы прогнозирования временных рядов температуры помещений в зависимости от температуры наружного воздуха и интенсивности солнечного излучения на основе авторегрессии с использованием методов нейронных сетей [126] и байесовского вывода [100,106]. По результатам проведенных экспериментов было отмечено, что более простые модели при малом количестве данных могут достигать сопоставимых или даже лучших результатов по точности прогнозирования по сравнению с более сложными методами (например, на основе нейронных сетей с несколькими слоями).

В работе Спенсера Б. и Алфанди Ф.О. [121] рассматривалось прогнозирование температуры помещений с использованием 38 датчиков, измеряющих температуру и влажность наружного воздуха и воздуха в помещениях, скорость ветра, наличие дождя, потребление электроэнергии и перемещение в помещениях здания. В эксперименте интервал архивных данных составлял 15 минут. Для прогноза использовалась линейная регрессионная модель. С использованием предложенной модели авторам удалось добиться точности прогноза температуры в $0,5^{\circ}\text{C}$ на период прогноза, равный 2,75 часа. При этом в качестве основных факторов, влияющих на прогноз, были выделены температура и влажность наружного воздуха, влажность воздуха в помещениях, а также датчики перемещения между помещениями. Авторы также отметили, что

их прогнозной модели достаточно данных за трехчасовой период, чтобы обеспечить указанную точность прогноза, что позволяет оперативно восстанавливать работу контроллеров, использующих предложенную авторами модель, после устранения возможных различных сбоев в работе датчиков.

Развитием темы определения количества и видов датчиков, необходимых для прогноза температуры помещений, стала работа Спенсера Б., Аль-Обейдата Ф. и Алфанди Ф.О. с 88 датчиками 18 видов и 49 управляющими устройствами [122]. В работе для прогноза использовалась линейная регрессионная модель и регрессия по методу «лассо». Авторы отмечают, что при различном периоде прогноза для достижения заданной точности требуются различное количество датчиков. Использование регрессии по методу «лассо» позволило определить авторам набор датчиков, существенно влияющих на прогноз температуры помещений: датчик скорости ветра, датчик освещенности помещения, датчики концентрации CO₂ в зале и в кухне, датчик температуры наружного воздуха, а также датчики положения солнца для основных фасадов здания (западном и восточном).

В работе [74] Тютикова В.В., Яблокова А.А., Смирнова Н.Н., Лапатеева Д.А. была представлена автоматизированная система распределенного управления теплоснабжением зданий с использованием датчиков присутствия и наружной освещенности. Управление температурой помещений в дежурном режиме осуществлялось с использованием системы водяного отопления. В рабочем режиме система управления позволяла поддерживать различную температуру воздуха во всех помещениях здания посредством открытия/закрытия теплоотражающих экранов, установленных в оконных проемах. Авторами было предложено два принципа управления теплоотражающими экранами: по расписанию и по сигналу от датчика наружной освещенности.

В многоквартирных домах потребители оказывают взаимно влияние друг на друга по нескольким причинам:

- 1) из-за схем разводки системы отопления с последовательной подачей теплоносителя на нагревательные приборы;

2) из-за теплообмена между помещениями через внутренние теплоограждающие конструкции и посредством инфильтрации воздуха в здании;

3) из-за различного теплопотребления при ограничении суммарной располагаемой мощности источника тепловой энергии.

Поэтому для учета различных связей внутри объекта с целью повышения качества контроля и управления микроклиматом помещений широкое применение нашли различные методики моделирования теплового режима зданий на базе сенсорных сетей. При этом при построении моделей теплового режима зданий выделяют 3 направления применения сенсорных сетей [45]:

1. Идентификация структурных взаимосвязей потребителей внутри системы теплоснабжения на основе множества индивидуальных показателей датчиков микроклимата помещений. Такой подход используется при построении модели потребителя по принципу «белого ящика», когда на базе физической модели объекта посредством формул, описывающих различные термо-, гидро- и газодинамические процессы, задается структура связей между элементами системы. При этом показания отдельных датчиков характеризуют выходные параметры контролируемых конечных и промежуточных элементов системы и используются для идентификации параметрических характеристик этих отдельных элементов и их связей.

Ю.А. Табунщиков и М.М. Бродач [82,84] предложили математическую модель теплового режима зданий, в основе которой лежит математическая модель радиационного теплообмена в помещении, использовавшие уравнения теплового баланса, а также математическая модель конвективного теплообмена в помещении, основанная на дифференциальных уравнениях энергии и сплошности. Кроме того, в работе Табунщикова Ю.А. [83] были рассмотрены основные физико-математические модели различных тепло- и газодинамических процессов, описывающих тепловой режим здания.

Теплоотдача нагревательных приборов была описана в работах Соколова Е.Я. [80]. При этом в его работах тепловая нагрузка рассчитывалась в зависимости от нескольких параметров, основными из которых были

коэффициент теплопередачи отопительного прибора, время работы прибора, а также расход и температура теплоносителя, подаваемого на прибор.

В работах Гринева А.В. [33,34] было отмечено, что расчётно-аналитический метод слабо учитывает изменение эксплуатационных характеристик технических агрегатов и энергопотребление оборудования, не задействованного в технологическом процессе. Это было обусловлено тем, что энергетические характеристики агрегатов рассматривались как детерминированные зависимости, в то время как потребление энергоресурсов представляет более сложный процесс с разветвлёнными схемами энергоснабжения, включающими в себя большое количество потребителей, существенно отличающихся по мощности и производственному назначению и работающих в разных условиях и режимах. При этом энергопотребление каждого отдельного агрегата зависело от большого количества различных факторов, изменяющихся во времени случайным образом. Все это позволило рассматривать энергопотребление как случайный процесс, что требовало применение вероятностного подхода при расчёте норм потребления энергоресурсов [9].

Специалисты ОДО «Энерговент» под руководством Волова Г.Я. использовали нестационарную математическую модель теплового режима помещений [19,20,21,42]. Модель, построенная в специализированной программе МОДЭН, позволила рассчитывать параметры режимов работы системы кондиционирования в нестационарных условиях для выполнения требуемых микроклиматических условий помещений здания. В частности, в работе [42] помещение рассматривалось, как объект с сосредоточенной структурой, для которого учитывалась аккумулирующая способность воздушной среды.

Математическая модель нестационарных тепловых процессов помещений также описана в работах Аверьянова В.К. [2]. Предложенная в его работе модель использовала уравнения теплового баланса. Недостаток этой модели заключался в том, что при представлении возмущающих воздействий с использованием сплайнов конечное решение находилось с определенным приближением [89].

В работах Панферова В.И. [69,70,71] для расчёта и идентификации динамической модели здания использовались характеристики теплоотражающих конструкций и аккумулирующей способности здания, что значительно повысило точность тепловой модели здания.

В работах Голяка С.А. [79,29] рассмотрено влияние гидравлического режима сети теплоснабжения и комбинированных систем отопления на тепловой баланс зданий.

Математическому моделированию теплового режима энергоэффективных зданий с нулевым энергопотреблением посвящены работы Султангузина И.А., Калякина И.Д., Ашихминой А.А., Федюхина А.В., Яворовского Ю.В. [57,66].

Моделирование с использованием структурных связей применяется в программном обеспечении для моделирования централизованных систем теплоснабжения. В таких системах применяются сенсорные сети, включающие в основном приборы учета тепловой энергии, предоставляющие данные с датчиков температуры, расхода и давления, а также данные по потребленной тепловой энергии [95,115]. Эти данные используются для приближенной идентификации характеристик теплопотребления зданий в зависимости от температуры наружного воздуха, а также для калибровки гидравлических и тепловых потерь в модели трубопроводной сети. Целью работы таких моделей является управление источниками тепловой энергии для поддержания параметров трубопроводной сети в контрольных точках, минимально достаточных для предоставления каждому зданию теплоносителя с требуемыми ему качественными и количественными показателями. Основное внимание в данных системах уделено поддержанию теплогидравлических параметров сети, поэтому в моделях объектов обычно рассматриваются статистические суточные графики нагрузки с учетом температуры наружного воздуха. Примером применения такого подхода является ПО *Termis Software* производства фирмы *Schneider Electric* с модулем оптимизации температуры и давления [124] и ПО *GRADES Heating* производства фирмы *Process Vision Ltd. Market* [117].

2. Идентификация обобщенных физических характеристик потребителей с использованием усредненных показателей датчиков микроклимата помещений (в частности, температуры помещений). Такой подход используется при построении модели потребителя по принципу «черного ящика», когда взаимосвязи в объекте достаточно сложны, чтобы их смоделировать, но система отопления в целом настроена так, что все измеряемые точки приблизительно одинаково зависят от параметров подаваемого теплоносителя.

В рамках этого направления расчёты тепловых потерь здания, которые необходимо скомпенсировать посредством системы отопления, представлены в работах [16,17, 50,51,76]. В основном эти расчёты учитывают потери тепловой энергии через ограждающие конструкции, на инфильтрацию воздуха и на вентиляцию помещения.

А. Гилюса и Э. Исявмчюса [26] описали математическую модель системы отопления зданий с использованием удельного расхода тепловой энергии на подогрев воздуха в помещениях на 1°C . В данной модели использовались суточные показатели потребления тепловой энергии и среднесуточные значения температур воздуха. Недостатком данной модели стало то, что она не учитывала возможные резкие колебания температуры в течение суток и не могла быть применена при моделировании динамических режимов теплоснабжения. Подобные модели использовали в своих работах Байтингер Н.М., Бурцев В.В., Басин А.С. и Ершова М.И. [6,18].

В.И. Ливчак, Ю.А. Матросов, И.Я. Бутовский [54,55,58] использовали для математического описания систем управления теплоснабжением проектный удельный расход тепловой энергии системой отопления здания, значение которого сравнивалось с требуемым значением удельного расхода тепловой энергии. Применение аналогичных математических моделей рассмотрено в работе [125].

Ливчак В.И. предложил для жилых зданий, в системе отопления которых на отопительных приборах используются термостатические регуляторы, при

определении годового потребления тепловой энергии вводить понижающий коэффициент, учитывающий влияние вентиляции. При определении тепловых потерь здания, компенсируемых системой отопления, автор предложил вводить коэффициент, учитывающий влияние конструкций зданий (многоэтажные здания башенного типа, многосекционные и протяженные здания, и др.). При определении тепловых поступлений зданий Ливчак В.И. вводил коэффициенты эффективности теплозащиты здания и эффективности автоматического регулирования подачи тепловой энергии на отопление.

В работах [92,96,97] Казаринова Л. С., Шнайдера Д.А., Абдуллина В.В. для управления тепловым режимом здания на основе потребляемой тепловой энергии и средневзвешенных показаний температуры воздуха помещений, получаемых посредством сенсорных сетей, используется построение обратного динамического оператора с использованием метода экспоненциальной фильтрации.

3. Идентификация обобщенных связей, основанных на физических принципах, между множеством индивидуальных показателей датчиков микроклимата помещений и факторами, влияющими на теплопотребление. Такой подход используется при построении модели потребителя по принципу «серого ящика», когда между входными факторами теплопотребления и выходными показаниями множества датчиков конечных потребителей эвристическими методами на основе обобщенных физических уравнений ищутся неявные математические взаимосвязи.

В справочном пособии Апарцева М.М. [5], опубликованном в 1983 г., были предложены методические указания по расчету режимов и параметров работы теплогенерирующего, сетевого и теплопотребляющего оборудования водяных систем централизованного теплоснабжения. В справочном пособии также приведены таблицы и номограммы для расчета теплотехнических и гидравлических характеристик генерирующего, сетевого и потребляющего оборудования систем теплоснабжения.

В работе [39] Зингера Н.М., опубликованной в 1986 г., рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования режимов функционирования

тепловых пунктов, в которых для различных схем присоединения систем отопления к городским водяным системам теплоснабжения рассматривалось влияние на температурный режим зданий основных регулирующих и возмущающих воздействий на основе математического моделирования статических и динамических характеристик отопления здания. В работе были рассмотрены закрытый и открытый типы присоединения к тепловым сетям. Автором использовались методы аналитического расчета и физического моделирования тепловых сетей с применением гидро- и электроустановок, математического моделирования гидравлических режимов тепловых сетей, теплогидравлических режимов абонентских отопительных приборов с применением ЭВМ.

В работе Соколова Е.Я. [80] были изложены энергетические основы теплофикации, рассмотрены централизованные системы теплоснабжения и режимы их регулирования, описана методика теплогидравлического расчета трубопроводных сетей теплоснабжения. Автором предложены пути повышения надежности с использованием резервирования теплоснабжения, методы расчета гидроудара и защиты от него, а также методы технико-экономического обоснования использования систем теплоснабжения.

Демченко В.А. в работе [38] рассмотрел методы расчета динамических параметров инженерных сетей с применением систем уравнений с сосредоточенными параметрами, применяемых при анализе систем автоматического регулирования.

Применение вычислительной техники в теории гидравлических цепей в 1964 г. одним из первых описал Меренков А.П. в кандидатской диссертации «Методы комплексной оптимизации тепловых сетей с применением электронных вычислительных машин» [62]. Автором с использованием метода динамического программирования Беллмана была решена задача нелинейного программирования для оптимизации параметров разветвленной гидравлической сети теплоснабжения. Меренков А.П. для идентификации трубопроводных систем разработал сетевой подход («Метод математического расходомера»), в котором для

расчетов режимов функционирования систем теплоснабжения применяются сетевые уравнения распределения потоков. Постановку и решение обратных задач распределения потока (идентификация гидравлических сопротивлений, расходов на участках сети, расходов на потребителях и величины утечки теплоносителя) в 1974 г. Меренков А.П. описал в докторской диссертации «Математические модели и методы для анализа и оптимального проектирования трубопроводных систем» [61]. В работе также была рассмотрена дифференциация методов расчета гидравлических сетей, описана постановка и алгоритмизация задач оптимального синтеза трубопроводных систем.

В 1978 г. под редакцией Хасилева В.Я. и Меренкова А.П. была опубликована работа «Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей» [65], в которой были изложены методы и алгоритмы расчёта и анализа гидравлических режимов тепловых сетей. С использованием представленных вычислительных алгоритмов был решен ряд эксплуатационных и проектных задач в области систем теплоснабжения: анализ штатных и аварийных гидравлических режимов, оптимизация трассировки сетей теплоснабжения, подбор диаметров трубопроводов и напоров.

В 1985 г. Меренков А.П. и Хасилев В.Я. опубликовали монографию «Теория гидравлических цепей» [63], в которой были изложены основные положения теории гидравлических цепей, методы и алгоритмы трубопроводных сетей. В работе особое внимание уделено терминологии и рассмотрению теории гидравлических цепей как научно-технической дисциплины.

Развитие вычислительной техники позволило перейти к расчётам и анализу больших трубопроводных систем. Для моделирования течения жидкости в трубопроводах и теплообмена были разработаны соответствующие алгоритмы [28,37,56,118]. Особенно стоит отметить итеративные увязочные методы Меренкова А.П. [65], которые получили широкое распространение при решении задач стационарного распределения потока. Увязка сети с заданными гидравлическими сопротивлениями и действующими напорами заключалась в нахождении значений расходов на всех участках сети и давлений во всех узлах

сети. В основе гидравлического расчёта сети были положены правила Кирхгофа по аналогии с электрическими цепями, где гидравлическое сопротивление участка цепи ставилось в соответствие электрическому сопротивлению, расход жидкости – электрическому току, а гидравлический напор – напряжению.

Увязочные методы используют обобщенные методы расчета нелинейных гидравлических цепей: метод контурных расходов (МКР) и метод узловых давлений (МД). МКР аналогичен методу контурных токов, используемому совместно с методом Ньютона для решения системы нелинейных алгебраических уравнений при расчете линейных электрических цепей. В работе [65] было показано, что МКР имеет более широкую область сходимости, чем МД, и поэтому более предпочтителен для решения большинства подобных задач. Обобщенный МКР использует метода Ньютона-Рафсона с преобразованиями переменных к контурным величинам и формированием симметричных матриц на каждом шаге алгоритма. Процедура расчета распределения потоков в нелинейной цепи сводилась к многократному решению систем линейных уравнений с симметричной матрицей k -го порядка (k – количество линейно независимых контуров). В рамках МД производилось многократное решение системы $(m-1)$ -го порядка, где m – количество узлов в системе.

Основным недостатком этих методов являлась зависимость скорости сходимости от количества неизвестных, начального приближения и выбора системы независимых контуров. Поэтому для реализации гидравлических расчетов трубопроводных систем в рамках автоматизированных систем управления возникла необходимость разработки алгоритмов, позволяющих эффективно решать нелинейных системы с большим количеством уравнений в реальном времени [27].

В диссертационной работе [67] Мызникова А.М. «Моделирование и идентификация параметров сложных гидравлических сетей» были предложены методы повышения эффективности алгоритмов расчета больших трубопроводных систем, а также решения обратных задач идентификации объектов. В работе была предложена модификация метода последовательных

приближений, существенно сократившая количество итераций расчета и повысившая точность вычислений. Для произвольного закона гидравлического сопротивления в нелинейных уравнениях была доказана единственность определения распределения потока. В работе была рассмотрена задача уточнения коэффициентов гидравлического сопротивления при ограниченном количестве датчиков. Для обеспечения плавного переключения между режимами работы гидравлической сети был предложен метод расчета функции последовательного изменения активных сопротивлений.

Проблемам управления централизованными системами теплоснабжения зданий при дефицитных режимах с использованием макро моделирования теплогидравлических режимов потребителей, источников и трубопроводных сетей посвящена диссертационная работа Шнайдера Д.А. [91].

В работе [77] Рубашкин А.С., Вербицкий В.Л. были рассмотрены физический и имитационный методы построения математических моделей процессов, протекающих в теплоэнергетических установках.

В работе Крицкого Г.Г. и Аширова А.А. [52] было приведено описание современного программно-расчетного комплекса «Арттест-Zulu», разработанного компанией «Политерм» на базе геоинформационной системы «Zulu», который позволял выполнять расчеты тепловых сетей большого объема и любой сложности. Пакеты ZuluThermo и ZuluHydro, входящие в состав вышеназванного комплекса, предоставляли инструменты создания математической модели сети, паспортизации сети, и позволяли на основе созданной модели решать информационные задачи, задачи топологического анализа, выполнять различные теплогидравлические расчеты.

Моделирование централизованных систем теплоснабжения тесно связано с моделированием источников тепловой энергии.

В работах Мелентьева Л.А., Попырина Л.С., Левенталя Г.Б., Клера А.М. и др. [48,53,59,60,73] рассматривались вопросы, посвященные автоматизации, математическому моделированию режимов работы и оптимизации параметров

теплоэнергетических энергоустановок различных типов и технологических схем, в том числе в условиях неоднозначности информации.

Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок осуществлялась преимущественно в двух направлениях:

1. Математическое моделирование проектируемых установок с использованием конструкторских расчетов.

В этом направлении стоит отметить работы коллектива авторов во главе с Андриющенко А.И. [4], а также Кафарова В.В. и Мешалкина В.П. [46]. В работе [25], выполненной коллективом авторов из МЭИ, предлагались подходы к проектированию ТЭЦ и выбору состава оборудования с использованием ЭВМ. Основной задачей являлось распределение тепловых и электрических нагрузок между основными агрегатами тепловой электростанции: турбоагрегатами, котлами и редукционно-охладительными установками. Задача оптимального распределения нагрузок усложнялась для тепловых электроцентралей ввиду сложности структуры и наличия разнотипного оборудования.

Распределение нагрузок между агрегатами тепловых электростанций могло осуществляться с применением следующих подходов:

1) энергетическое эквивалентирование, предложенное Горнштейном В.М. [30]. Оптимизация агрегатов производилась на основе характеристики относительных приростов, которая рассчитывалась для каждого агрегата и станции в целом. Такой подход был удобен до появления быстродействующих ЭВМ. Он применялся в автоматизированных системах диспетчеризации энергосистем, так как позволял оперативно выполнять требуемые расчеты;

2) эксергетический метод, описанный в работах Ноздренко [68] и Хлебалина [88]. При синтезе математических моделей энергоустановок составлялись материальные, энергетические и эксергетические балансы, в которых учитывалось количество тепловой энергии и её качество, характеризующее энтропией. Применение эксергетического подхода было связано с необходимостью анализа режимов работы энергоустановок и увеличения их коэффициента полезного действия;

3) разработка математических моделей на основе нормативных методик определения параметров энергоустановок. Этот подход был наиболее востребован, так как позволял оперативно производить расчеты необходимых параметров, однозначно определяющих расчетный режим.

2. Математическое моделирование существующего оборудования с определенными конструктивными характеристиками с применением поверочных расчетов.

В этом направлении стоит отметить работы Вульмана Ф.А. [22,23,24], рассмотревшего математические модели теплоэнергетических установок с точки зрения подходов модульного программирования. Автором был предложен подход к автоматизации математического моделирования теплоэнергетического оборудования в рамках программно-вычислительных комплексов.

Для оптимизационного исследования сложных энергетических установок широко применялся метод сплошного перебора заранее заданного множества вариантов схем и параметров [102]. Также стоит отметить работу Такеи К. [123], в которой применялись методы термодинамического анализа совместно с простыми тепловыми моделями.

Для автоматизации разработки математических моделей теплоэнергетических установок с использованием уравнений материального и энергетического баланса сотрудниками ИСЭМ СО РАН был создан программно-вычислительный комплекс «Система машинного построения программ СМПШ-ПК» [47,48,111]. Система позволяла на основании информации об составе технологической схемы и связях между элементами автоматически создавать программу расчета сложных установок.

Таким образом, в основе современных систем управления теплоснабжением лежит обширная научная и техническая база. В алгоритмах управления могут учитываться различные факторы, характерные для того или иного вида объектов. В современных системах сенсорные сети являются ключевым инструментом, позволяющим наиболее полно отразить влияние исследуемых факторов на различные элементы, функции и процессы распределенного объекта управления.

1.3. Постановка цели и задач исследования

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 невозможно за счет ограниченного количества управляющих устройств 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.

Целью исследований в данной диссертационной работе 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.

В соответствии с указанной целью в рамках данной диссертационной работы необходимо решить следующие **задачи**:

1. Формализация постановки задачи оперативного управления теплоснабжением зданий на базе сенсорных сетей.

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

3. Разработка интерактивного алгоритма управления группой зданий на базе сенсорных сетей в дефицитном режиме функционирования централизованной системы теплоснабжения с ограниченной располагаемой мощностью источников тепловой энергии.

4. Разработка структуры автоматизированной системы модельно-прогнозирующего управления теплоснабжением зданий на базе сенсорных сетей.

5. Разработка программного обеспечения, реализующего предложенные алгоритмы распределенного управления теплоснабжением зданий.

6. 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.

7. Внедрение в эксплуатацию системы оперативного контроля и управления теплоснабжением зданий университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» на основе сенсорных сетей.

8. Проведение идентификации параметров зданий с использованием данных сенсорных сетей и энергоаудита.

9. Разработка имитационной макромоделли теплоэнергетического комплекса университетского городка.

10. Апробация предложенных алгоритмов распределенного управления на базе теплоэнергетического комплекса ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Выводы к главе 1

1. На микроклимат помещений зданий могут оказывать влияние разнообразные внутренние и внешние факторы, которые, в свою очередь, приводят к существенным отклонениям температурных условий помещений от их нормативных значений. Для идентификации нарушений температурного режима

помещений современный уровень развития техники и технологий позволяет создавать распределенные программно-технические комплексы, включающие в себя сотни и тысячи датчиков температуры, объединенных в сенсорные сети.

2. Применение температурных сенсорных сетей позволяет учитывать различные факторы, влияющие на теплопотребление здания. При этом количество управляющих устройств, применяемых для оперативного управления теплопотреблением, как правило, существенно ограничено, что связано с особенностями гидравлических схем подключения потребителей, а также высокой стоимостью внедрения и трудоемкостью обслуживания индивидуальных управляющих устройств. В итоге удовлетворение одновременно всех температурных требований к качеству обеспечения микроклимата помещений зданий за счет оперативного управления отоплением является затруднительным.

3. Наряду с применением управляющих устройств, корректировка температур воздуха в помещениях может быть осуществлена также путем выполнения ограниченного набора мероприятий организационно-технического характера, включающих локальные энергосберегающие мероприятия в помещениях здания и балансировку сегментов системы отопления. Применение данных мероприятий нацелено на повышение качества микроклимата помещений и может приводить как повышению, так и к снижению количества потребляемой тепловой энергии.

4. Актуальной научно-технической задачей является нахождение комплекса оперативных и организационно-технических управленческих решений, которые позволят выполнить максимально возможное в текущих условиях количество требований к качеству теплоснабжения за счет минимально достаточного количества управляющих воздействий. На сегодняшний день решение данной проблемы в литературе проработано недостаточно и основывается преимущественно на усредненных показателях качества отопления зданий. Данное диссертационное исследование ставит своей целью решение указанной проблемы путем разработки методов и алгоритмов распределенного управления отоплением зданий на основе сенсорных сетей.

ГЛАВА 2. МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ ПРИ ПРОТИВОРЕЧИВЫХ УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

2.1. Формализация задач оперативного управления теплоснабжением зданий при противоречивых условиях

2.1.1. Общая структура модели управления распределенным объектом теплопотребления

Основной целью теплоснабжения является поддержание комфортных условий труда и проживания человека в помещениях зданий, строений и сооружений. При этом тепловая энергия, поступающая в здание, разделяется на два вида по назначению: отопление помещений и горячее водоснабжение.

При оценке качества теплоснабжения используются соответствующие показатели микроклимата помещений (температура воздуха в помещениях) и параметры системы горячего водоснабжения (температура горячей воды), для которых в нормативно-технической документации установлены соответствующие нормативные величины.

В данной работе рассматривается качество микроклимата помещений, характеризующееся температурой воздуха в этих помещениях. За поддержание температуры воздуха в помещениях отвечает система отопления здания. Поэтому температура воздуха помещений будет являться непосредственной качественной характеристикой работы системы отопления.

Совокупность всех факторов и процессов, определяющих тепловое состояние его помещений, называют тепловым режимом здания. Полное соблюдение теплового режима здания выполняется при соблюдении температурных норм во всех его помещениях. Это состояние может быть характеризовано выполнением неравенств следующего вида:

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max}, i = 1..m, \quad (2.1)$$

где T_i – фактическая температура воздуха в i -ом отапливаемом помещении; T_i^{\min} и T_i^{\max} – минимальная и максимальная нормативные температуры воздуха в i -ом помещении; m – количество представительных помещений, в которых контролируется температура воздуха.

Ранее было отмечено, что на выполнение неравенств в системе (2.1) одновременно влияет множество факторов, поэтому при использовании алгоритмов управления температурой подаваемого теплоносителя соблюдение неравенств в системе (2.1) необходимо контролировать. Такой контроль можно обеспечить с помощью беспроводных сенсорных сетей. Получая в автоматическом режиме данные от сенсорных сетей, становится возможным организовать систему управления с обратной связью. Далее рассмотрим подробнее задачу управления системой отопления с использованием данных сенсорных сетей температуры воздуха помещений.

В системах отопления зданий распространены различные схемы трубопроводной разводки и подключения отопительных приборов, включая схемы с последовательным, параллельным, а также комбинированным подключением. Примером являются системы с нижней и верхней вертикальной разводкой, в которых несколько потребителей соединены последовательно в пределах стояка, а стояки присоединены параллельно к общим лежачкам (подающему и обратному), подключенными к теплообменному аппарату или смесительной системе в АИТП. При этом на АИТП реализовано качественное регулирование за счет использования циркуляционных насосов для поддержания постоянного расхода теплоносителя и теплообменного аппарата или смесительного устройства с подмесом для изменения температуры теплоносителя, подаваемого в систему отопления [86]. Необходимо отметить, что в наиболее распространенных зависимых системах отопления с узлом смешения не всегда удается поддерживать расход теплоносителя в системе отопления постоянным из-за влияния изменений давления в тепловых сетях. Поэтому основными факторами регулирования во многих системах отопления являются

температура T_{01} и расход G_{01} теплоносителя, подаваемого потребителям в j -ой системе отопления. Регулирование при этом в j -ой системе отопления осуществляется с использованием контроллера погодного регулирования по температурному графику (рисунок 2.1).

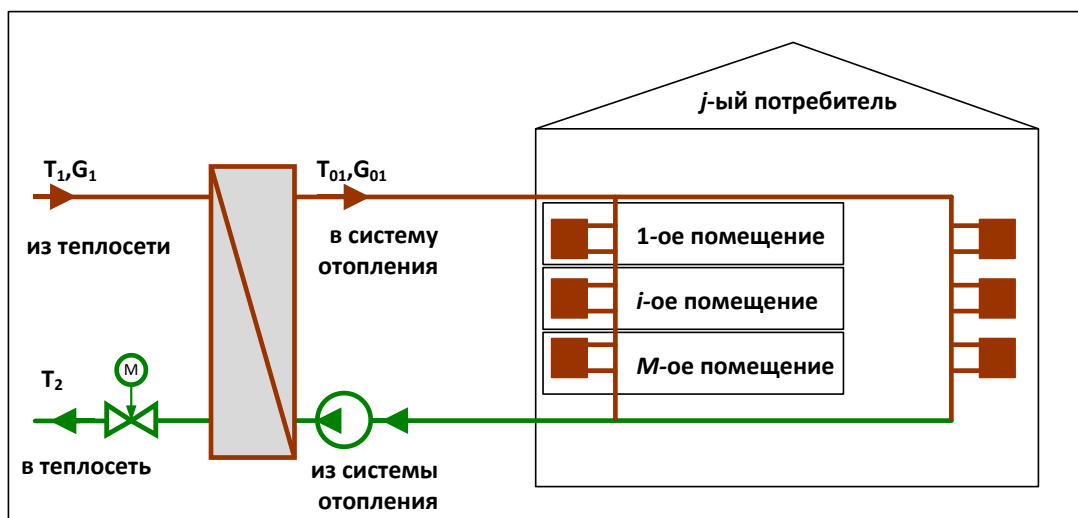


Рисунок 2.1 – Система отопления с регулированием температуры подаваемого теплоносителя на выходе АИТП

Фасады также могут управляться индивидуально за счет собственных контуров с регулирующим клапаном и циркуляцией [15]. В этом случае будем рассматривать отдельный j -ый фасад и обозначим температуру и расход теплоносителя, подаваемого от контура пофасадного регулирования на потребителей, соответственно T_{01} и G_{01} (на рисунке 2.2 для первого фасада – $T_{01,1}$ и $G_{01,1}$, для второго фасада – $T_{01,2}$ и $G_{01,2}$).

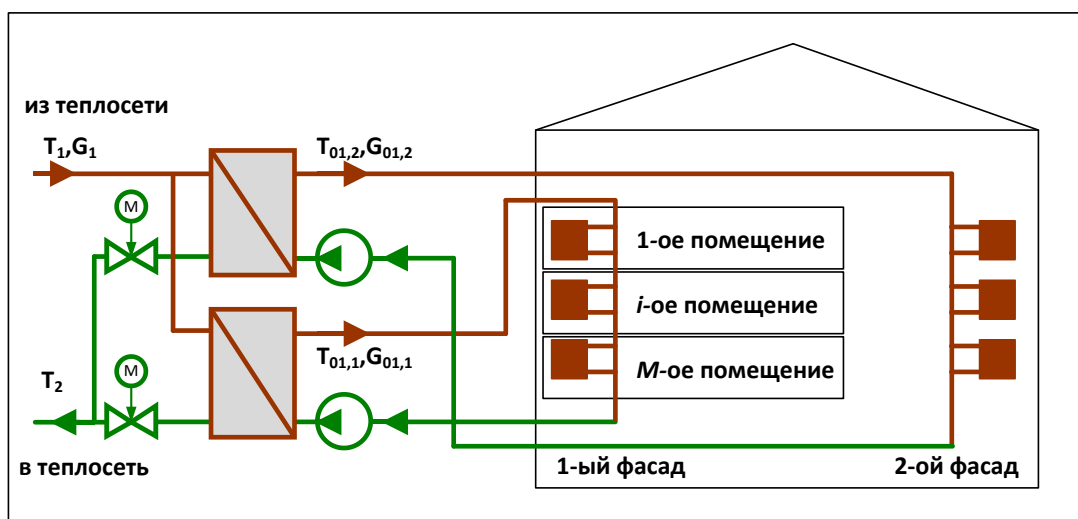


Рисунок 2.2 – Система отопления с пофасадным регулированием

На отдельных стояках также могут быть установлены регулирующие клапаны. В этом случае будем рассматривать отдельный j -ый стояк, на котором обычно отсутствует контур циркуляции, и поэтому управляемой величиной является только расход теплоносителя $G_{01,j}$, подаваемого потребителям от общего лежака (рисунок 2.3).

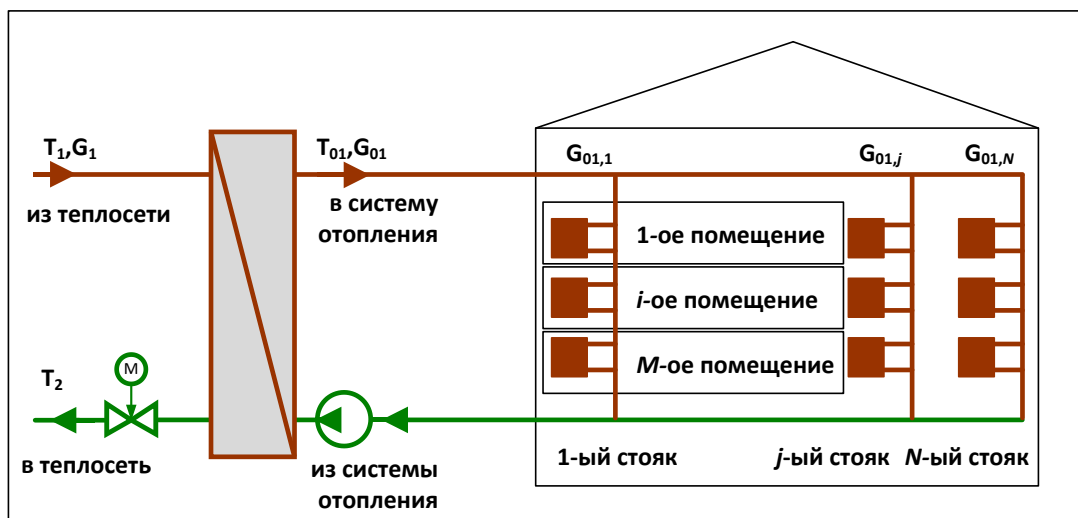


Рисунок 2.3 – Система отопления с регулированием расхода теплоносителя на стояках

Аналогичным образом можно представить централизованную систему теплоснабжения микрорайона, в которой будем рассматривать отдельный j -ый ГТП и обозначим температуру и расход теплоносителя, подаваемые от него на группу зданий, соответственно T_1 и G_1 (рисунок 2.4).

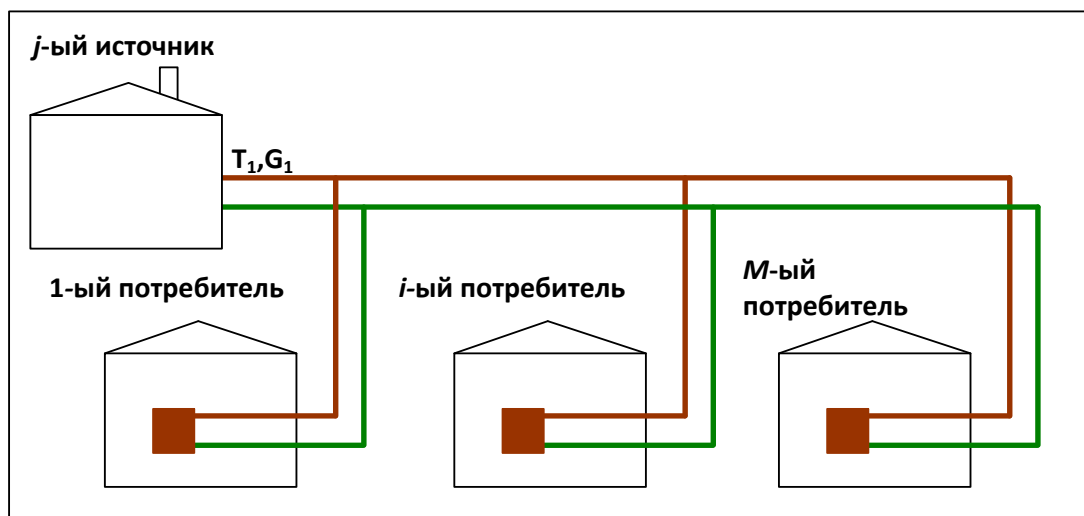


Рисунок 2.4 – Система отопления с ГТП

Поскольку в такой декомпозиции системы теплоснабжения каждая j -ая система отопления имеет собственный регулятор, далее будем рассматривать управляющие воздействия каждой j -ой системы как входные факторы, влияющие на температурный режим помещений здания.

Рассмотрим базовую модель управления распределенным объектом теплотребления, предлагаемую в данной работе. Общая структура данной модели представлена на рисунке 2.5.

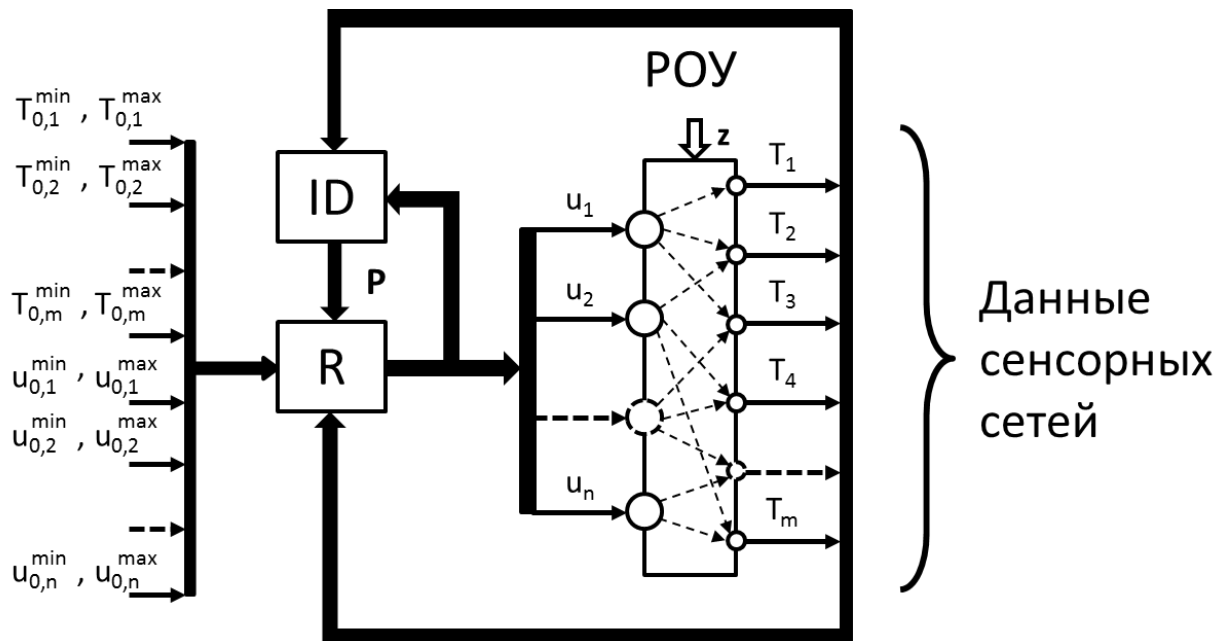


Рисунок 2.5 – Общая структура модели управления распределенным объектом теплотребления

Здесь 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 входных воздействий с выходными параметрами \mathbf{P} . 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 учетом ограничений $\{u_j^{\min}, u_j^{\max} : i=1..n\}$ определяются значения управляющих воздействий $\{u_j : j=1..n\}$,

обеспечивающих решение задачи удовлетворения заданным интервалам изменения температур.

В работе рассматривается 2 задачи управления РОУ в противоречивых условиях:

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

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

2.1.2. Задача удовлетворения заданным интервалам изменения температур в помещениях здания

Дана система взвешенных неравенств:

$$\begin{aligned} T_i^{\min} \leq F_i(\mathbf{u}) \leq T_i^{\max} : \alpha_i, \quad \forall \alpha_i \geq 0, \quad i \in I_T, \\ T_i = F_i(\mathbf{u}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

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 (2.2).

Система взвешенных неравенств (2.2) 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 сотни и тысячи датчиков температуры, в то время как число управляющих устройств в системе теплоснабжения относительно ограничено. Вследствие этого обычные методы настройки систем теплоснабжения обладают ограниченными возможностями, так как не учитывают фактор противоречивости постановки задачи (2.2) обеспечения

выполнения технических требований к температурам распределенного объекта теплопотребления, сформулированных для случая использования сенсорных сетей.

В этой связи для решения задачи настройки системы теплопотребления при заданных температурных условиях в противоречивой постановке в рамках автоматизированной системы управления в работе разработан специальный алгоритм решения подобных задач.

Для решения задачи настройки систем теплопотребления в противоречивой постановке формулируется следующая экстремальная задача:

$$N_{\text{ВТУ}} = \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot \mu_i(\mathbf{u})}{\sum_{i=1}^m \alpha_i} \cdot 100\% \rightarrow \max_{\{\mathbf{u}\}} \quad (2.3)$$

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

$$\mu_i(\mathbf{u}) = \begin{cases} 1, & T_i = F_i(\mathbf{u}) \in [T_i^{\min}, T_i^{\max}] \\ 0, & T_i = F_i(\mathbf{u}) \notin [T_i^{\min}, T_i^{\max}] \end{cases} \quad (2.4)$$

Технический смысл данной экстремальной задачи состоит в том, что на основе её решения находятся такие управляющие воздействия \mathbf{u} , которые обеспечивают выполнение максимального количества взвешенных температурных условий объектов $N_{\text{ВТУ}}$ 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)-(2.4) играет диагностическую роль, так как указывает на те места РОУ, которые препятствуют выполнению технических условий. В итоге, ставится задача развязки указанных узких мест. Для решения данной задачи проводится энергетическая экспертиза узких мест, на основе которой выявляются ограничивающие условия и выполняются организационно-технические энергосберегающие мероприятия по устранению выявленных ограничений. В результате функции связи объекта управления между управляющими факторами и выходными температурами изменяются в сторону достижения максимума числа выполненных температурных условий.

2.1.3. Задача удовлетворения заданным интервалам изменения температур помещений группы зданий, подключенных к системе централизованного теплоснабжения, функционирующей в дефицитном режиме

В дефицитном режиме появляется ограничение на суммарную вырабатываемую тепловую энергию Q^{\min} , 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:

$$\begin{aligned} Q(\mathbf{u}) &\leq Q^{\min} \\ T_i^{\min} &\leq F_i(\mathbf{u}) \leq T_i^{\max}, \quad i \in I_T. \\ T_i &= F_i(\mathbf{u}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Чтобы при нехватке генерирующих мощностей повысить температуру помещений T_i до требуемого уровня T_i^{\min} и выполнить неравенство (2.5), при централизованном управлении теплоснабжением необходимо повышать температуру теплоносителя на источнике или высвобождать тепловую энергию за счёт понижения температуры помещений в других зданиях.

Дефицитный режим может возникнуть при некорректном расчёте 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 зданий необходимо преднамеренно снижать температуру помещений в менее значимых зданиях или полностью их отключать.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} T_i^{\min} \leq F_i(\mathbf{u}) : \alpha_i \\ F_i(\mathbf{u}) \leq T_i^{\max} : \alpha_{m+i} \\ T_i^{\text{off}} \leq F_i(\mathbf{u}) : \alpha_{2m+i} \\ Q(\mathbf{u}) \leq Q^{\min} : \alpha_{3m+1} \end{array} \right. \quad T_i = F_i(\mathbf{u}), \quad Q(\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^m Q_i(\mathbf{u}) + Q_{\text{потери}}, \quad (2.6)$$

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

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

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^{\min} – 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: $\forall i : T_i^{\text{off}} \leq T_i^{\text{min}}$;

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:

$$\forall i : \alpha_{2m+i} > \max_{i=1\dots m} \alpha_i; \quad (2.7)$$

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

2.2. Алгоритмы решения задач оперативного управления теплоснабжением зданий при противоречивых условиях

2.2.1. Вычислительный алгоритм решения задачи удовлетворения заданным интервалам изменения температур в помещениях здания

Оптимизационная задача (2.3)-(2.4) является задачей целочисленного программирования [114]. Для её решения воспользуемся методом ветвей и границ, являющимся методом глобальной оптимизации [108], используемым для решения рассматриваемого класса задач. В рамках метода ветвей и границ решение задачи (2.3)-(2.4) выполняется с использованием переборного алгоритма с поиском перспективных направлений решения. Поиск управляющих воздействий, соответствующих выбранным направлениям поиска решения, выполняется с использованием решающего алгоритма [44].

Для применения выбранного метода сначала необходимо привести задачу (2.2) к каноническому виду:

$$\begin{cases} f_i(\mathbf{u}) \leq 0 \\ f_{m+i}(\mathbf{u}) \leq 0 \end{cases}, \quad (2.8)$$

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

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

или:

$$f_p(\mathbf{u}) \leq 0, p=1 \dots 2 \cdot m. \quad (2.9)$$

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. Если $\chi_i = 1$, то выполнение нижних и верхних границ i -ого неравенства системы (2.2) равнозначно. Если $\chi_i > 1$, то выполнение верхних границ i -ого неравенств более значимо, что соответствует режиму предотвращения «перетопов». Если $\chi_i < 1$, то выполнение нижних границ i -ого неравенств более значимо, что соответствует режиму предотвращения «недотопов».

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

$$d_{pj}(\mathbf{u}) = f_p^+(\mathbf{u}) \cdot \frac{\partial f_p(\mathbf{u})}{\partial u_j}, j=1 \dots n, \quad (2.10)$$

где $f_p^+(\mathbf{u})$:

$$f_p^+(\mathbf{u}) = \begin{cases} f_p(\mathbf{u}), & \text{если } f_p(\mathbf{u}) > 0, \\ 0, & \text{если } f_p(\mathbf{u}) \leq 0. \end{cases} \quad (2.11)$$

На основании (2.10) вводятся оценки перспективных частных направлений поиска решений по отдельным соотношениям системы (2.9):

$$\sigma_{pj}(\mathbf{u}) = \begin{cases} 1, & \text{если } f_p(\mathbf{u}) > 0 \text{ и } d_{pj}(\mathbf{u}) > 0, \\ 0, & \text{если } f_p(\mathbf{u}) \leq 0 \text{ или } d_{pj}(\mathbf{u}) = 0, \\ -1, & \text{если } f_p(\mathbf{u}) > 0 \text{ и } d_{pj}(\mathbf{u}) < 0. \end{cases} \quad (2.12)$$

Также вводятся частные направления поиска решения:

$$\delta_j = \begin{cases} 1, & \text{если } u_j \text{ возрастает,} \\ 0, & \text{если } u_j \text{ неизменна,} \\ -1, & \text{если } u_j \text{ убывает.} \end{cases} \quad (2.13)$$

Далее для l -го направления поиска вводится значение характеристической функции p -ого неравенства системы (2.9):

$$\mu_p^{\text{ож}}(l) = \begin{cases} 1, & \text{если } \forall j: \sigma_{pj}(\mathbf{u}) \cdot \delta_j(l) \geq 0, \\ 0, & \text{если } \exists j: \sigma_{pj}(\mathbf{u}) \cdot \delta_j(l) < 0. \end{cases} \quad (2.14)$$

На основе (2.14) для текущего значения $\mu_p^{\text{ож}}(l)$ считается ожидаемое значение целевой функции $C(\mathbf{u})$ в l -ом направлении поиска:

$$C^{\text{ож}}(l) = \sum_{p=1}^{2 \cdot m} \alpha'_p \cdot \mu_p^{\text{ож}}(l). \quad (2.15)$$

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

$$\min_{\{\mathbf{u}\}} Q^{\text{ож}}; \quad Q^{\text{ож}} = \sum_{p=1}^{2m} \mu_p^{\text{ож}}(l) \cdot \left(f_p^+(\mathbf{u})\right)^2. \quad (2.16)$$

Решение задачи (2.16) может быть выполнено, например, градиентным методом на основе рекуррентного соотношения:

$$\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_{r-1} - \gamma \sum_{p=1}^{2m} \left(\mu_p^{\text{ож}}(l) \cdot f_p^+(\mathbf{u}_{r-1}) \cdot \mathbf{grad} f_p(\mathbf{u}_{r-1}) \right), \quad (2.17)$$

где γ – коэффициент релаксации, \mathbf{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:

$$C^{\text{P}}(\mathbf{u}_{\text{сов}}, l) = \sum_{p=1}^{2 \cdot m} \alpha'_p \cdot \mu_p(\mathbf{u}_{\text{сов}}, l). \quad (2.18)$$

Далее составляется таблица перспективных направлений поиска решений:

$$Tab_s \left\{ \{ \mu_p^{\text{ож}}(l) \}, C^{\text{ож}}(l) : l \in L_{s-1} \cup L_s, C^{\text{ож}}(l) > \max \{ C_{s-1}^{\text{P}}(\mathbf{u}), C_s^{\text{P}}(\mathbf{u}) \} \right\}, \quad (2.19)$$

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

На конечном шаге переборного алгоритма в таблице перспективных направлений поиска решений не остаётся 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.

Решение задачи распределенного управления (2.3)-(2.4) для статической системы запишем в векторно-матричной форме.

Вектор управляющих воздействий $\mathbf{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}^T$ из множества управляющих воздействий $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^n$ с учетом векторов ограничений на управляющие воздействия $\mathbf{u}^{\min} = \{u_1^{\min}, u_2^{\min}, \dots, u_n^{\min}\}^T$ и $\mathbf{u}^{\max} = \{u_1^{\max}, u_2^{\max}, \dots, u_n^{\max}\}^T$ находится с помощью метода ветвей и границ, используемого для глобальной оптимизации:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \arg \operatorname{abs} \max_{\mathbf{u} \in \mathbf{U} \subset \mathbf{R}^n} C(\mathbf{u}), \\ C(\mathbf{u}) &= \boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{\mu}, \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\mathbf{U} = \{\mathbf{u} \in \mathbf{R}^n : u_j^{\min} \leq u_j \leq u_j^{\max}, j = 1..n\},$$

где $\arg \operatorname{abs} \max \{\cdot\}$ – функция метода глобальной оптимизации (в данной работе используется метод ветвей и границ), возвращающая вектор управляющих воздействий, при котором достигается максимальное количество взвешенных выполненных температурных условий; $\boldsymbol{\mu}$ – вектор характеристических функций, отражающих выполнение температурных условий $\mathbf{x}^{\min} = \mathbf{T}^{\min} = \{T_1^{\min}, T_2^{\min}, \dots, T_m^{\min}\}^T$ и $\mathbf{x}^{\max} = \mathbf{T}^{\max} = \{T_1^{\max}, T_2^{\max}, \dots, T_m^{\max}\}^T$ с учетом вектора значимости выполнения температурных условий $\boldsymbol{\alpha} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\}^T$:

$$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x}^{\min} \leq \mathbf{F}(\mathbf{u})) \wedge \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{F}(\mathbf{u}) \leq \mathbf{x}^{\max}), \quad (2.21)$$

где $\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{S})$ – такой вектор функций истинности λ от вектора выражений \mathbf{S} , что:

$$\lambda(\mathbf{S}) = \{\lambda_i = \lambda(s_i), i = 1..m\},$$

$$\lambda(s) = \begin{cases} 1, & s - \text{истинно} \\ 0, & s - \text{ложно} \end{cases} \quad (2.22)$$

и $\mathbf{F}(\mathbf{u})$ – в общем случае функциональная матрица-столбец, описывающая вектор состояний $\mathbf{R}^m \ni \mathbf{x}_k = \{T_{\Pi 1}, T_{\Pi 2}, \dots, T_{\Pi m}\}^T$ – вектор состояния РОУ:

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}(\mathbf{u}, \mathbf{w}) = \{f_i(u_1, u_2, \dots, u_n, w_1, w_2, \dots, w_r), i = 1..m\}. \quad (2.23)$$

В результате для статической системы решение задачи (2.3)-(2.4) примет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{F}(\mathbf{u}, \mathbf{w}), \\ \boldsymbol{\mu} &= \lambda(\mathbf{x}^{\min} \leq \mathbf{x}) \wedge \lambda(\mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{\max}), \\ \mathbf{u} &= \arg \operatorname{abs} \max_{\mathbf{u} \in \mathbf{U} \subset \mathbf{R}^n} (\boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{\mu}). \end{aligned} \quad (2.24)$$

2.2.2. Вычислительный алгоритм решения задачи управления группой зданий системы централизованного теплоснабжения в дефицитном режиме

Рассмотрим решение задачи (2.3)-(2.4) для управления группой зданий системы централизованного теплоснабжения в дефицитном режиме.

Для этого необходимо привести задачу (2.6) к каноническому виду:

$$\begin{cases} f_i(\mathbf{u}) \leq 0 & f_i(\mathbf{u}) = T_i^{\min} - F_i(\mathbf{u}), \\ f_{m+i}(\mathbf{u}) \leq 0 & f_{m+i}(\mathbf{u}) = F_i(\mathbf{u}) - T_i^{\max}, \\ f_{2m+i}(\mathbf{u}) \leq 0 & f_{2m+i}(\mathbf{u}) = T_i^{\text{off}} - F_i(\mathbf{u}), \\ f_{3m+1}(\mathbf{u}) \leq 0 & f_{3m+1}(\mathbf{u}) = Q(\mathbf{u}) - Q^{\max}, \end{cases} \quad (2.25)$$

или:

$$f_p(\mathbf{u}) \leq 0, \quad p = 1 \dots (3m+1). \quad (2.26)$$

Далее решение задачи (2.26) выполняется по методу ветвей и границ (2.10)-(2.19) для $3m+1$ неравенств.

Управление централизованной системой теплоснабжения по предложенному алгоритму должно осуществляться интерактивно в диалоговом режиме. В этом случае на основании фактических данных алгоритм должен предлагать оператору в режиме советчика, на каких объектах необходимо понизить температуру помещений (с указанием требуемых заданий для контроллеров), а какие объекты отключить целиком с проведением

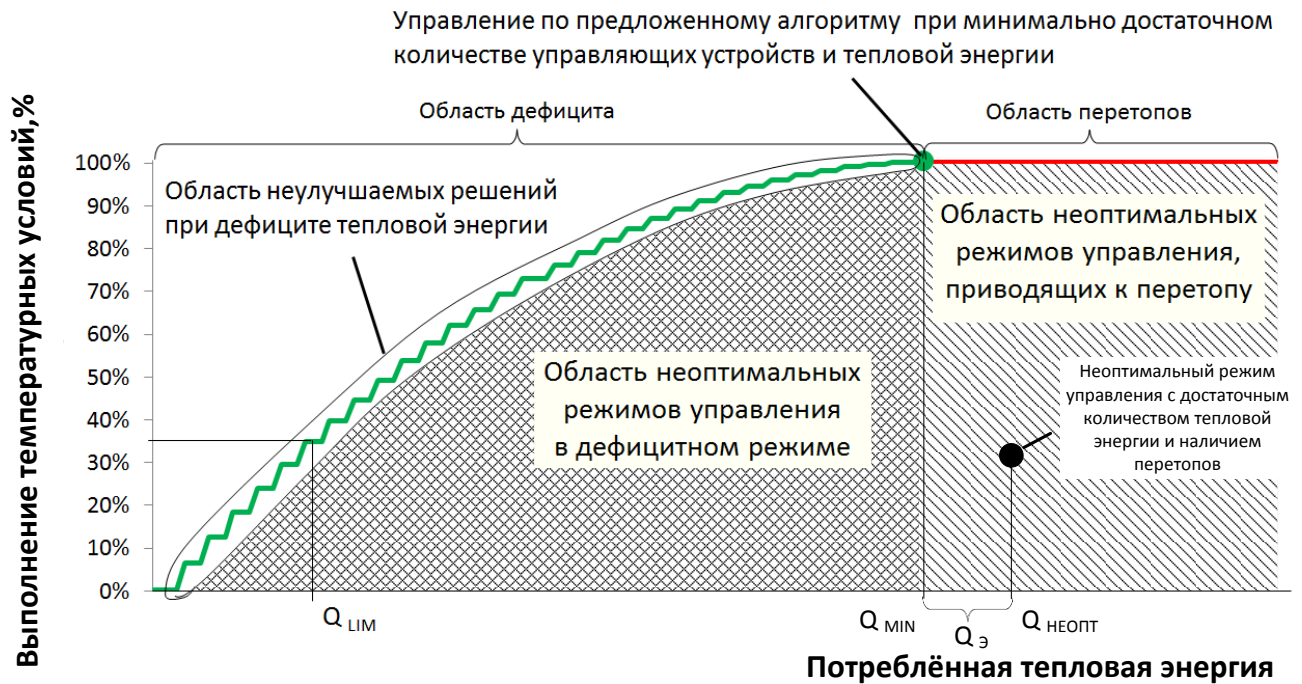
соответствующим мероприятиям, предотвращающих размораживание отключаемых зданий.

Для проверки работы алгоритма распределенного управления группой зданий в дефицитном режиме в данной работе используется имитационная макро модель системы централизованного теплоснабжения, рассмотренная в п. 2.4.5.

2.3. Схема оценки технико-экономического эффекта от применения алгоритма распределенного управления по критерию максимального выполнения температурных условий

Экономический эффект с математической точки зрения лучше всего может быть показан с использованием области неулучшаемых решений (области Парето). Для анализа эффективности предложенного алгоритма область Парето строится в следующих координатах: количество выполненных температурных условий и количество тепловой энергии, потребляемой зданием. Область Парето характеризует предельные границы, потенциально достижимые различными алгоритмами управления, что позволяет их объективно сравнивать.

Множество решений задачи распределенного управления теплоснабжением зданий, характеризуемых количеством выполненных температурных условий, представлено на рисунке 2.6. Здесь левая часть области Парето характеризует максимально достижимое число выполненных температурных условий при дефиците подаваемой тепловой энергии (зеленая линия). Правая часть области Парето характеризуется избытком подаваемой тепловой энергии, вследствие чего общее число выполненных температурных условий и перевыполненных температурных условий («перетопов») равно 100%. Оптимальная подача тепловой энергии характеризуется граничной точкой (зеленая точка), соединяющей левую и правую части области Парето.



Q_{MIN} - минимальное количество тепловой энергии, достаточное для удовлетворения всех температурных условий
 $Q_{\text{ЛИМ}}$ - ограниченное количество располагаемой тепловой энергии в дефицитном режиме

Рисунок 2.6 – Графики зависимости процента выполненных взвешенных температурных условий от количества тепловой энергии, подаваемой в здание

Целью решения задачи распределенного управления теплоснабжением зданий является достижение 100% выполненных температурных условий (2.1). При достижении поставленной цели РОУ будет потреблять суммарное количество тепловой энергии, минимально достаточное для удовлетворения всех температурных условий Q_{MIN} :

1) отсутствие нарушений нижних границ температурных условий свидетельствует об отсутствии «недотопов» помещений и, соответственно, отсутствии недостатка тепловой энергии;

2) отсутствие нарушений верхних границ температурных условий свидетельствует об отсутствии «перетопов» помещений и, соответственно, отсутствии избытка тепловой энергии.

В случае дефицита тепловой энергии, когда количество располагаемой тепловой энергии на отопление $Q_{\text{ЛИМ}}$ меньше минимально достаточного для удовлетворения всех температурных условий количества тепловой энергии Q_{MIN} , выполняется ранжирование помещений – всем помещениям выставляются

различные веса, соответствующие значимости выполнения в них температурных условий. Предложенный алгоритм в условиях достаточного количества управляющих устройств последовательно снижет подачу тепловой энергии в помещения, начиная с помещений с меньшими весами, поскольку нарушение температурных условий с меньшим весом минимизирует снижение общего качества теплоснабжения. Общее качество теплоснабжения характеризуется количеством взвешенных выполненных температурных условий, соответствующим целевой функции (2.3), значение которой максимизирует предложенный алгоритм.

Совокупная экономия при использовании предложенного алгоритма распределенного управления в условиях достаточного количества тепловой энергии Q_{MIN} составляет величину $Q_{\text{Э}}$, представленную на рисунке 2.6:

$$Q_{\text{Э}} = Q_{\text{НЕОПТ}} - Q_{\text{MIN}}, \quad (2.27)$$

где $Q_{\text{НЕОПТ}}$ – тепловая энергия, потребляемая РОУ при наличии «перетоков», возникающих при избытке располагаемой тепловой энергии и неоптимальном режиме управления.

Таким образом, предложенный в работе алгоритм находит такое множество управляющих воздействий, при котором за счет оперативного управления посредством доступных управляющих устройств для максимально возможного количества помещений выполняются верхние и нижние границ температурных условий. При этом оставшееся количество невыполненных условий, которое может возникнуть из-за ограничения оперативного управления, выражающегося в недостаточном количестве управляющих устройств, будет минимально для текущего момента времени. Помещения, в которых температурные условия останутся нарушенными, будут локализованы. Оперативная локализация и минимизация их количества посредством предложенного алгоритма позволит снизить количество проводимых энергосберегающих мероприятий по устранению нарушений температурных условий. Таким образом, предложенный алгоритм в рамках ограниченного количества управляющих устройств позволяет оперативно

привести температуры помещений зданий в соответствие с заданными температурными условиями при отсутствии «недотопов» и «перетопов».

В этом случае следует выделять три подхода к разрешению оставшихся невыполненных температурных условий:

1) улучшение оперативного управления путем добавления управляющих устройств в помещения с нарушенными температурными условиями, подключенных к автоматизированной системе управления, использующей предложенный алгоритм управления;

2) проведение мероприятий по перераспределению тепловой энергии между помещениями с заниженной и завышенной температурой воздуха посредством установки и настройки в этих помещениях балансировочных клапанов;

3) проведение энергосберегающих мероприятий по ограничению подачи тепловой энергии в «перетопленные» помещения посредством установки и настройки в этих помещениях балансировочных клапанов и проведение энергосберегающих мероприятий в помещениях с заниженной температурой воздуха.

Энергосберегающие мероприятия, направленные на устранение нарушений нижних границ температурных условий, могут включать в себя:

1) замену старых деревянных и металлических оконных блоков на современные пластиковые стеклопакеты с качественной теплоизоляцией оконных проемов зданий;

2) восстановление повреждённых участков остекления оконных блоков;

3) установку теплоотражающих экранов (из алюминиевой фольги) между стеной и радиатором;

4) устранение конструктивных повреждений наружных стен корпусов с использованием строительных смесей и растворов с высокой стойкостью к механическим и внешним воздействиям;

5) выполнение работ по утеплению части наружных стен с использованием наружной теплоизоляции (мастика, пенополистирол или минеральная вата с армирующим слоем и отделочным материалом);

б) выполнение работ по утеплению стен в зонах межблочных соединений ограждающих конструкций (технология «тёплый шов», герметик, уплотняющие прокладки);

7) восстановление повреждённых участков стен, облицованных керамической плиткой;

8) выполнение работы по заделке, утеплению и уплотнению выходов (дверных проёмов) зданий.

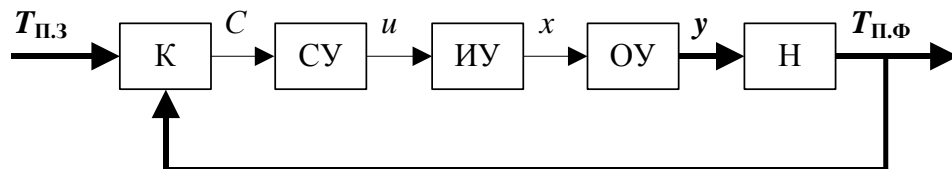
2.4. Модельно-прогнозирующего управление системой теплоснабжения зданий в противоречивых условиях

2.4.1. Общая структура модельно-прогнозирующего управления системой теплоснабжения зданий

При использовании детерминированных подходов к управлению системой отопления по температурному графику без обратной связи под влиянием вышеописанных факторов температурный режим помещений в зданиях может существенно отклоняться от нормативных значений. Поэтому для достижения комфортных условий труда и проживания людей в помещениях зданий все чаще начинают применяться системы с обратной связью. Простейшая схема управления представлена на рисунке 2.7.

Объектом управления (ОУ) является некоторая группа потребителей тепловой энергии. Системой управления (СУ) является управляющее устройство (регулятор) источника тепловой энергии, который формирует некоторое управляющее воздействие u для исполнительного устройства (ИУ). В результате ИУ посредством исполнительного органа изменяет параметры подаваемого на ОУ теплоносителя x (температуру или расход). При изменении параметров теплоносителя x изменяется состояние ОУ. ОУ оснащен некоторым наблюдателем, фиксирующим состояние y этого ОУ. На основании

зафиксированного состояния y наблюдатель формирует один или несколько параметров, которые должны характеризовать ОУ с точки зрения системы отопления, и которые должны быть сопоставимы с заданием для СУ. Такими параметрами являются фактические температуры помещений ОУ $T_{П.Ф}$. Далее $T_{П.Ф}$ через обратную связь передаются компаратору К, который сравнивает $T_{П.Ф}$ с их заданными значениями $T_{П.З}$ и формирует некоторую величину C , характеризующую степень их отклонения. При этом $C=0$ соответствует совпадению $T_{П.Ф}$ и $T_{П.З}$. Данная величина C передается СУ, которая стремится привести C к 0. Компаратор работает по принципу отрицательной обратной связи: когда $T_{П.З} < T_{П.Ф}$, то $C < 0$; когда $T_{П.З} > T_{П.Ф}$, то $C > 0$.



$T_{П.З}$ – заданные температуры помещений
 $T_{П.Ф}$ – фактические температуры помещений
 К – компаратор
 СУ – система управления
 ИУ – исполнительное устройство
 ОУ – объект управления
 Н – наблюдатель

Рисунок 2.7 – Схема управления температурой помещения с обратной связью

Роль наблюдателя за состоянием ОУ в данной работе берут на себя беспроводные сенсорные сети, в результате использования которых стали накапливаться большие базы данных о состоянии ОУ. Поэтому актуальной задачей стала обработка этой информации. Элементами, решающими эту задачу, в схеме на рисунке 2.7 являются К и СУ.

При этом основной проблемой регулирования потребления тепловой энергии по отклонению температуры воздуха в помещениях является существенная инерционность тепловых процессов зданий при изменении температуры наружного воздуха и одновременном влиянии на температуру воздуха в помещениях быстропеременных возмущающих воздействий, таких как, например, солнечная инсоляция, инфильтрация, скорость ветра. Для решения

задачи управления в реальном времени при больших инерционных и транспортных запаздываниях применяется модельно-прогнозирующее управление [119,120]. В рамках этого подхода данные сенсорных сетей используются для идентификации, построения и калибровки математических моделей отдельных зданий и систем теплоснабжения в целом, которые затем применяются для расчета управляющих воздействий с учетом прогноза поведения объекта управления. Схема системы регулирования на базе модельно-прогнозирующего управления представлена на рисунке 2.8.

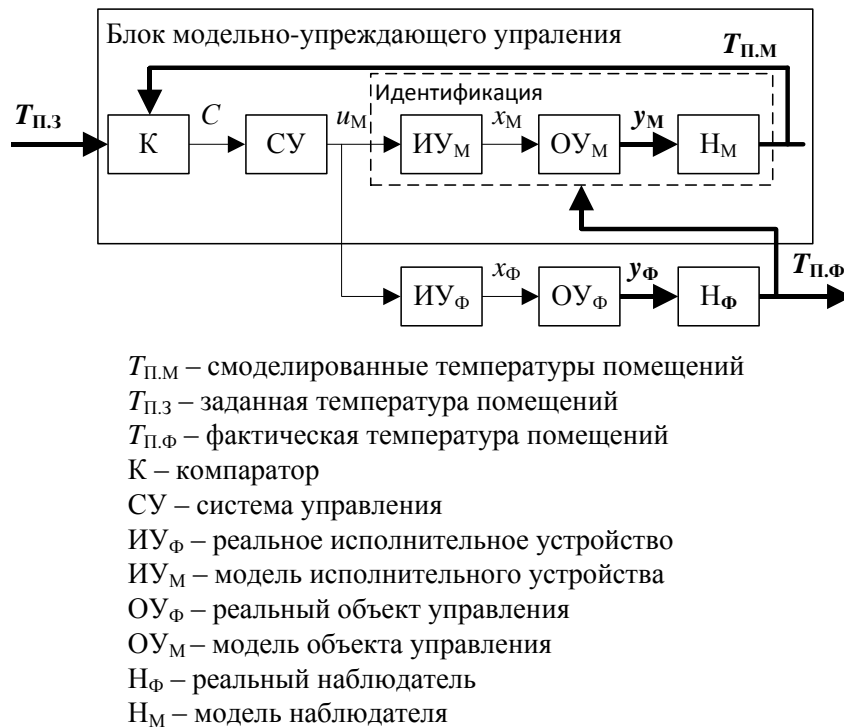


Рисунок 2.8 – Схема управления температурой помещения на базе модельно-прогнозирующего управления

В этом случае реальный объект управления $ОУ_{ф}$ описывается физико-математической моделью $ОУ_{м}$. В общем случае исполнительное устройство $ИУ_{ф}$ и наблюдатель $Н_{ф}$ также имеют собственные физико-математические модели $ИУ_{м}$ и $Н_{м}$. На основании краткосрочных и среднесрочных статистических фактических выходных данных $T_{п.ф}$, полученных из $ОУ_{ф}$ при воздействии некоторых $u_{м}$ на $ИУ_{ф}$, физико-математическая модель $ОУ_{м}$ корректируется в подсистеме идентификации и в рамках блока модельно-прогнозирующего управления СУ выполняет подбор такого $u_{м}$, который позволит приблизить

смоделированные значения $T_{П.М}$ к заданным $T_{П.З}$. Далее выбранный u_M подается на реальный ИУ_Ф. Поскольку модели ИУ_М, ОУ_М и Н_М должны отражать значимые с точки зрения расчета $T_{П.М}$ характеристики реальных ИУ_Ф, ОУ_Ф и Н_Ф, то при подаче u_M на ИУ_Ф вектор $T_{П.Ф}$ должен стремиться к вектору $T_{П.М}$.

Таким образом, структура системы управления для решения рассматриваемых задач, построенная на основе принципов модельно-прогнозирующего управления, представлена на рисунке 2.9.

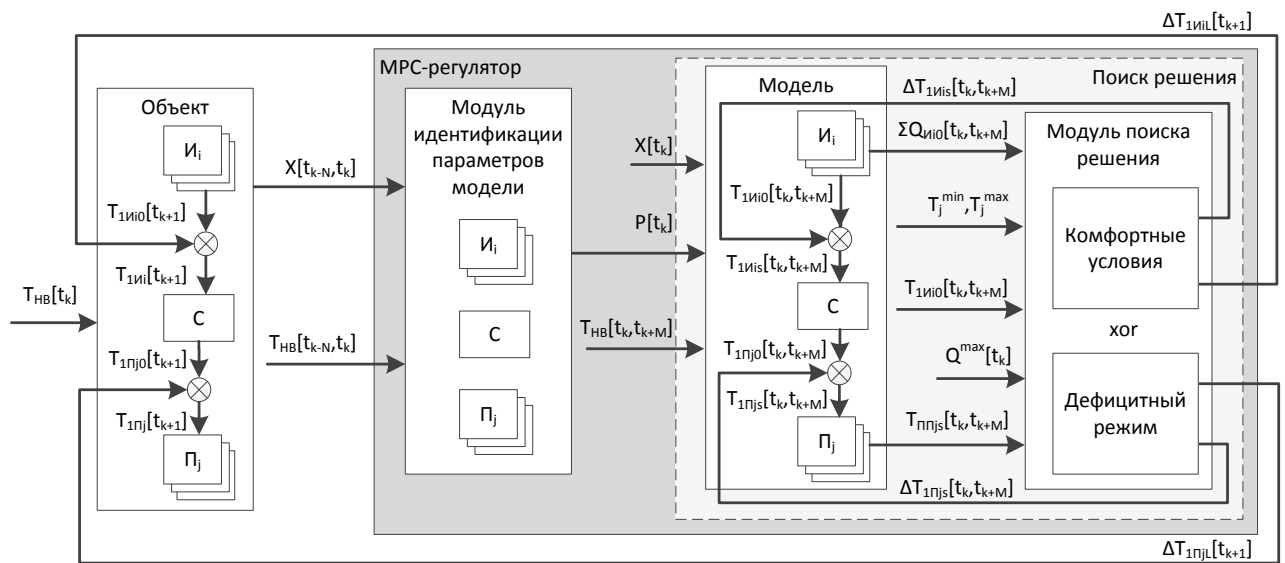


Рисунок 2.9 – Структура системы модельно-прогнозирующего управления отоплением зданий

На рисунке 2.9 представлены следующие элементы системы теплоснабжения: И – источники, С – трубопроводная сеть, П – потребители. Возмущающее воздействие $T_{HB}[t_k]$ (температура наружного воздуха) в текущий момент времени t_k подаётся на реальную систему теплоснабжения. На основании $T_{HB}[t_k]$ на источниках формируется по стандартным температурным графикам формируются исходные управляющие воздействия $T_{1иio}[t_k]$ (температура подаваемого от источника теплоносителя) на следующий шаг времени t_{k+1} . На основании статистики возмущающих воздействий $T_{HB}[t_{k-N}, t_k]$ на N -шагов назад и статистики вектора состояний объекта $X[t_{k-N}, t_k]$ на N шагов назад модуль идентификации определяет вектор параметров элементов модели $P[t_k]$ в текущий момент времени t_k .

Далее запускается алгоритм поиска решения задачи обеспечения гарантированной температуры помещений. На основании вектора текущего состояния элементов модели $\mathbf{X}[t_{k-N}, t_k]$ и прогноза возмущающих воздействий $T_{\text{НВ}}[t_k, t_{k+M}]$ на горизонт управления (M шагов вперёд), модель формирует суммарный прогноз требуемых генерирующих мощностей $\Sigma Q_{\text{ИО}S}[t_k, t_{k+M}]$ на M шагов вперёд. Сравнивая полученный прогноз генерирующих мощностей с суммарной максимальной располагаемой мощностью в момент времени t_k , модуль поиска решения определяет актуальную в данный момент задачу: управление потребителями в дефицитном режиме или управление источниками (управляющими устройствами) для достижения наиболее комфортной температуры помещений на потребителях.

При работе в дефицитном режиме на s -ом шаге поиска решения происходит расчёт коррекции температуры подаваемого теплоносителя в системе теплоснабжения j -го потребителя $\Delta T_{\text{П}jS}[t_k, t_{k+M}]$ от исходного задания $T_{\text{П}j0}[t_k, t_{k+M}]$ на горизонт управления до момента удовлетворения на шаге L во всех помещениях зданий $T_{\text{П}jS}[t_k, t_{k+M}]$ требуемых минимальных температурных условий T_j^{\min} в соответствии с их значимостью. В результате из сформированного на шаге L скорректированного управляющего воздействия в контроллер j -го потребителя передаётся коррекция задания температуры подаваемого теплоносителя на следующий шаг времени $\Delta T_{\text{П}jL}[t_{k+1}]$.

Для достижения наиболее комфортной температуры помещений на s -ом шаге поиска решения происходит расчёт коррекции температуры подаваемого теплоносителя i -го источника $\Delta T_{\text{И}iS}[t_k, t_{k+M}]$ от исходного задания $T_{\text{И}i0}[t_k, t_{k+M}]$ на горизонт управления до момента удовлетворения на шаге L во всех помещениях зданий $T_{\text{П}jS}[t_k, t_{k+M}]$ требуемых температурных условий $\{T_j^{\min}; T_j^{\max}\}$. В результате из сформированного на шаге L скорректированного управляющего воздействия в контроллер i -го источника передаётся коррекция задания температуры подаваемого теплоносителя на следующий шаг времени $\Delta T_{\text{И}iL}[t_{k+1}]$.

Далее рассмотрим модели объектов, используемые для управления РОУ с использованием модельно-прогнозирующего управления.

2.4.2. Факторные зависимости для управляющих воздействий

Рассмотрим факторные зависимости, которые могут быть использованы в решающем алгоритме (2.17) для вектора управляющих воздействий \mathbf{u} .

В работах Соколова Е.Я. [80] для расчета тепловой энергии было предложено использовать тепловой баланс подаваемой потребителю тепловой энергии и тепловые потери.

Тепловая мощность, поступающая на отопительный прибор потребителя из системы отопления Q_{CO} (Вт) рассчитывается по формуле:

$$Q_{CO} = c \cdot G_{01} \cdot (T_{01} - T_2), \quad (2.28)$$

где c – теплоемкость теплоносителя, G_{01} – расход теплоносителя (кг/с), T_{01} и T_2 – температура подаваемого и возвращаемого теплоносителя.

Тепловые потери потребителя $Q_{ТП}$ выражаются следующим образом:

$$Q_{ТП} = q \cdot V \cdot (T_{П} - T_{Н}), \quad (2.29)$$

где q – коэффициент тепловых потерь через ограждающие конструкции помещения (удельное теплопотребление); V – объем помещения; $T_{П}$ – температура помещения, $T_{Н}$ – температура наружного воздуха.

Для отопительных приборов тепловая мощность $Q_{ОП}$, переданная помещению, выражается следующим образом:

$$Q_{ОП} = k \cdot F \cdot (T_{ОП} - T_{П}), \quad (2.30)$$

где k – коэффициент теплопередачи отопительного прибора, F – площадь нагревательной поверхности отопительного прибора, $T_{ОП}$ – средняя температура отопительного прибора, которая приближенно рассчитывается как:

$$T_{ОП} = (T_{01} + T_2) / 2, \quad (2.31)$$

Согласно уравнению теплового баланса ($Q_{CO} = Q_{ОП} = Q_{ТП}$), получаем систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{\text{ТП}} = q \cdot V \cdot (T_{\text{П}} - T_{\text{Н}}) \\ Q_{\text{ОП}} = k \cdot F \cdot ((T_{01} + T_2) / 2 - T_{\text{П}}) \\ Q_{\text{СО}} = c \cdot G_{01} \cdot (T_{01} - T_2) \\ Q_{\text{ОП}} = Q_{\text{ТП}} \\ Q_{\text{ТП}} = Q_{\text{СО}} \end{array} \right. \quad (2.32)$$

Выражая T_2 через $Q_{\text{ОП}}$, $T_{\text{П}}$ через $Q_{\text{ТП}}$ и используя уравнение теплового баланса ($Q_{\text{СО}} = Q_{\text{ОП}} = Q_{\text{ТП}}$) получаем, что тепловая мощность, подаваемая потребителю равна:

$$Q_{\text{СО}} = \frac{(T_{01} - T_{\text{Н}})}{\frac{1}{k \cdot F} + \frac{0,5}{c \cdot G_{01}} + \frac{1}{q \cdot V}}. \quad (2.33)$$

Среднюю температуру воздуха потребителя можно оценить, используя равенство $Q_{\text{СО}} = Q_{\text{ТП}}$ по следующей формуле:

$$T_{\text{П}} = T_{\text{Н}} + \frac{T_{01} - T_{\text{Н}}}{q \cdot V \cdot \left(\frac{1}{k \cdot F} + \frac{0,5}{c \cdot G_{01}} \right) + 1}. \quad (2.34)$$

В работах Апарцева М.М. [5] рассмотрены вопросы централизованного управления отоплением зданий. В частности показано, что при качественном регулировании, когда расход теплоносителя в системе отопления не изменяется, температурный напор между помещением здания и окружающей средой пропорционален температурному напору между подаваемым из системы теплоснабжения теплоносителем T_1 и окружающей средой. Исходя из этого, температура помещения выражается как:

$$T_{\text{П}} = T_{\text{Н}} + (T_{\text{П.Р}} - T_{\text{Н}}) \frac{T_1 - T_{\text{Н}}}{T_{1.Р}(T_{\text{Н}}) - T_{\text{Н}}}, \quad (2.35)$$

где $T_{1.Р}$ – расчетная температура теплоносителя, соответствующая указанной температуре наружного воздуха $T_{\text{Н}}$ по температурному графику, $T_{\text{П.Р}}$ – расчетная температура воздуха в помещении.

В случае количественного управления в качестве фактора управления Апарцев М.М. вводит относительное отклонение u фактического расхода G от расчётного $G_{\text{Р}}$:

$$y = \frac{G}{G_p}. \quad (2.36)$$

Для систем управления с узлом смешения определено следующее соотношение

$$y = \frac{T_{1.P}(T_H) - T_{2.P}(T_H)}{T_1 - T_2} \cdot \frac{T_{01} + T_2 - 2T_{\Pi}}{T_{01.P}(T_H) + T_{2.P}(T_H) - 2T_{\Pi.P}}, \quad (2.37)$$

где T_1 , $T_{1.P}$ – фактическая и рассчитанная по температурному графику для определенной температуры наружного воздуха температура подаваемого теплоносителя; T_2 , $T_{2.P}$ – фактическая и рассчитанная по температурному графику температура обратного теплоносителя; T_{01} , $T_{01.P}$ – фактическая и рассчитанная по температурному графику температура теплоносителя после узла смешения; T_{Π} и $T_{\Pi.P}$ – фактическая и расчетная температура помещений.

Для систем управления без узла смешения установлено следующее соотношение:

$$y = \frac{T_{1.P}(T_H) - T_{2.P}(T_H)}{T_1 - T_2} \cdot \frac{T_1 + T_2 - 2T_{\Pi}}{T_{1.P}(T_H) + T_{2.P}(T_H) - 2T_{\Pi.P}}. \quad (2.38)$$

Соотношение (2.38) может быть применено, например, для балансировки по стоякам путем корректировки расхода теплоносителя на стояке.

Необходимо отметить, что в приведенных выше формулах не учитывается аккумулирующая способность зданий и внутренние источники тепловой энергии зданий.

2.4.3. Идентификация динамических характеристик каналов связи распределенного объекта управления

В данной работе предполагается, что динамическая модель РОУ является линеаризованной относительно базовых значений координат. В этом случае воздействие на РОУ можно считать аддитивными и решать задачу идентификации динамических характеристик по отдельным каналам связи.

Так как предметной областью данной работы являются теплотехнические системы зданий, то для описания динамических характеристик отдельных каналов РОУ достаточно считать, что они характеризуются транспортным и инерционным

запаздыванием. В этом случае элементарная динамическая модель канала будет иметь вид [64]:

$$T \dot{y} + y = K u(t - \tau_{\text{TP}}) + z, \quad (2.39)$$

где y – выходная температура объекта; u – управляющее воздействие; z – переменная, отражающая влияние неопределенных возмущений различной природы; T – постоянная времени, определяющая инерционное запаздывание; τ_{TP} – постоянная времени транспортного запаздывания; K – коэффициент передачи.

Решение задачи идентификации состоит в определении постоянной времени T и коэффициента передачи K динамического звена (2.39). При этом будем полагать, что возмущение v является центрируемой случайной величиной с неопределенными характеристиками и равным нулю математическим ожиданием. Так как задача идентификации будет решаться на многообразии режимов работы РОУ по минимуму среднеквадратической ошибки, то величиной v в первом приближении можно пренебречь.

Таким образом, рассмотрим решение задачи идентификации параметров динамического звена:

$$T \dot{y} + y = K u(t - \tau_{\text{TP}}). \quad (2.40)$$

Транспортное запаздывание τ_{TP} определяется на основе нахождения максимума взаимной корреляционной функции между переменными y и u :

$$\tau_{\text{TP}} = \operatorname{argmax}_{\{\tau\}} M_t \{y(t)u(t-\tau)\}, \quad (2.41)$$

где M_t – математическое усреднение по времени t ; τ – переменное время транспортного запаздывания; $\operatorname{argmax}\{\cdot\}$ – оператор нахождения значения аргумента, при котором достигается максимум функции.

Для решения задачи идентификации уравнение (2.40) на текущий момент времени t_k представим в виде:

$$\begin{aligned} \dot{y}_k &= a_1 y_k + a_2 u_k^* \\ u_k^* &= u(t_k - \tau_{\text{TP}}) \end{aligned} \quad (2.42)$$

где a_1 и a_2 – неизвестные коэффициенты, связанные параметрами уравнения (2.40) выражениями:

$$a_1 = -\frac{1}{T}; \quad a_2 = \frac{K}{T}. \quad (2.43)$$

Определение неизвестных коэффициентов a_1 и a_2 выполняется методом наименьших квадратов на заданной статистике. Нормальные уравнения решения этой задачи имеют следующий вид:

$$\begin{cases} c_{11}a_1 + c_{12}a_2 = d_1 \\ c_{21}a_1 + c_{22}a_2 = d_2 \end{cases}, \quad (2.44)$$

$$c_{11} = \sum_{s \in S_k} y_s^2; \quad c_{12} = c_{21} = \sum_{s \in S_k} y_s u_s^*; \quad c_{22} = \sum_{s \in S_k} u_s^{*2},$$

$$d_1 = \sum_{s \in S_k} \dot{y}_s y_s; \quad d_2 = \sum_{s \in S_k} \dot{y}_s u_s^*,$$

где S_k – статистика изменения переменных отдельного канала связи, накопленная к текущему моменту времени t_k .

Для упрощения решения задачи предполагается, что накопление статистики ведется при условии, когда изменяется только одна входная переменная отдельно выбранного канала, в то время как остальные входные переменные не изменяются. Другими словами, задача идентификации проводится в режиме активного эксперимента, спланированного так, что эксперименты по каждому каналу связи проводятся независимо друг от друга на различных интервалах времени. Рассмотренные формулы допускают естественное обобщение на общий случай многосвязной идентификации.

Как было сказано выше, решение задач идентификации осуществляется в рамках активного эксперимента. При этом результаты идентификации используются для решения задачи оперативного управления, в которой значимыми становятся быстропеременные факторы, такие как солнечная инсоляция, влияние ветра, инфильтрация воздуха и внутренние тепловыделения, связанные с различными режимами эксплуатации помещений. Исходя из этого, уравнение (2.40), в котором не учитываются переменные возмущения z , будет не точно отражать текущее состояние РОУ. Чтобы оценить влияние быстропеременных факторов, можно воспользоваться исходным уравнением (2.39). С учетом уравнений (2.39) и (2.42):

$$\begin{aligned} \dot{y}_k &= a_1 y_k + a_2 u_k^* + w_k \\ w_k &= \frac{1}{T} z_k \end{aligned} \quad (2.45)$$

где v_k – переменная, отражающая неопределенные возмущения. Переменная v_k может быть определена на текущий момент времени t_k следующим образом:

$$v_k = \dot{y}_k - (a_1 y_k + a_2 u_k^*). \quad (2.46)$$

На основе решения задачи идентификации может быть построено уравнение элементарной связи РОУ:

$$\dot{y}_k = a_1 y_k + a_2 u_k^* + w_k. \quad (2.47)$$

Для решения задачи прогноза с учетом (2.43) представим уравнение связи (2.47) в дискретном виде с использованием неявного метода Эйлера:

$$y_k = a y_{k-1} + b u_k^* + h w_k, \quad (2.48)$$

где:

$$a = \frac{T}{T + \Delta t}; \quad b = \frac{K \Delta t}{T + \Delta t}; \quad h = \frac{T \Delta t}{T + \Delta t}. \quad (2.49)$$

Рассмотрим более подробно возмущающие воздействия. При учете возмущающих воздействий $Q_{\text{ВОЗМ}}$ тепловой баланс запишем следующим образом:

$$Q_{\text{ТП}} = Q_{\text{ОП}} + Q_{\text{ВОЗМ}}. \quad (2.50)$$

Поэтому система уравнений (2.32) примет вид:

$$\begin{cases} Q_{\text{ТП}} = q \cdot V \cdot (T_{\text{П}} - T_{\text{Н}}) \\ Q_{\text{ОП}} = k \cdot F \cdot ((T_{01} + T_2) / 2 - T_{\text{П}}) \\ Q_{\text{СО}} = c \cdot G_{01} \cdot (T_{01} - T_2) \\ Q_{\text{СО}} = Q_{\text{ТП}} - Q_{\text{ВОЗМ}} \\ Q_{\text{ОП}} = Q_{\text{СО}} \end{cases} \quad (2.51)$$

В результате решения системы уравнений (2.51) получим соотношение для тепловой мощности $Q_{\text{ОП}}$, переданной помещению через отопительные приборы:

$$Q_{\text{ОП}} = \frac{(T_{01} - T_{\text{Н}})}{\frac{1}{k \cdot F} + \frac{0,5}{c \cdot G_{01}} + \frac{1}{q \cdot V}} - \frac{Q_{\text{ВОЗМ}} / (q \cdot V)}{\frac{1}{k \cdot F} + \frac{0,5}{c \cdot G_{01}} + \frac{1}{q \cdot V}}. \quad (2.52)$$

Далее оценим среднюю температуру воздуха в помещении, используя равенства (2.29), (2.50) и (2.52):

$$T_{\Pi} - T_{\text{H}} = \frac{T_{01} - T_{\text{H}}}{q \cdot V \cdot \left(\frac{1}{k \cdot F} + \frac{0,5}{c \cdot G_{01}} \right) + 1} - \frac{Q_{\text{ВОЗМ}} / (q \cdot V)}{q \cdot V \cdot \left(\frac{1}{k \cdot F} + \frac{0,5}{c \cdot G_{01}} \right) + 1} + Q_{\text{ВОЗМ}} / (q \cdot V). \quad (2.53)$$

Примем коэффициент передачи K в выражении (2.39) равным отношению:

$$K = \frac{1}{q \cdot V \cdot \left(\frac{1}{k \cdot F} + \frac{0,5}{c \cdot G_{01}} \right) + 1}. \quad (2.54)$$

Также примем, что за выполнение итерации алгоритма управления постоянными остаются удельные теплотери здания q , объем помещения V , коэффициент теплопередачи k отопительных приборов и площадь отопительных приборов F .

Таким образом, в общем случае коэффициент передачи K зависит от расхода теплоносителя $K=f_K(G_{01})$. Если расход G_{01} в системе отопления является постоянным на интервале выполнения итерации алгоритма, то коэффициент передачи K на этом интервале также можно считать постоянной величиной. В случае изменения расхода теплоносителя идентификация, производимая на каждом шаге алгоритма управления, будет корректировать коэффициент передачи K в соответствии с текущим расходом G_{01} .

В результате выражение (2.53) для поиска температуры i -го помещения примет вид:

$$T_{\Pi i} = T_{\text{H}} + K_i \cdot (T_{01} - T_{\text{H}}) + \frac{Q_{\text{ВОЗМ}i}}{q_i \cdot V_i} \cdot (1 - K_i). \quad (2.55)$$

Согласно формулам (2.34) и (2.48) для идентификации динамических связей РОУ обозначим:

$$y_{ik} = T_{\Pi i, k}, \quad (2.56)$$

$$u_k = T_{01, k} - T_{\text{H}, k}, \quad (2.57)$$

где $T_{\Pi i, k}$ – температура i -го помещения в k -ый момент времени; $T_{\text{H}, k}$ – температура наружного воздуха в k -ый момент времени; $T_{01, k}$ – температура теплоносителя, подаваемого в систему отопления в k -ый момент времени.

Неуправляемое возмущающее воздействие v будет отражать отношение:

$$w = T_H + \frac{Q_{\text{ВОЗМ}i}}{q_i \cdot V_i} \cdot (1 - K_i). \quad (2.58)$$

В физическом смысле v отражает соотношение возмущающих воздействий и удельной тепловой энергии K (2.54), сохраняемой в помещении после её поступления из системы отопления и её потери через наружные ограждающие конструкции.

2.4.4. Решение многомерной задачи управления с учетом динамических характеристик связей РОУ

В результате для экстремальной задачи (2.3)-(2.4) уравнение связи (2.48) с учетом влияния множества управляющих воздействий $\mathbf{u} = \{u_1^*, u_2^* \dots u_n^*\}^T$ и возмущающих воздействий $\mathbf{w} = \{w_1, w_2 \dots w_n\}^T$ примет вид:

$$T_{\Pi i, k+p} = F_{i, k+p}(\mathbf{u}_{k+p}^*) = a_i T_{\Pi i, k+p-1} + \sum_{j=1}^n b_{ij} u_{j, k+p}^* + \sum_{r=1}^l h_{ir} w_{ir, k+p}, \quad p=0..P, \quad (2.59)$$

где P – горизонт прогноза.

Решение задачи распределенного управления (2.2)-(2.3) для динамической системы (2.59) запишем в векторно-матричной форме.

Опишем динамическую систему в векторно-матричной форме в разностной форме:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{H}\mathbf{w}, \quad (2.60)$$

где $\mathbf{x} = \{T_{\Pi 1}, T_{\Pi 2}, \dots, T_{\Pi m}\}^T$ вектор состояния РОУ, \mathbf{A} – матрица состояния РОУ, \mathbf{B} – матрица управления, \mathbf{H} – матрица возмущения:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} & \dots & a'_{1m} \\ a'_{21} & a'_{22} & \dots & a'_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a'_{m1} & a'_{m2} & \dots & a'_{mm} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b'_{11} & b'_{12} & \dots & b'_{1n} \\ b'_{21} & b'_{22} & \dots & b'_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b'_{m1} & b'_{m2} & \dots & b'_{mn} \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h'_{11} & h'_{12} & \dots & h'_{1r} \\ h'_{21} & h'_{22} & \dots & h'_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h'_{m1} & h'_{m2} & \dots & h'_{mr} \end{bmatrix}. \quad (2.61)$$

Для решения задачи запишем динамическую систему в векторно-матричной разностной форме, используя неявный метод Эйлера, для момента времени k :

$$\frac{1}{T_0} (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}) - \mathbf{A}\mathbf{x}_k = \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{H}\mathbf{w}_k, \quad (2.62)$$

где T_0 – шаг дискретной системы.

Перегруппируем (2.62):

$$\mathbf{x}_k = (\mathbf{I} - T_0 \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{x}_{k-1} + T_0 \mathbf{B} \mathbf{u}_k + T_0 \mathbf{H} \mathbf{w}_k), \quad (2.63)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица размером $m \times m$.

Введем дополнительные обозначения:

$$\mathbf{A}' = (\mathbf{I} - T_0 \mathbf{A})^{-1}, \quad \mathbf{B}' = T_0 (\mathbf{I} - T_0 \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}, \quad \mathbf{H}' = T_0 (\mathbf{I} - T_0 \mathbf{A})^{-1} \mathbf{H} \quad (2.64)$$

Перепишем (2.63) с учетом введенных обозначений (2.64):

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}' \mathbf{x}_k + \mathbf{B}' \mathbf{u}_k + \mathbf{H}' \mathbf{w}_k. \quad (2.65)$$

С учетом (2.59) матрицы \mathbf{A}' , \mathbf{B}' , \mathbf{H}' будут равны:

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & a_{mm} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}' = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}' = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1r} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{m1} & h_{m2} & \dots & h_{mr} \end{bmatrix}. \quad (2.66)$$

В результате для динамической системы решение задачи (2.3)-(2.4) примет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \mathbf{A}' \mathbf{x}_k + \mathbf{B}' \mathbf{u}_k + \mathbf{H}' \mathbf{w}_k \\ \boldsymbol{\mu}_k &= \lambda(\mathbf{x}^{\min} \leq \mathbf{x}_k) \wedge \lambda(\mathbf{x}_k \leq \mathbf{x}^{\max}) \\ C(\mathbf{U}^P) &= \sum_{k=1}^P \boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{\mu}_k \\ \mathbf{U}^P &= \{\mathbf{u}_{k+1}, \mathbf{u}_{k+2}, \dots, \mathbf{u}_{k+P}\}, k = 1 \dots P \\ \mathbf{U}^P &= \arg \text{abs max } C(\mathbf{U}^P) \\ &\quad \mathbf{U}^P \subset \mathbf{U} \subset \mathbf{R}^n \\ \mathbf{u}_{k+1} &= \mathbf{U}^P[k+1], \end{aligned} \quad (2.67)$$

где $\boldsymbol{\mu}_k$ – вектор характеристических функций, отражающих выполнение температурных условий для момента времени k , \mathbf{U} – искомое множество управляющих воздействий на горизонте прогноза P , из которого применяется управляющее воздействие на следующий момент времени \mathbf{u}_{k+1} .

В этом случае интегральной оценкой качества теплоснабжения является количество выполненных взвешенных температурных условий $N_{ВТУ}$ на горизонте прогноза P :

$$N_{ВТУ} = \frac{100\%}{P \sum_{i=1}^m \alpha_i} \sum_{k=1}^P \alpha^T \mu_k \rightarrow \max_u \quad (2.68)$$

2.4.5. Имитационная макро модель системы централизованного теплоснабжения

Макромодель системы централизованного теплоснабжения зданий предназначена для моделирования процессов распределения тепловой энергии в системе теплоснабжения. Целью моделирования функционирования системы теплоснабжения с использованием макро модели является:

- расчет параметров теплоносителя и состояния потребителей системы теплоснабжения в различных режимах эксплуатации;
- имитация функционирования системы теплоснабжения в дефицитных режимах;
- имитация аварийных режимов;
- нахождение параметров энергоэффективных режимов эксплуатации энергоустановок источников и потребителей;
- планирование мероприятий по повышению энергетической эффективности эксплуатации системы теплоснабжения;
- предоставление интерактивной поддержки диспетчерам в принятии решений по оперативному управлению системой теплоснабжения.

Особенностью разрабатываемой макро модели по сравнению с традиционными методами проведения гидравлических расчетов тепловых сетей является снижение детализации параметров потребителей, источников и трубопроводных сетей до уровня, достаточного для обеспечения требуемой точности имитационного моделирования при оперативном диспетчерском управлении. Это дает возможность в условиях ограниченного объема исходных

данных построить адекватную математическую модель сложной распределенной системы теплоснабжения, в частности, системы теплоснабжения комплекса зданий ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Суть подхода к построению макромоделей теплогидравлических режимов системы теплоснабжения заключается в представлении сети трубопроводов системы теплоснабжения в виде многоуровневой структуры с тепловыми источниками, потребителями (зданиями и сооружениями) и трубопроводной арматурой.

В этом случае при моделировании системы теплоснабжения предлагается учитывать следующие особенности:

1) источники тепловой энергии (I_i), присоединенные к тепловой сети, рассматриваются как таковые;

2) для более детального учета особенностей гидравлических режимов отдельный источник I_i можно представить в виде участка системы теплоснабжения с несколькими источниками $I_{i,k}$ (например, отражающими отдельные генерирующие установки теплоэлектростанции). В этом случае источник более высокого уровня I_i является потребителем тепловой энергии из теплогидравлической сети, включающей источники более низкого уровня $I_{i,k}$;

3) потребители тепловой энергии (P_j), присоединенные к тепловой сети, рассматриваются как таковые;

4) для более детального учета особенностей гидравлических режимов отдельный потребитель P_j можно представить в виде участка системы теплоснабжения с несколькими потребителями $P_{j,k}$ (например, отражающими отдельные контуры отопления и горячего водоснабжения здания). В этом случае потребитель более высокого уровня P_j является источником тепловой энергии для теплогидравлической сети, включающей потребители более низкого уровня $P_{j,k}$;

5) качественное регулирование потребления тепловой энергии выполняется на источниках по температурному графику зависимости температуры подаваемого теплоносителя от температуры наружного воздуха. Качественное регулирование на потребителях тепловой энергии может выполняться по

температурному графику зависимости температуры подаваемого или обратного теплоносителя от температуры наружного воздуха. Для источников и потребителей качественное регулирование может выполняться в ручном (фиксированная температура теплоносителя) или автоматическом режиме (по температурному графику).

б) количественное регулирование потребления тепловой энергии (изменение расхода теплоносителя) осуществляется посредством изменения гидравлического сопротивления трубопроводной арматуры.

Макромодель системы теплоснабжения представляется в виде сетевой структуры, основными узлами которой являются источники, потребители, трубопроводы и узлы смешения и деления потоков (рисунок 2.10) [8,10,13,14,90,99,105] (см. Приложение Б).

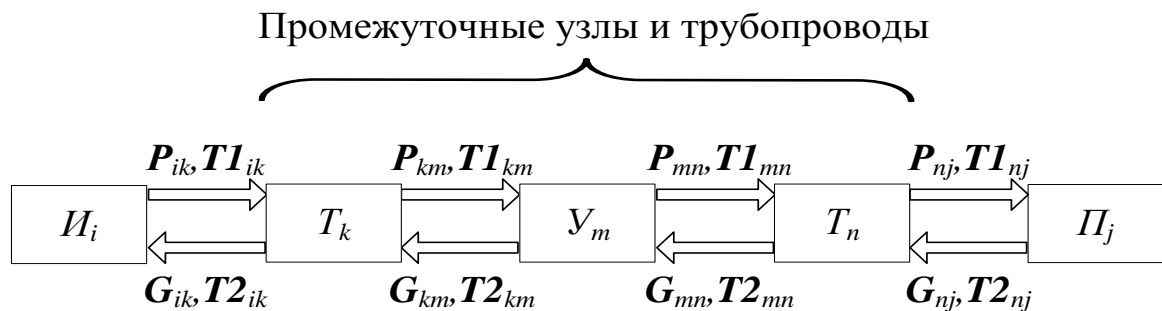


Рисунок 2.10 – Обобщенная структурная схема системы теплоснабжения

Для оперативной поддержки принятия решений при управлении системой теплоснабжения необходимо достаточно быстро выполнять расчёт параметров системы в различных режимах эксплуатации. Процедура подобного расчета заключается в составлении и решении системы нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ), которые описывают функциональные элементы и структурные связи системы и включают в себя уравнения тепловых, гидростатических и гидродинамических процессов. Подобные системы уравнений ввиду их большой размерности и наличия нелинейностей в основном принято решать численными методами с применением высокопроизводительных ЭВМ.

Для численного решения СНАУ разработаны различные пакеты прикладных программ (например, *ANSYS*, *MATLAB* и т.д.). В данной работе

используется программное обеспечение визуального языка программирования *VisSim*. Преимуществом его использования при моделировании различных управляющих систем является наглядное представление математической модели в виде структуры функциональных блоков, реализующих математическое описание соответствующих элементов моделируемой системы, что значительно упрощает модификацию и расширение системы посредством индивидуальной коррекции и копирования групп связанных типовых блоков.

Основными параметрами, которые необходимо определить при теплогидравлическом расчете системы теплоснабжения, являются давление, расход и температура теплоносителя, а также потери тепловой энергии в требуемых элементах системы. Исходными данными, необходимыми в этом случае для расчёта системы теплоснабжения, являются:

- 1) структура трубопроводной сети с учетом присоединения источников и потребителей;
- 2) гидравлические сопротивления источников, потребителей и участков трубопроводов;
- 3) расходные характеристики и состояние регулирующих клапанов и насосов;
- 4) характеристики потребления тепловой энергии элементами системы;
- 5) температура наружного воздуха.

В визуальном языке моделирования *VisSim* связи между функциональными блоками являются однонаправленными. Из одного блока-источника значение сигнала может передаваться к одному или нескольким блокам-получателям. В этом случае гидравлическая сеть представляется в виде соединенных между собой функциональных составных блоков (например, насос, регулирующий клапан, обратный клапан, трубопровод и т.д.). Составной блок представлен структурой элементарных функциональных блоков, реализующих СНАУ в виде последовательности математических операторов, которая описывает с заданным приближением протекающие в блоке процессы. Направление соединения

составных блоков ассоциируется с положительным направлением движения потока теплоносителя (расход $G > 0$).

В этом случае однонаправленное соединение блоков соответствует физическому подключению элементов трубопроводной сети. Для упрощения процедуры создания модели и предотвращения ошибок соединение представляется в виде вектора из 6 основных параметров $[P_1 G_1 T_1 P_2 G_2 T_2]^T$, где P_1 и P_2 [атм] – давления в подающем и обратном трубопроводах соответственно, G_1 и G_2 [м³/ч] – расходы теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, T_1 и T_2 [°C] – температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах.

Вводятся следующие допущения:

- 1) теплоноситель является несжимаемой жидкостью;
- 2) на участках между составными блоками гидравлические потери напора и тепловые потери отсутствуют;
- 3) потери тепловой энергии через теплоограждающие конструкции зданий линейно зависят от температуры наружного воздуха.
- 4) потери тепловой энергии при инфильтрации, влияние внутренних тепловыделений и инсоляции учитываются введением соответствующих аддитивных коэффициентов.

Расчет гидравлических и тепловых потерь на элементах, не являющихся потребителями, выполняется в составном блоке «трубопровод».

Поскольку визуальный язык программирования *VisSim* не позволяет решать СНАУ в явном виде, записанные с образованием алгебраических циклов, то диаграмма СНАУ должна быть «разорвана» посредством использования специальных функциональных блоков – «*constraint*» и «*unknown*».

Для решения СНАУ в среде *VisSim* с использованием указанных блоков СНАУ должны быть записаны в каноническом виде: $f(\mathbf{x})=0$. В этом случае на каждом шаге моделирования алгоритм решения СНАУ, используемый в среде *VisSim*, будет находить такое значение вектора неизвестных параметров \mathbf{x} , которое будет обеспечивать выполнение указанного равенства с заданной точностью.

В диаграмме уравнений вида $f(\mathbf{x})=0$ неизвестные параметры вектора x соответствуют блоку «*unknown*». На вход блока «*unknown*» подается начальное значение для выполнения итеративного алгоритма решения СНАУ методом Ньютона-Рафсона. Результат функции $f(x)$, рассчитанный по значениям выходов блоков «*unknown*», передается на входы блоков «*constraint*», которые соответствуют равенству нулю. Таким образом, количество блоков «*constraint*» соответствует количеству уравнений в СНАУ.

В СНАУ для исключения алгебраических циклов в качестве неизвестных параметров приняты значения расхода подаваемого теплоносителя, расхода на подпитку гидравлической системы, а также значение температуры обратного теплоносителя на источниках тепловой энергии. Выходом функции $f(x)$, минимизируемым при выполнении итеративного расчета методом Ньютона-Рафсона, являются разности давлений, расходов и температур подаваемого и обратного теплоносителя в точке трубопроводной сети, в которой эти разности должны быть пренебрежимо малы.

Каждый тип узла представлен собственной настраиваемой моделью в виде составного блока.

1. Трубопровод

Потери давления на участке трубопровода определяются из выражения:

$$\Delta H = R(l + l_e), \quad (2.69)$$

где ΔH – суммарные потери давления в трубопроводе; l [м] – длина участка трубопровода; l_e [м] – эквивалентная длина местных сопротивлений участка трубопровода; R [м/м] – удельные потери напора на трение на единицу длины участка трубопровода, определяемые по формуле:

$$R = \frac{0,7}{10^9} \cdot G^2 \cdot \frac{k_{\text{Э}}^{0,25}}{d^{5,25}}, \quad (2.70)$$

где $k_{\text{Э}}$ – коэффициент шероховатости стенок трубопровода; G [м³/ч] – объемный расход теплоносителя; d [м] – внутренний диаметр участка трубопровода.

Для расчетов используем величину удельного сопротивления участка трубопровода S_y [$\text{м}\cdot\text{ч}^2/(\text{м}^6\cdot\text{м})$], которое отражает удельное падение напора на единицу объемного расхода теплоносителя:

$$S_y = \frac{R}{G^2} = \frac{0,7}{10^9} \cdot \frac{k_{\text{Э}}^{0,25}}{d^{5,25}}. \quad (2.71)$$

Удельное сопротивление в модели является постоянной характеристикой участка трубопровода и идентифицируется по показаниям расходомеров и датчиков давления, установленных на участках трубопровода.

Эквивалентная длина местных сопротивлений участка трубопровода равна длине прямолинейного участка трубопровода диаметром d , на котором линейные потери напора равны сумме потерь напора в узлах участка трубопровода:

$$l_{\text{Э}} = \frac{\sum \xi \cdot d}{\lambda}, \quad (2.72)$$

где $\sum \xi$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений узлов участка трубопровода, который может зависеть, например, от формы трубопроводной арматуры; λ – коэффициент гидравлического трения трубопровода, определяемый по формуле:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k_{\text{Э}}}{d} \right)^{0,25}. \quad (2.73)$$

Таким образом, суммарное падение напора, определяемое для участка трубопровода длиной l , будет равно:

$$\Delta H = R \cdot (l + l_{\text{Э}}) = S_y \cdot (l + l_{\text{Э}}) \cdot G^2. \quad (2.74)$$

Тепловые потери на участке трубопровода длиной l определяются по формуле:

$$\Delta T = k_T \cdot l, \quad (2.75)$$

где k_T – удельное снижение температуры теплоносителя на единицу длины участка трубопровода.

Учет утечек теплоносителя на участках трубопровода осуществляется введением удельной величины утечки g_y как процента потерь теплоносителя от величины входящего потока $G_{вх}$:

$$\Delta G = \frac{g_y \cdot G_{вх}}{100\%}. \tag{2.76}$$

В результате модель трубопровода опишем с использованием следующих выражений:

$$H_{вых} = H_{вх} - \Delta H = H_{вх} - S_y \cdot (l + l_{\zeta}) \cdot G_{вх}^2, \tag{2.77}$$

$$G_{вых} = G_{вх} - \Delta G = G_{вх} \cdot \left(1 - \frac{g_y}{100\%}\right), \tag{2.78}$$

$$T_{вых} = T_{вх} - \Delta T = T_{вх} - k_T \cdot l. \tag{2.79}$$

где $H_{вых}$, $H_{вх}$ – напоры на выходе и на входе участка трубопровода, $T_{вых}$, $T_{вх}$ – температуры теплоносителя на выходе и на входе участка трубопровода, $G_{вых}$, $G_{вх}$ – расходы теплоносителя на выходе и на входе участка трубопровода.

Видеокадр составного блока, реализующего модель трубопровода в соответствии с выражениями (2.77)-(2.79), представлен на рисунке 2.11.

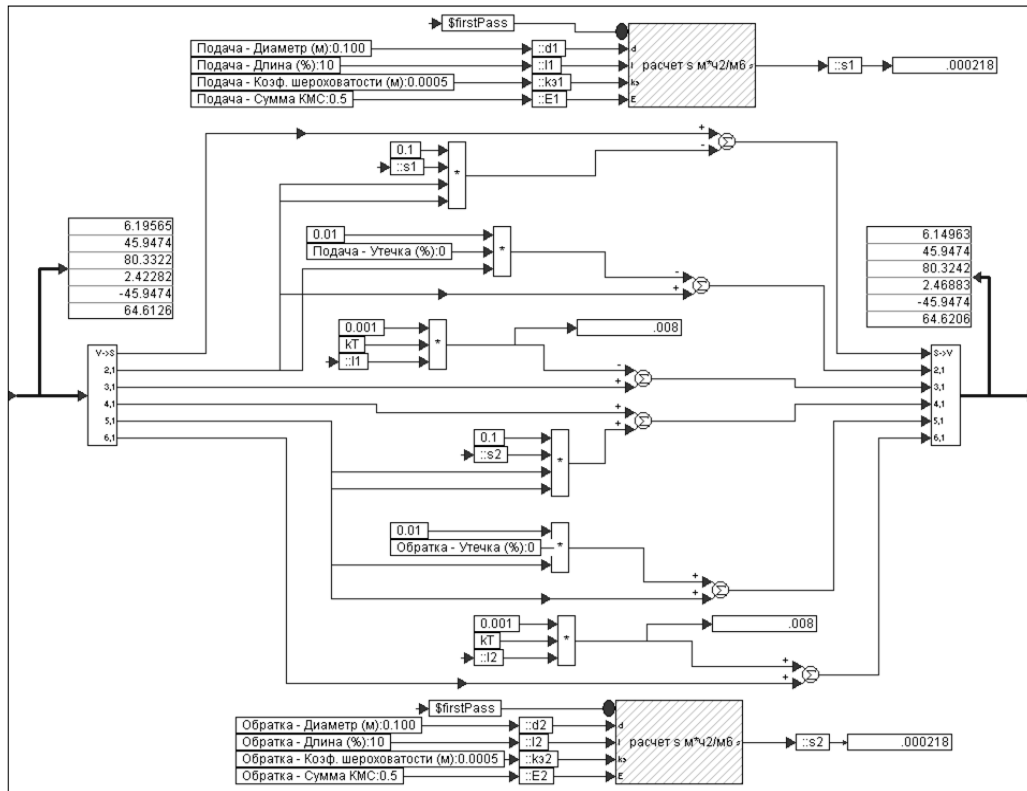


Рисунок 2.11 – Видеокадр составного блока «Трубопровод»

2. Регулирующий клапан

Потери напора на участке трубопроводной сети определяются по выражению:

$$\Delta H = G^2 \cdot s, \quad (2.80)$$

где ΔH [м] – разница напоров на входе и выходе участка трубопроводной сети; G [м³/ч] – расход сетевой воды на участке трубопроводной сети; s [м·ч/м³] – гидравлическое сопротивление участка трубопроводной сети.

Чтобы учесть изменение направления движения потока теплоносителя в формулу (2.80) введем функцию определения знака $\text{sign}(G)$. Тогда формула (2.80) принимает следующий вид:

$$\Delta H = G^2 \cdot \text{sign}(G) \cdot s, \quad (2.81)$$

$$\text{sign}(G) = \begin{cases} 1, & \text{если } G > 0 \\ 0, & \text{если } G = 0 \\ -1, & \text{если } G < 0 \end{cases}$$

Тепловые потери на регулирующем клапане учитываются посредством введения дополнительного блока «трубопровод», подключаемого последовательно с блоком «Регулирующий клапан».

В результате модель регулирующего клапана опишем с использованием следующих выражений:

$$H_{\text{вых}} = H_{\text{вх}} - G_{\text{вх}}^2 \cdot \text{sign}(G) \cdot (f_{\text{рег}}(k) \cdot (s_{\text{откр}} - s_{\text{закр}}) + s_{\text{закр}}), \quad (2.82)$$

$$G_{\text{вых}} = G_{\text{вх}}, \quad (2.83)$$

$$T_{\text{вых}} = T_{\text{вх}}, \quad (2.84)$$

где $H_{\text{вых}}$, $H_{\text{вх}}$ – напоры на выходе и на входе регулирующего клапана, $s_{\text{откр}}$, $s_{\text{закр}}$ – сопротивления регулирующего клапана в открытом и закрытом состоянии, $f_{\text{рег}}(k)$ – расходная характеристика регулирующего клапана, отражающая зависимость гидравлического сопротивления от степени открытия клапана k .

Видеокадр составного блока, реализующего модель регулирующего клапана в соответствии с выражениями (2.82)-(2.84), представлен на рисунках 2.12 и 2.13.

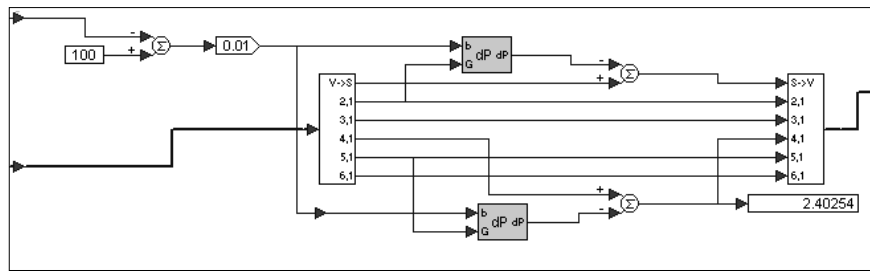


Рисунок 2.12 – Видеокадр составного блока «Регулирующий клапан»

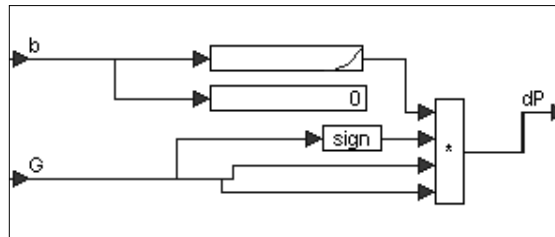


Рисунок 2.13 – Видеокадр составного блока «dP»
в составном блоке «Регулирующий клапан»

3. Обратный клапан

Обратный клапан препятствует изменению направления потока теплоносителя. Для реализации обратного клапана в рамках модели введем функцию $s(G)$, которая ставит в зависимость его гидравлическое сопротивление от скорости и направления потока теплоносителя. При увеличении скорости потока в прямом (рабочем) направлении гидравлическое сопротивление должно уменьшаться, но при этом возрастать резко и многократно по сравнению с рабочим направлением потока при движении потока в обратном направлении.

Тепловые потери на обратном клапане учитываются посредством введения дополнительного блока «трубопровод», подключаемого последовательно с блоком «Обратный клапан».

В результате модель обратного клапана опишем с использованием следующих выражений:

$$H_{\text{ВЫХ}} = H_{\text{ВХ}} - G_{\text{ВХ}}^2 \cdot \text{sign}(G) \cdot s(G), \quad (2.85)$$

$$G_{\text{ВЫХ}} = G_{\text{ВХ}}, \quad (2.86)$$

$$T_{\text{ВЫХ}} = T_{\text{ВХ}}. \quad (2.87)$$

Видеокадр составного блока, реализующего модель обратного клапана в соответствии с выражениями (2.85)-(2.87), представлен на рисунках 2.14 и 2.15.

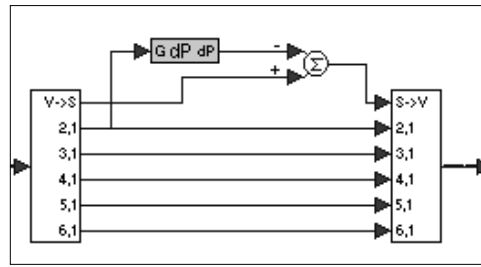


Рисунок 2.14 – Видеокадр составного блока «Обратный клапан»

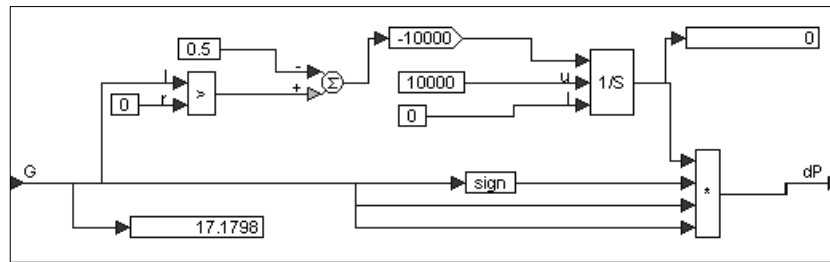


Рисунок 2.15 – Видеокадр составного блока «dP»
в составном блоке «Обратный клапан»

4. Насос

Для использования в модели насосного оборудования используется напорная характеристика $H_H(G)$, которая определяет перепад давления между выходом и входом насоса в зависимости от величины расхода теплоносителя. В среде *VisSim* напорная характеристика задается с использованием кусочно-линейной аппроксимации указанной зависимости в табличном виде. Точки графика нагрузочной характеристики насоса задаются в блоке «map» в виде файла, содержащего таблицу с двумя столбцами – расходом теплоносителя и соответствующим ему перепадом давлений.

Тепловые потери на насосе учитываются посредством введения дополнительного блока «трубопровод», подключаемого последовательно с блоком «Насос».

В результате модель насоса опишем с использованием следующих выражений:

$$H_{\text{ВЫХ}} = H_{\text{ВХ}} + H_H(G), \quad (2.88)$$

$$G_{\text{ВЫХ}} = G_{\text{ВХ}}, \quad (2.89)$$

$$T_{\text{ВЫХ}} = T_{\text{ВХ}}. \quad (2.90)$$

В качестве примера на рисунке 2.16 представлена напорная характеристика насосов WILO TOP-S 50/15, используемых в контурах циркуляции систем отопления зданий в корпусах университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». Точки графиков соответствующих режимов работы насоса (напор [м] и расход [$\text{м}^3/\text{час}$]) записываются в текстовый файл, передаваемый в блок «tar» в среде VisSim.

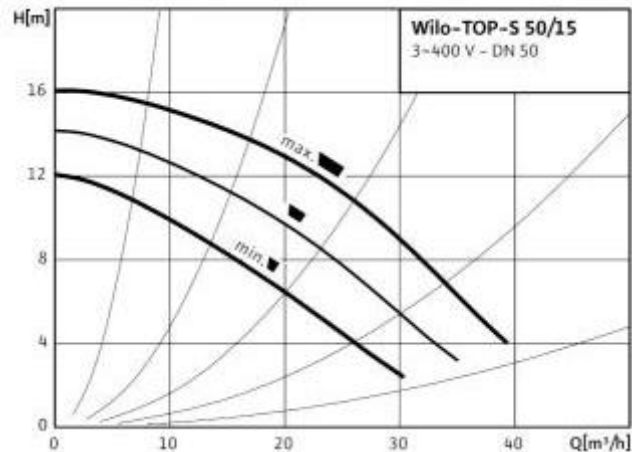


Рисунок 2.16 – Пример напорной характеристики насоса WILO TOP-S 50/15

Видеокадр составного блока, реализующего модель насоса в соответствии с выражениями (2.88)-(2.90), представлен на 2.17.

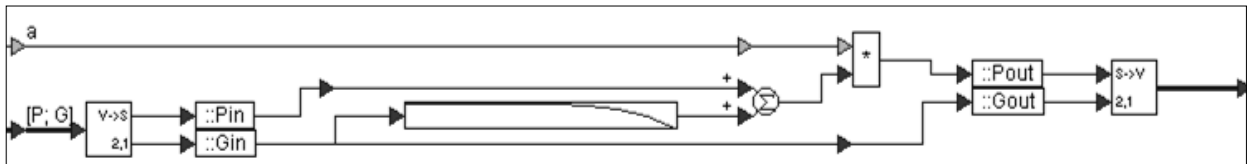


Рисунок 2.17 – Видеокадр составного блока «Насос»

5. Узлы деления и слияния потоков

В узлах соединения трех и более участков трубопроводов необходимо решать задачи деления и слияния потоков.

Задачу деления потока на множество ветвей можно рассматривать как последовательное деление потока на две части (рисунок 2.18). При этом необходимо выполнять расчет расходов теплоносителя по соответствующим направлениям в зависимости от полного гидравлического сопротивления участков трубопроводной сети, присоединяемых к рассматриваемому узлу, поэтому расход теплоносителя определяется при решении СНАУ всей системы.

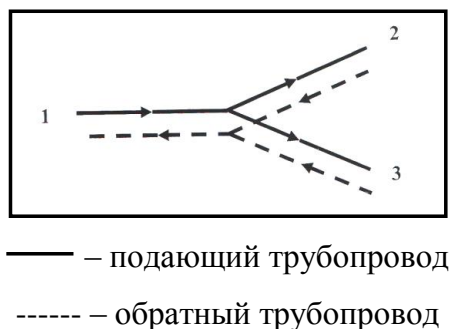


Рисунок 2.18 – Схема узла деления потока теплоносителя

Опишем узел деления потока подаваемого теплоносителя следующими выражениями:

$$P_1 = P_2 = P_3, \quad (2.91)$$

$$G_3 = G_1 - G_2, \quad (2.92)$$

$$T_1 = T_2 = T_3, \quad (2.93)$$

где P_1 , G_1 , T_1 – давление, расход и температура теплоносителя, входящего в узел из подающего трубопровода по первой ветви; P_2 , P_3 , G_2 , G_3 , T_2 , T_3 – давление, расход и температура разделенного теплоносителя, выходящего из узла в подающие трубопроводы второй и третьей ветвей соответственно.

Так как величина деления потока зависит от полных сопротивлений участков трубопроводной сети, соответствующих каждой ветви, но при этом не заданных в самом блоке деления, то при выполнении расчета один из неизвестных расходов заменяется блоком «unknown».

Поскольку система теплоснабжения является закрытой и включает подающий и обратный трубопровод, то делению потока подаваемого теплоносителя должно соответствовать смешение потоков обратного теплоносителя.

В случае расчета параметров смешения двух потоков обратного теплоносителя необходимо также выполнение равенства давлений, поэтому при итеративном алгоритме решения СНАУ будем минимизировать разницу $P_2 - P_3$, передавая её значение на вход блока «constraint». В результате образуется одно дополнительное алгебраическое уравнение с одной дополнительной неизвестной

(расход по одной из ветвей). Поэтому каждой ветви в системе теплоснабжения будет соответствовать отдельное равенство $f(\mathbf{x})=0$ в СНАУ.

Расход теплоносителя для обратного трубопровода на выходе узла равен сумме расходов на входных ветвях обратного трубопровода для любого направления движения потоков.

При смешении потоков температуры теплоносителя во входящих ветвях могут быть различны. В этом случае результирующая температура теплоносителя определяется с учётом соотношений расходов теплоносителя во входных ветвях.

В результате модель смешения двух потоков опишем с использованием следующих выражений:

$$P_1 - P_3 = 0, \quad (2.94)$$

$$P_1 = P_2, \quad (2.95)$$

$$G_1 = G_2 + G_3, \quad (2.96)$$

$$T_1 = \frac{T_2 \cdot G_2 + T_3 \cdot G_3}{G_2 + G_3}, \quad (2.97)$$

где $P_2, P_3, G_2, G_3, T_2, T_3$ – давление, расход и температура потоков теплоносителя, входящих в узел из обратных трубопроводов второй и третьей ветвей соответственно; P_1, G_1, T_1 – давление, расход и температура смешанного теплоносителя, выходящего из узла в обратный трубопровод по первой ветви.

При разработке структуры модели в соответствии со схемой трубопроводной сети системы теплоснабжения расстановка узлов смешения и деления потоков в среде моделирования выполняется с учетом предполагаемого направления движения потоков теплоносителя. При решении СНАУ всей системы теплоснабжения результирующие направления движения потоков могут отличаться от направлений, выбранных первоначально при разработке модели. Обратное движение потока будет отображаться в виде отрицательного значения расхода в трубопроводе. Такое поведение характерно для узлов с трубопроводами-перемычками, соединяющих различные ветви системы теплоснабжения в нескольких точках для обеспечения бесперебойной передачи теплоносителя в случае отключения участков трубопровода при авариях.

Варианты направлений движения теплоносителя в блоке деления потока представлены на рисунке 2.19.

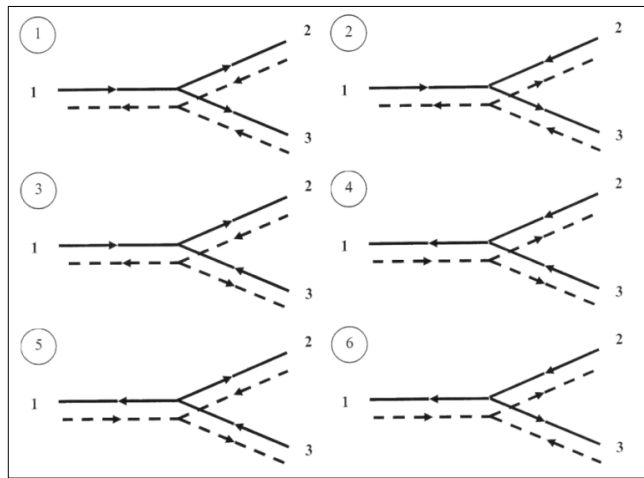


Рисунок 2.19 – Варианты направлений движения теплоносителя в блоке деления потока

Блок деления потока должен обеспечивать выполнение корректного расчета для указанных вариантов направлений движения теплоносителя. Для этого была разработана соответствующая схема моделирования составного блока деления потока, видеокادر которого изображен на рисунке 2.20.

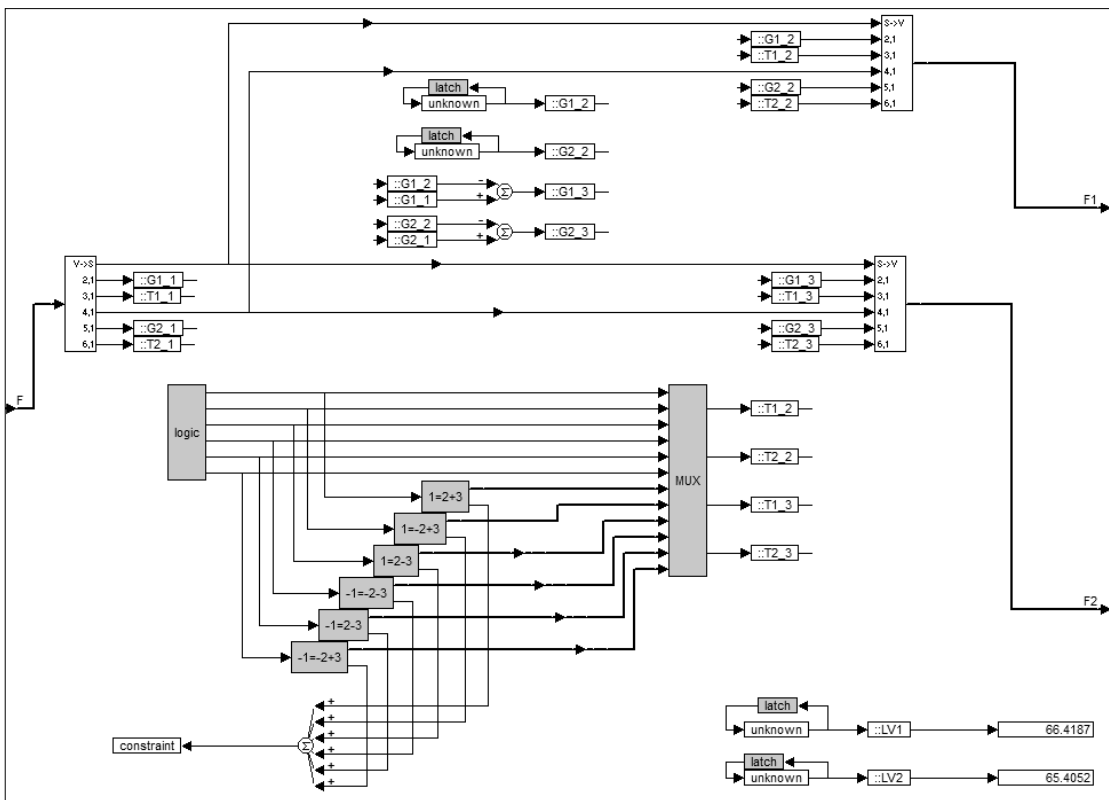


Рисунок 2.20 – Видеокادر составного блока деления потока

Алгоритм расчета значений расходов одинаков для всех направлений движения теплоносителя по ветвям. Алгоритм расчета значений температур теплоносителя зависит от направления и соотношения расходов теплоносителя в соответствующих ветвях. На рисунке 2.21 приведен видеокادر составного блока расчета температур для направления потока в случае №1, представленного на рисунке 2.19.

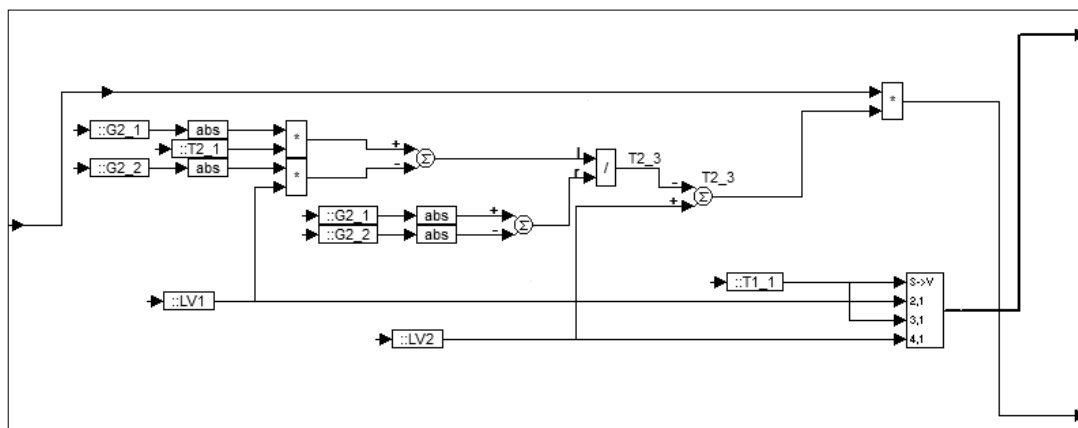


Рисунок 2.21 – Видеокادر составного блока расчета температур в случае №1 при делении потока

Выбор алгоритма расчета температур прямого и обратного теплоносителей при делении потока в зависимости от направления движения теплоносителя осуществляется в автоматическом режиме при решении СНАУ всей системы с использованием составного блока «logic», видеокادر которого представлен на рисунке 2.22.

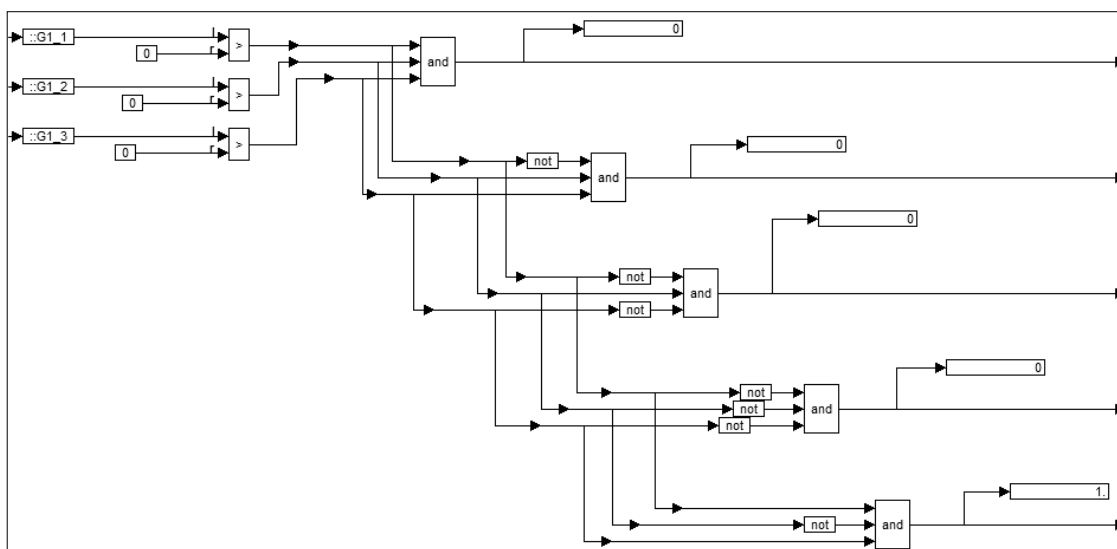
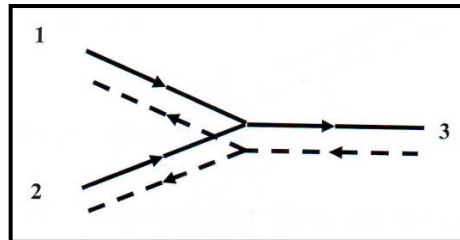


Рисунок 2.22 – Видеокادر составного блока «logic» узла деления потока

Задачу смешения потоков от множества ветвей можно рассматривать как последовательное слияние потоков из двух частей (рисунок 2.23). При этом также необходимо выполнять расчет расходов теплоносителя по соответствующим направлениям в зависимости от полного гидравлического сопротивления участков трубопроводной сети.



— — подающий трубопровод
 - - - - - обратный трубопровод

Рисунок 2.23 – Схема узла смешения потоков теплоносителя

Приведенные выше формулы узла деления потока для подающего и обратного трубопроводов соответствуют выражениям узла смешения потоков для обратного и подающего трубопроводов соответственно.

По аналогии с блоком деления потока при решении СНАУ всей системы теплоснабжения результирующие направления движения потоков могут отличаться от направлений, выбранных первоначально при разработке модели. Варианты направлений движения теплоносителя в блоке смешения потоков приведены на рисунке 2.24.

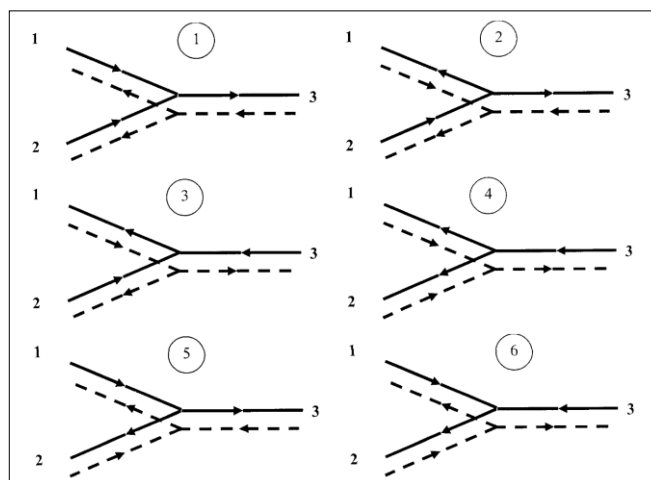


Рисунок 2.24 – Варианты направлений движения теплоносителя в блоке смешения потоков

Блок смешения потоков должен обеспечивать выполнение корректного расчета для указанных вариантов направлений движения теплоносителя. Для этого была разработана соответствующая схема моделирования составного блока смешения потоков, видеокادر которого изображен на рисунке 2.25.

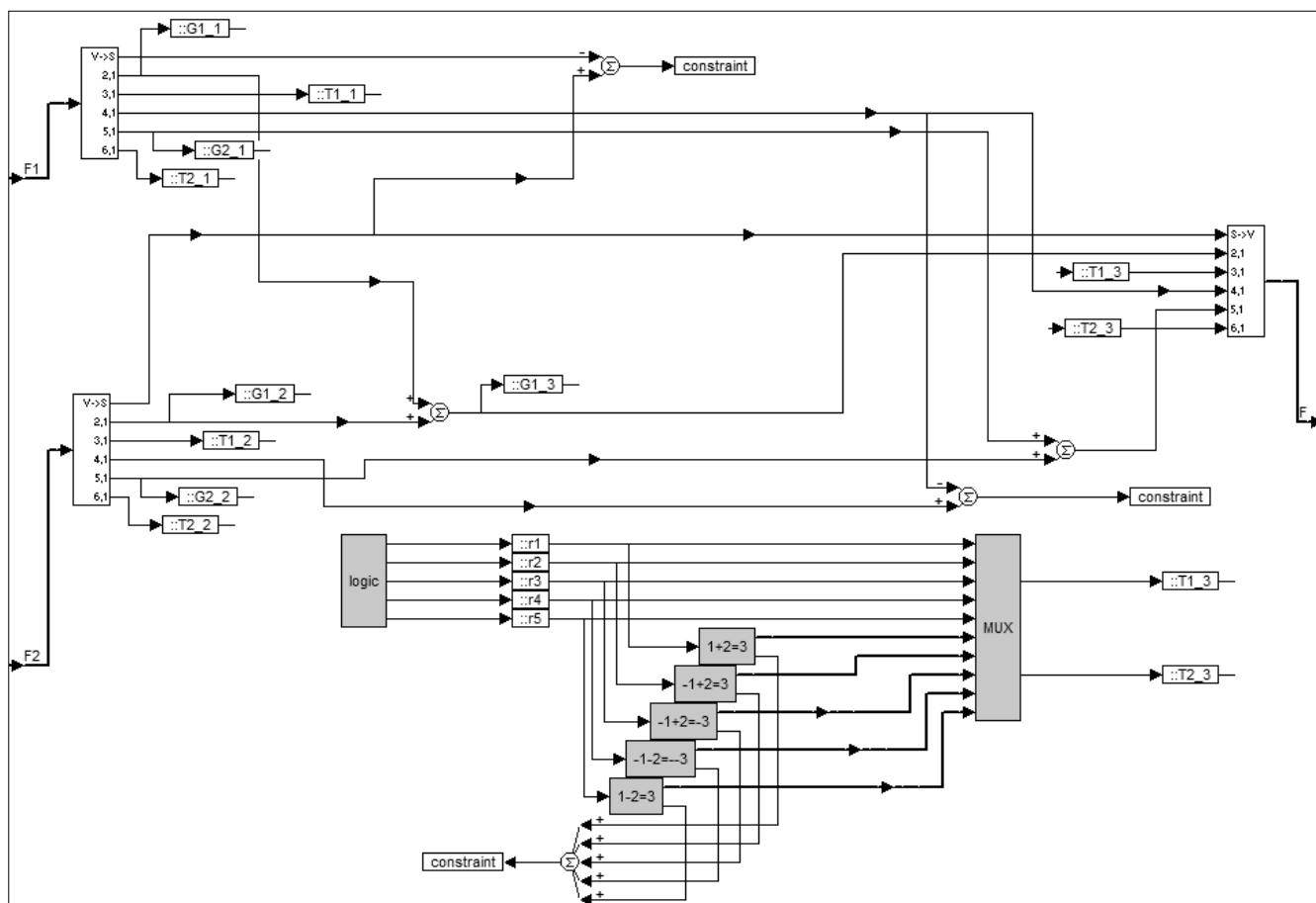


Рисунок 2.25 – Видеокادر составного блока смешения потоков

Алгоритм расчета значений расходов одинаков для всех направлений движения теплоносителя по ветвям. Алгоритм расчета значений температур теплоносителя зависит от направления и соотношения расходов теплоносителя в соответствующих ветвях. На рисунке 2.26 приведен видеокادر составного блока расчета температур для направления потока в случае №1, представленного на рисунке 2.24.

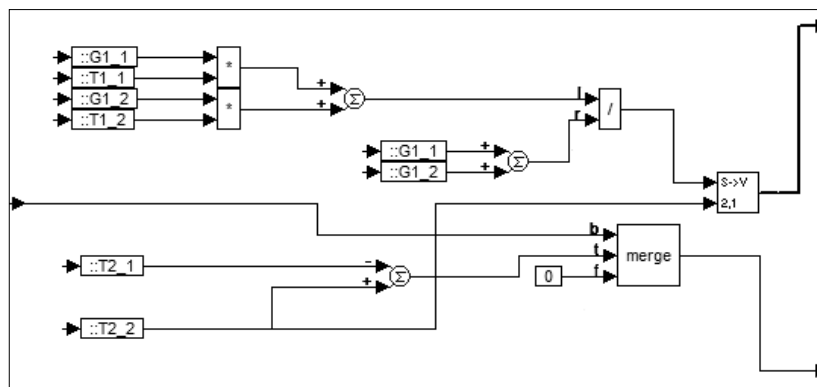


Рисунок 2.26 – Видеокадр составного блока расчета температур
в случае №1 при смешении потоков

Выбор алгоритма расчета температур прямого и обратного теплоносителей при смешении потоков в зависимости от направления движения теплоносителя осуществляется в автоматическом режиме при решении СНАУ всей системы с использованием составного блока «logic», видеокадр которого представлен на рисунке 2.27.

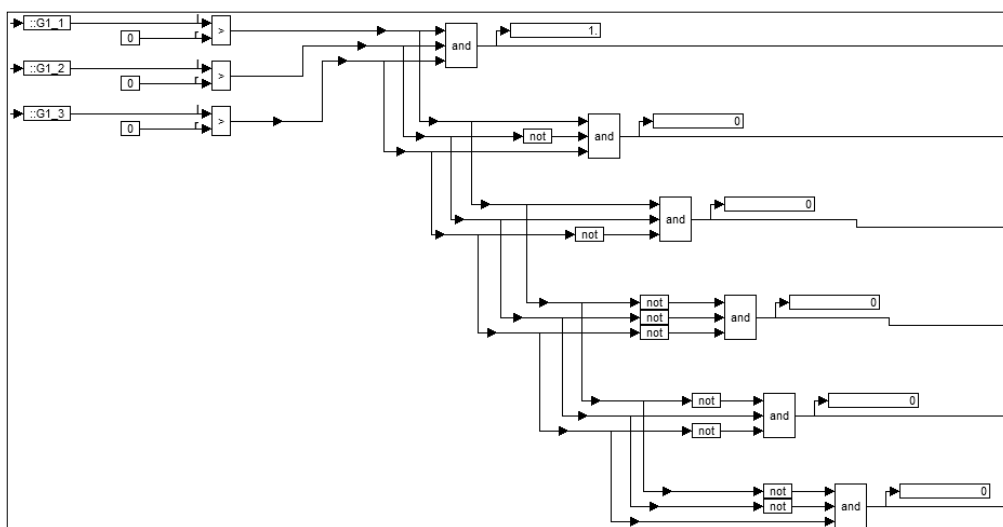


Рисунок 2.27 – Видеокадр составного блока «logic» узла смешения потоков

6. Насосная станция

Блок «Насосная станция» является составным блоком, реализующим структуру трубопроводной сети внутри насосной станции, и может включать такие блоки, как «Регулирующий клапан», «Обратный клапан», «Насос», узлы деления и смешения потоков.

Видеокадр примера составного блока, реализующего модель насосной станции, представлен на рисунке 2.28.

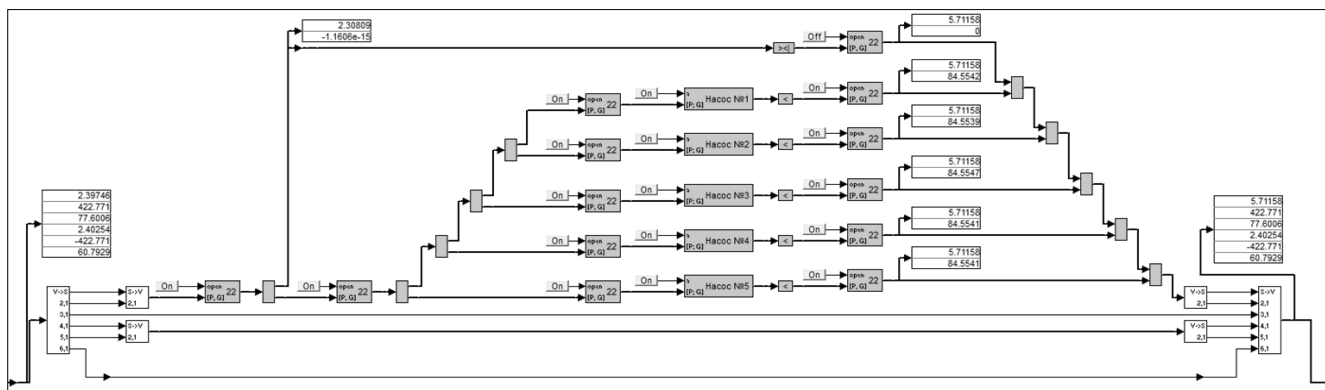


Рисунок 2.28 – Видеокадр примера составного блока «Насосная станция»

7. Источник тепловой энергии

Основным параметром управления потреблением тепловой энергии на источнике является значение температуры теплоносителя, подаваемого в систему теплоснабжения. Регулирование температуры подаваемого теплоносителя выполняется по температурному графику в зависимости от температуры наружного воздуха. Точки температурного графика указываются в виде таблицы значений со столбцами «температура наружного воздуха» и «температура подаваемого теплоносителя» в текстовом файле, который передается в блок «map» среды *VisSim*.

Суммарный расход теплоносителя на источнике тепловой энергии, количество подпитывающей воды и температура обратного теплоносителя рассчитываются при решении СНАУ всей системы теплоснабжения.

В системе теплоснабжения ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» используются три вида источников:

1. Когенерационная установка

Когенерационная установка является составным блоком, в состав которого входят блоки «ТГУ» (теплогенерирующая установка), «трубопровод», «задвижка» (регулирующий клапан), «обратный клапан», узлы деления и смешения потоков. В системе теплоснабжения ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» используются две когенерационные установки – газотурбинная и газопоршневая станции. Видеокадр составного блока «ТГУ» приведен на рисунке 2.29. Видеокадр составного блока «Подпитка», используемого в блоке «ТГУ» для расчета расхода

теплоносителя, подпитки, температуры обратного теплоносителя, а также температуры подаваемого теплоносителя с учетом ограничения генерируемой на установке мощности, приведен на рисунке 2.30.

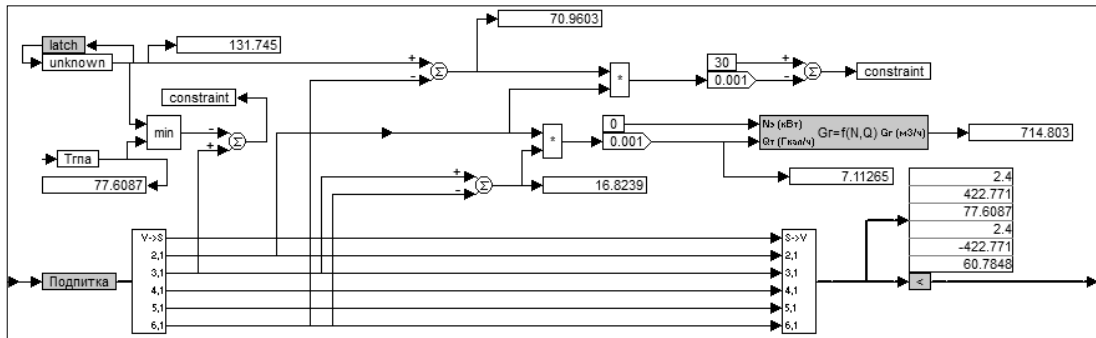


Рисунок 2.29 – Видеокادر составного блока «ТГУ»

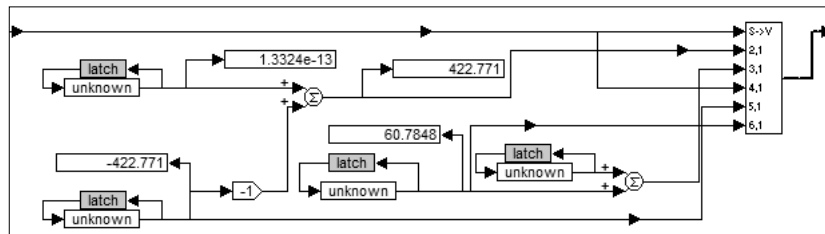


Рисунок 2.30 – Видеокادر составного блока «Подпитка» в блоке «ТГУ»

2. Центральный тепловой пункт

Центральный тепловой пункт (ЦТП) является составным блоком, в состав которого входят блоки «трубопровод», «задвижка», «обратный клапан», «насос», узлы деления и смешения потоков. В системе теплоснабжения ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» используются два ЦТП, позволяющие получать дополнительную тепловую энергию из городской тепловой сети. Видеокادر составного блока «ЦТП» приведен на рисунке 2.31.

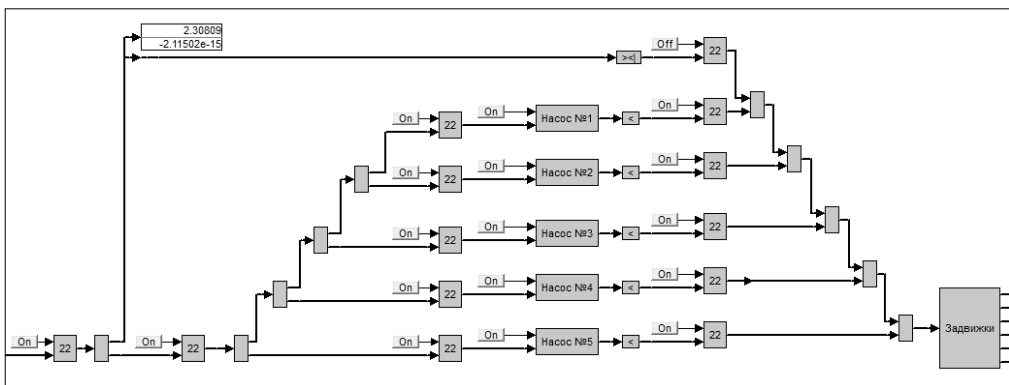


Рисунок 2.31 – Видеокادر составного блока «ЦТП»

3. Котельная станция

Котельная станция является составным блоком, в состав которого входят блоки «котельный агрегат», «трубопровод», «задвижка», «обратный клапан», «насос», узлы деления и смешения потоков. Видеокадр составного блока «котел» приведен на рисунке 2.32.

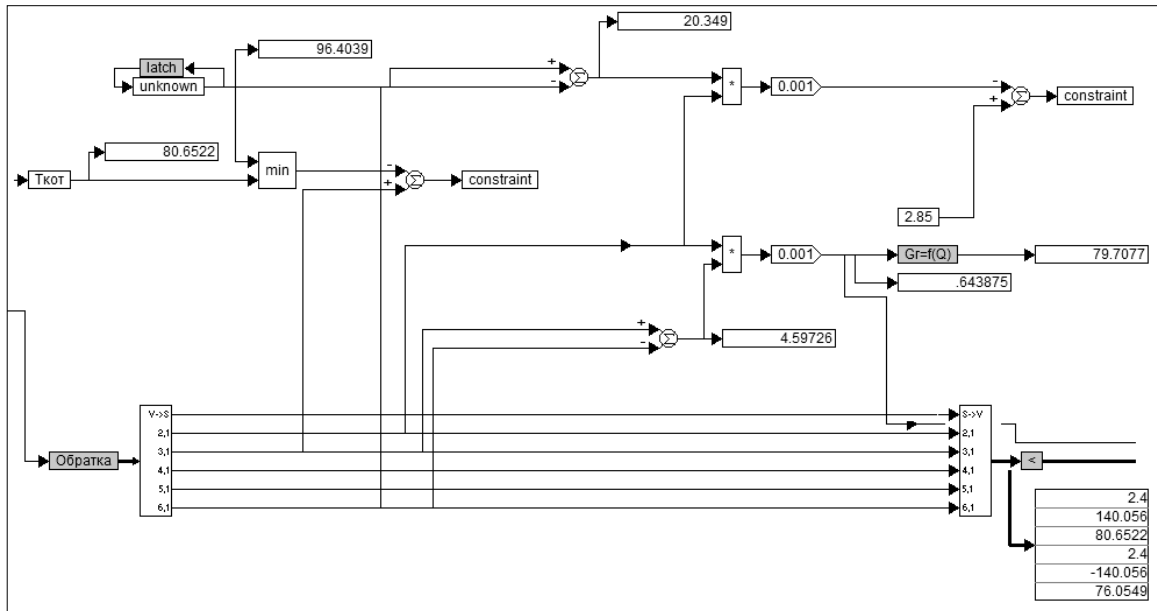


Рисунок 2.32 – Видеокадр составного блока «котельный агрегат»

8. Потребитель тепловой энергии

В качестве основного возмущающего воздействия в рассматриваемой модели, от которого зависит потребление тепловой энергии зданием, принята температура наружного воздуха T_H . Поэтому тепловая мощность, требуемая для отопление здания Q , рассчитывается по формуле (2.29). Тепловая мощность, подаваемая на здание из тепловой сети, рассчитывается по формуле (2.28). Оценка температуры внутреннего воздуха помещения T_{II} выполняется по формуле (2.34).

Рассмотрим три вида потребителей тепловой энергии:

1. На рисунке 2.33 приведена схема потребителя без контура смешения и автоматической системы качественно-количественного регулирования.

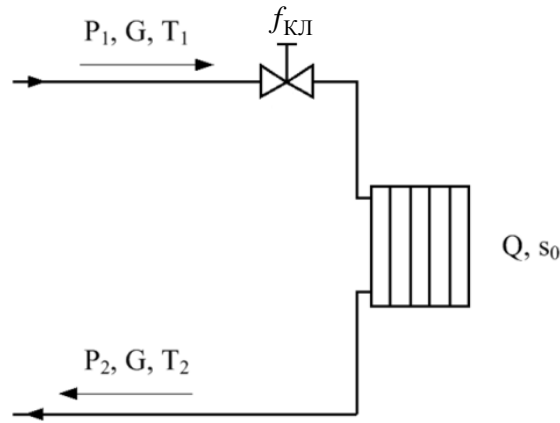


Рисунок 2.33 – Схема потребителя без контура смешения

Запишем соответствующую систему уравнений, реализующую расчет параметров потребителя без контура смешения:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\Pi} = T_{\text{H}} + \frac{T_1 - T_{\text{H}}}{q \cdot V \cdot \left(\frac{1}{k \cdot F} + \frac{0,5}{c \cdot G} \right) + 1} \\ Q = q \cdot V \cdot (T_{\Pi} - T_{\text{H}}) \\ Q = c \cdot G \cdot (T_1 - T_2) \\ G / G_0 = f_{\text{кЛ}}(\varphi) \\ P_1 - P_2 = G_0^2 \cdot s_0 \end{array} \right. , \quad (2.98)$$

где T_{H} – температура наружного воздуха; T_{Π} – средняя температура воздуха помещений; q – коэффициент удельного теплотребления на отопление; V – объем отапливаемых помещений здания; k – коэффициент теплопередачи нагревательных установок; F – площадь поверхности нагревательных установок; T_1 – температура теплоносителя, подаваемого из тепловой сети; T_2 – температура обратного теплоносителя; P_1 и P_2 – давления в подающем и обратном трубопроводах тепловой сети; G – расход теплоносителя в системе отопления здания; G_0 – максимальный расход теплоносителя при открытом клапане; $f_{\text{кЛ}}()$ – расходная характеристика клапана; φ – степень открытия клапана; s_0 – гидравлическое сопротивление трубопроводов в системе отопления здания.

В системы уравнений (2.98) для каждого простого потребителя известными величинами являются q , V , k , F , P_1 , P_2 , s_0 , $f_{\text{кЛ}}()$, T_1 . Решение системы уравнений

(2.98) может выполняться в зависимости от двух способов управления потреблением тепловой энергии:

1. В случае ручной балансировки системы отопления известна степень открытия клапана φ . Неизвестными параметрами являются G , G_0 , Q , T_2 , T_{II} .

2. В случае использования балансировочных клапанов с регуляторами поддержание температуры обратного теплоносителя по температурному графику или непосредственно температуры помещений может выполняться путем коррекции расхода теплоносителя в системе отопления:

2.1. При поддержании температуры воздуха помещений T_{II} в (2.98) задается требуемое значение T_{II} . Неизвестными параметрами являются φ , G , G_0 , Q , T_2 .

2.2. При поддержании температуры обратного теплоносителя T_2 в (2.98) задается T_2 по температурному графику в зависимости от T_H . Неизвестными параметрами являются φ , G , G_0 , Q , T_{II} .

Видеокадр составного блока простого потребителя приведен на рисунке 2.34.

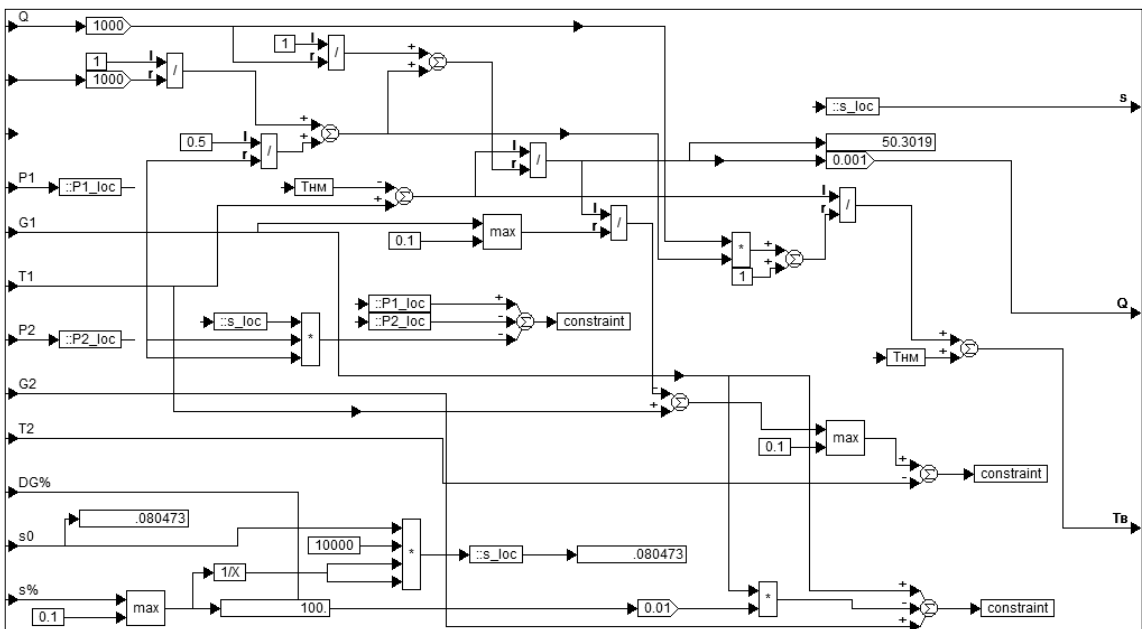


Рисунок 2.34 – Видеокадр составного блока простого потребителя

В системах отопления может выполняться качественно-количественное регулирование потребления тепловой энергии в автоматическом режиме с

использованием программируемых контроллеров. В таких системах осуществляется поддержание температуры теплоносителя в подающем или обратном трубопроводах по температурному графику в зависимости от температуры наружного воздуха или непосредственно требуемой температуры воздуха в помещениях здания с использованием контура внутренней циркуляции теплоносителя за счёт частичного смешения теплоносителя, возвращаемого из системы отопления, с теплоносителем, подаваемым из тепловой сети. В этом случае для смешения теплоносителей применяются схемы с двухходовыми и трёхходовыми регулирующими клапанами.

2. На рисунке 2.35 приведена типовая схема управления с применением двухходового регулирующего клапана.

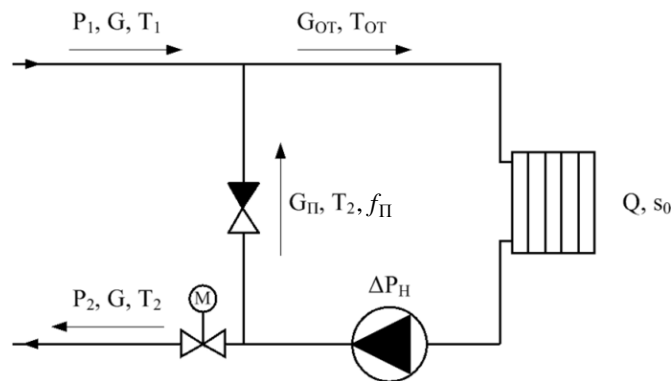


Рисунок 2.35 – Схема управления с использованием двухходового клапана

Запишем соответствующую систему уравнений, реализующую расчет параметров потребителя с АИТП при регулировании с помощью двухходового клапана:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\Pi} = T_{\text{H}} + \frac{T_{\text{OT}} - T_{\text{H}}}{q \cdot V \cdot \left(\frac{1}{k \cdot F} + \frac{0,5}{c \cdot G_{\text{OT}}} \right) + 1} \\ Q = q \cdot V \cdot (T_{\Pi} - T_{\text{H}}) \\ Q = c \cdot G \cdot (T_1 - T_2) \\ Q = c \cdot G_{\text{OT}} \cdot (T_{\text{OT}} - T_2) \\ G_{\text{OT}} = G + G_{\Pi} \\ \Delta P_{\text{H}}(G_{\text{OT}}) = G_{\text{OT}}^2 \cdot s_0 + f_{\Pi}(G_{\Pi}) \end{array} \right. , \quad (2.99)$$

где $f_{\Pi}()$ – расходная характеристика используемого обратного клапана; G_{Π} – часть расхода обратного теплоносителя, смешиваемого с теплоносителем, подаваемым

из тепловой сети; G_0 – максимальная величина расхода теплоносителя, подаваемого из тепловой сети при $G_{\Pi} = 0$; $\Delta P_{\text{н}}()$ – функция, отражающая график напорной характеристики циркуляционного насоса, точки которого (перепад давлений и расход теплоносителя в контуре циркуляции) задаются в табличном виде в текстовом файле, передаваемом в блок «map» среды *VisSim*, s_0 – сопротивление системы при $G_{\Pi} = 0$.

В этом случае для регулирования температуры обратного теплоносителя T_2 по температурному графику ($T_2 = f(T_{\text{н}})$) при решении системы уравнений (2.99) необходимо найти значения величин $T_{\text{от}}$, $G_{\text{от}}$, G_{Π} , G_1 , Q , T_{Π} . Для регулирования температуры $T_{\text{от}}$, подаваемого в систему отопления, по температурному графику ($T_{\text{от}} = f(T_{\text{н}})$) при решении системы уравнений (2.99) необходимо найти значения величин T_2 , $G_{\text{от}}$, G_{Π} , G_1 , Q , T_{Π} .

На рисунке 2.36 приведен видеокادر составного блока потребителя с АИТП, оборудованным двухходовым регулирующим клапаном.

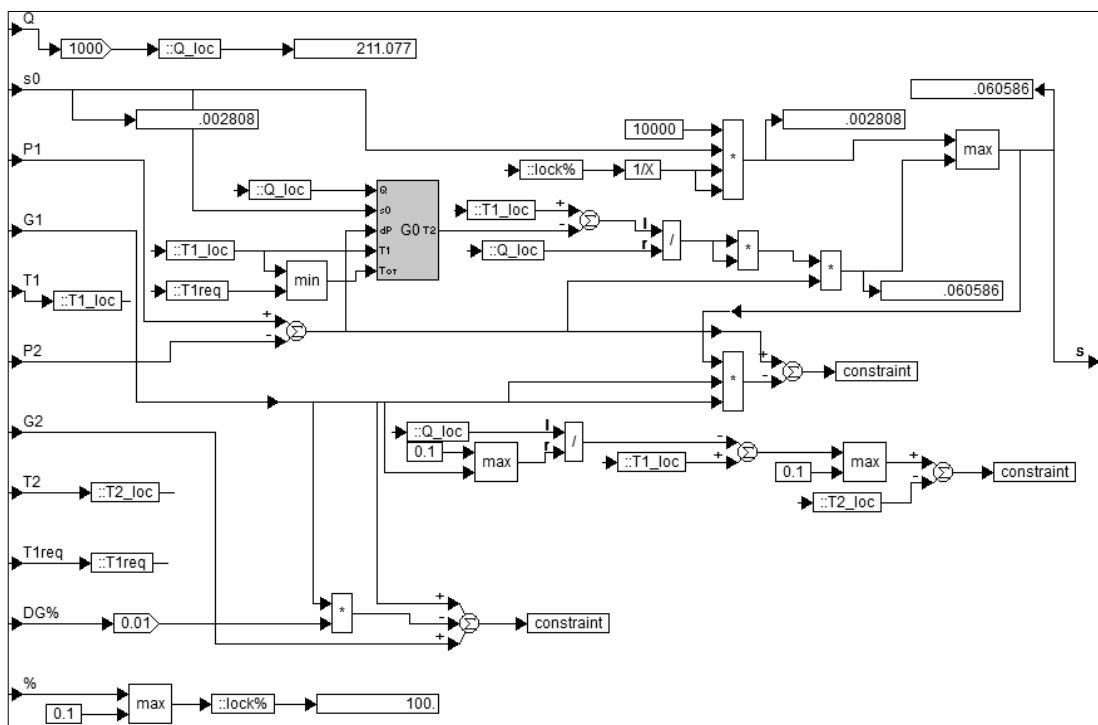


Рисунок 2.36 – Видеокادر составного блока потребителя с АИТП, оборудованным двухходовым регулирующим клапаном

3. На рисунке 2.37 приведена типовая схема управления с применением трехходового регулирующего клапана.

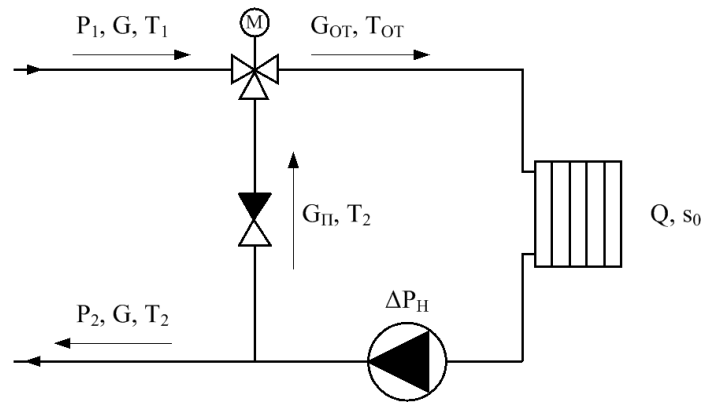


Рисунок 2.37 – Схема управления с использованием трёхходового клапана

Запишем соответствующую систему уравнений, реализующую расчет параметров потребителя с АИТП при регулировании с помощью трёхходового клапана:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\Pi} = T_{\text{H}} + \frac{T_{\text{OТ}} - T_{\text{H}}}{q \cdot V \cdot \left(\frac{1}{k \cdot F} + \frac{0,5}{c \cdot G_{\text{OТ}}} \right) + 1} \\ Q = q \cdot V \cdot (T_{\Pi} - T_{\text{H}}) \\ Q = c \cdot G \cdot (T_1 - T_2) \\ Q = c \cdot G_{\text{OТ}} \cdot (T_{\text{OТ}} - T_2) \\ G_{\text{OТ}} = G + G_{\Pi} \\ G / G_0 = f_{\text{кЛ}}(G_{\Pi} / G_{\Pi 0}) \\ P_1 - P_2 + \Delta P_{\text{H}}(G_0) = G_0^2 \cdot s_0 \\ \Delta P_{\text{H}}(G_{\Pi 0}) = G_{\Pi 0}^2 \cdot s_0 + f_{\Pi}(G_{\Pi 0}) \end{array} \right. , \quad (2.100)$$

где $f_{\text{кЛ}}()$ – функция зависимости расхода теплоносителя, подаваемого из тепловой сети, от величины расхода теплоносителя, подмешиваемого из обратного трубопровода. $f_{\text{кЛ}}()$ описывает график расходной характеристики регулирующего клапана, точки которого задаются в табличном виде в текстовом файле, передаваемом в блок «map» среды *VisSim*. $G_{\Pi 0}$ – максимальная величина расхода подмешиваемого теплоносителя при $G = 0$, рассчитываемая при решении уравнения:

$$\Delta P_{\text{H}}(G_{\Pi 0}) = G_{\Pi 0}^2 \cdot s_0. \quad (2.101)$$

Таким образом, приведённая методика построения макромодели системы теплоснабжения позволяет создавать модели тепловых сетей различной сложности с различной структурой трубопроводной сети, с разнообразными

источниками и потребителями тепловой энергии. На основании данной методики разработана приведенная далее макро модель системы теплоснабжения ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», с помощью которой выполнена проверка предложенного алгоритма распределенного управления централизованной системой теплоснабжения, функционирующей в дефицитном режиме.

Выводы к главе 2

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

2. Разработан алгоритм на основе метода ветвей и границ для решения задачи оперативного управления теплоснабжением здания на базе сенсорных сетей температуры воздуха помещений в противоречивых температурных условиях.

3. Для дефицитного режима функционирования централизованной системы теплоснабжения разработан интерактивный алгоритм оперативного управления группой зданий на базе сенсорных сетей с ограниченной располагаемой мощностью источников тепловой энергии.

4. Предложены факторные зависимости динамических связей распределённого объекта управления, включающие основные теплотехнические возмущающие (температура наружного воздуха) и управляющее воздействия (температура и расход подаваемого теплоносителя).

5. Предложен метод идентификации динамических связей распределённого объекта управления, учитывающий транспортное запаздывание и динамические характеристики связей.

6. В среде имитационного моделирования *Vissim* с помощью визуального редактора разработаны вычислительные элементы имитационной макро модели для математического моделирования системы централизованного теплоснабжения.

ГЛАВА 3. СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

3.1. Общая структура АСУ

Предложенный алгоритм управления распределенными теплоэнергетическими комплексами по критерию максимума количества выполненных температурных условий формирует управляющие воздействия, которые связаны не только с оперативным управлением посредством локальных средств автоматизации, но и с проведением организационно-технических мероприятий, связанных с повышением энергетической эффективности. Поэтому система управления, включающая проведение энергосберегающих мероприятий, должна содержать элементы автоматизированных систем энергоменеджмента, предоставляющих соответствующее организационное, методологическое и методическое обеспечение. Основные идеи, заложенные в системах энергоменеджмента, описаны в стандарте ISO 50001 «Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению» [32].

В связи с этим в данной работе предлагается общая схема АСУ теплоэнергетического комплекса на базе системы энергоменеджмента, представленная на рисунке 3.1 [7].

Согласно указанной схеме АСУ должна включать следующие 3 подсистемы:

1. Автоматизированную систему диспетчерского управления теплоэнергетическим комплексом (АСДУ ТЭК). Основными функциями подсистемы являются оперативный контроль, анализ и управление генерацией и потреблением тепловой энергии в системе теплоснабжения университетского городка. АСДУ ТЭК включает в себя:

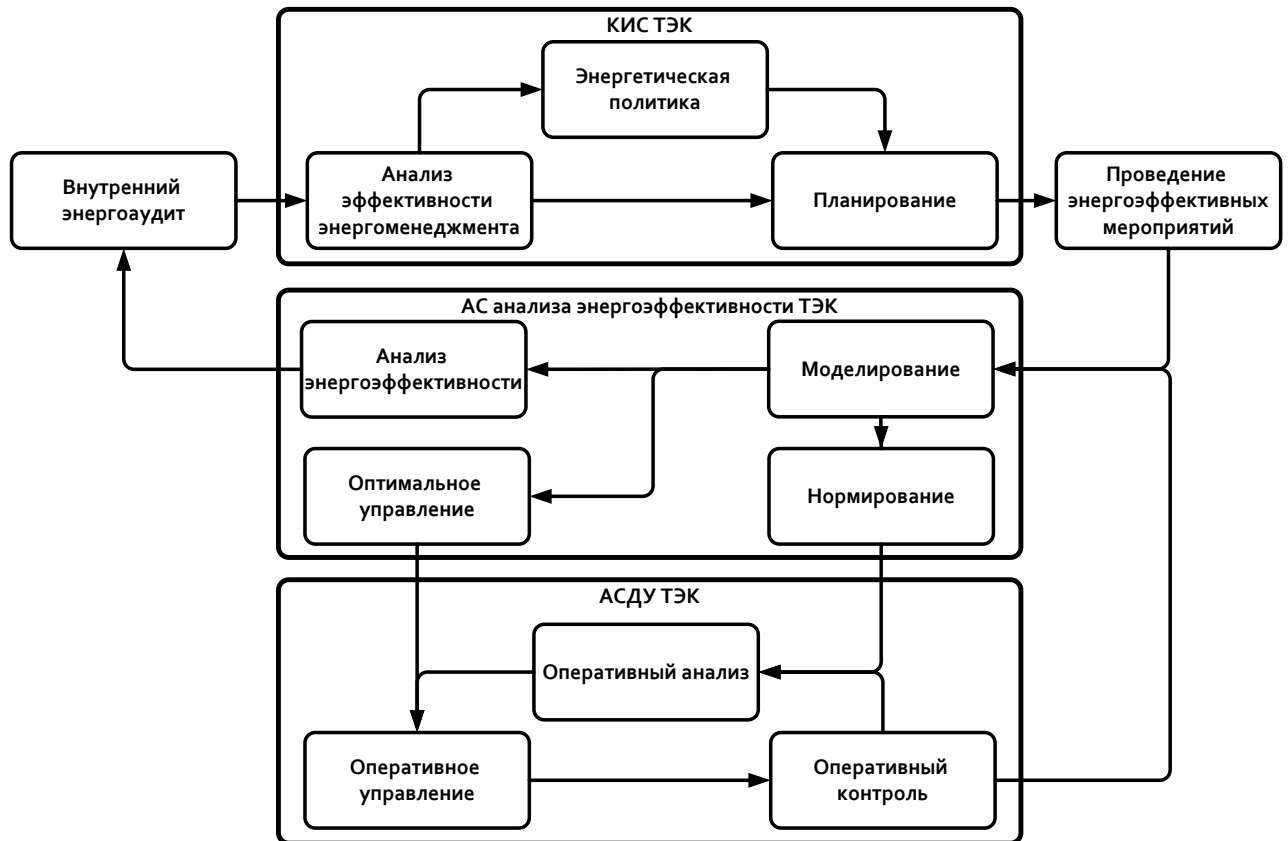


Рисунок 3.1 – Общая схема АСУ теплоэнергетического комплекса

1.1. Модули контроля и учёта потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Функции:

1.1.1. Контроль доступа к объектам автоматизации с возможностью авторизации с помощью технологии iButton.

1.1.2. Контроль затопления помещений узлов учёта потребления ТЭР.

1.1.3. Контроль заряда аккумуляторов УСПД.

1.1.4. Регистрация параметров диагностики работы оборудования учёта потребления ТЭР.

1.1.5. Регистрация текущих и накопленных показаний потребления ТЭР.

1.1.6. Архивирование часовых, суточных и месячных показаний потребления ТЭР.

1.2. Модули управления потреблением ТЭР. Функции:

1.2.1. Регистрация параметров диагностики работы оборудования учёта потребления ТЭР.

1.2.2. Регистрация текущих показаний потребления ТЭР.

1.2.3. Автоматическое управление потреблением ТЭР с возможностью корректировки параметров управления:

1.2.3.1. Управление температурой ГВС по суточному и недельному расписанию.

1.2.3.2. Качественное регулирование потребления тепловой энергии на отопление помещений по температурному графику.

1.3. Программно-технический комплекс «ПолиТЭР»:

1.3.1. Подсистема согласования протоколов и организации обмена данными с внешними системами. Функции:

1.3.1.1. Организация и временное планирование процесса обмена данными с внешними системами, приборами учёта и управления.

1.3.1.2. Преобразование передаваемых данных в требуемые форматы согласно протоколам обмена взаимодействующих систем.

1.3.2. Подсистема хранения данных, организованная на базе СУБД Oracle Database. Функции:

1.3.2.1. Хранение информации, собранной с использованием подсистемы согласования протоколов и организации обмена данными с внешними системами и подсистемы представления и редактирования параметров потребления ТЭР.

1.3.2.2. Выполнение оперативных расчётов и анализа потребления ТЭР на основании собранных данных [1,11].

1.3.2.3. Резервное копирование данных.

1.3.3. Подсистема представления и редактирования параметров потребления ТЭР. Функции:

1.3.3.1. Отображение текущих параметров и состояний объектов потребления ТЭР на мнемосхемах.

1.3.3.2. Отображение журналов дискретных состояний объектов, аварий и отклонений от энергоэффективных режимов эксплуатации.

1.3.3.3. Отображение аналоговых параметров потребления ТЭР в виде графиков, позволяющими отображать временные архивы в виде временных рядов и строить зависимости между различными параметрами потребления и влияющими на них факторами.

1.3.3.4. Отображение параметров потребления ТЭР в форме, утверждённой управлением административно-хозяйственной части ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

1.3.3.5. Конфигурирование параметров представления и обмена данными.

1.3.4. Подсистема оповещения пользователей, осуществляемая посредством передачи данных пользователям о событиях, возникших в системе, через электронную почту и/или SMS-оповещения.

2. Автоматизированная информационная система анализа энергоэффективности теплоэнергетического комплекса (АИС АЭ ТЭК). Основными функциями подсистемы являются моделирование, анализ энергоэффективности, нормирование и оптимальное управление генерацией и потреблением тепловой энергии в системе теплоснабжения университетского городка. АИС АЭ ТЭК включает в себя:

2.1. Подсистема имитационного моделирования системы теплоснабжения.

Функции:

2.1.1. Экспериментальное моделирование – расчёт различных режимов функционирования теплоэнергетического комплекса.

2.1.2. Оптимизационное моделирование – расчёт параметров генерации и потребления тепловой энергии теплоэнергетического комплекса по критериям минимума потребления с соблюдением комфортной температуры помещений.

2.1.3. Расчёт корректирующих воздействий для системы оперативного управления на основании результатов экспериментального и оптимизационного моделирования.

2.2. Подсистема нормирования, осуществляющая расчёт норм суточного потребления тепловой энергии на основе эксплуатационных и проектных данных, а также результатов имитационного моделирования.

2.3. Подсистема анализа энергоэффективности, осуществляющая расчёт экономии тепловой энергии по результатам оперативного управления и от проведения организационно-технических мероприятий по повышению энергетической эффективности для теплоэнергетического комплекса в целом и для подключенных к нему потребителей в частности.

Моделирование позволяет выполнять расчет различных режимов функционирования ТЭК, а также производить оптимизацию этих режимов по критериям минимума потребления энергоресурсов. На основании результатов моделирования выполняется расчет корректирующих воздействий для системы оперативного управления. С использованием результатов имитационного моделирования, а также эксплуатационных и проектных данных для контроля выбранных режимов функционирования осуществляется расчет норм суточного потребления тепловой энергии. По результатам оперативного управления и проведения организационно-технических мероприятий выполняется расчет экономии тепловой энергии.

3. Корпоративная информационная система топливно-энергетического комплекса (КИС ТЭК). Основными функциями подсистемы является поддержка принятия решений руководителя или группы по энергоменеджменту при энергетическом планировании, разработке и реализации энергетической политики. В рамках КИС ТЭК на основании данных внутренних энергоаудитов проводится анализ результатов деятельности по энергетическому менеджменту университета, производится корректировка энергетической политики университета и выполняется планирование мероприятий по повышению энергоэффективности.

Для оперативного расчёта управляющих воздействий на потребителях и источниках, учитывающего при решении вышеописанной задачи оптимизации сложную структуру системы централизованного теплоснабжения и динамику

источников, потребителей и трубопроводной сети, целесообразно применять модельно-прогнозирующее управление (MPC) на базе имитационного моделирования объекта управления. Структура модели и взаимодействие её элементов для реализации MPC представлены на рисунке 3.2.

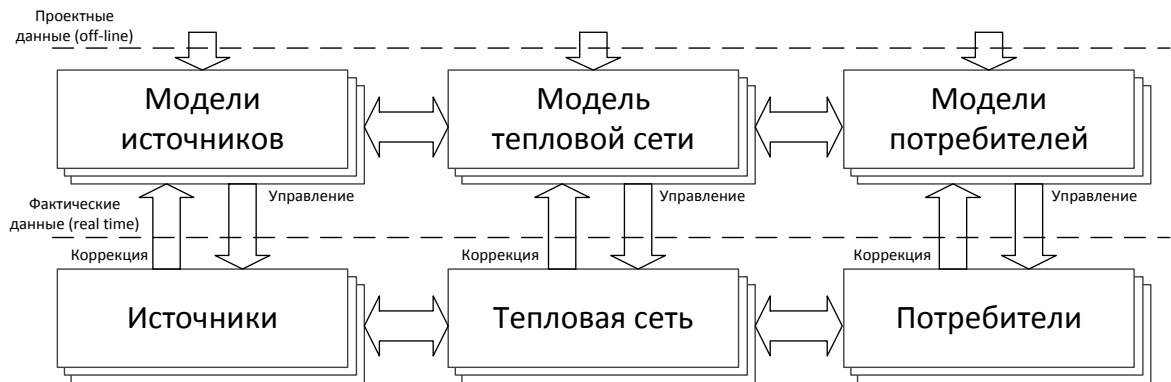


Рисунок 3.2 – Структура имитационной модели системы теплоснабжения

В предлагаемой структуре имитационной модели в системе теплоснабжения выделяются следующие элементы: источники тепловой энергии, тепловая сеть и потребители тепловой энергии. При этом в рамках единой комплексной модели для каждого физического элемента реальной системы теплоснабжения создаётся его имитационная модель, а также моделируются все взаимосвязи между этими элементами. Структура модели, а также её начальные параметры определяются по проектным данным. Далее в ходе функционирования объекта управления в режиме реального времени происходит корректировка характеристик элементов модели по фактическим данным эксплуатации. На основании полученных корректировок имитационной модели система управления, построенная на основе этой модели, вырабатывает в реальном времени управляющие воздействия для реальных элементов системы теплоснабжения с целью поддержания требуемых температурных условий в помещениях зданий.

3.2. Техническое обеспечение

В работе рассмотрены две подсистемы теплоэнергетического комплекса университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»: АСДУ ТЭК и АС АЭ ТЭК. Структурная схема комплекса технических средств, используемых для реализации разработанных подсистем, представлена на рисунке 3.3.

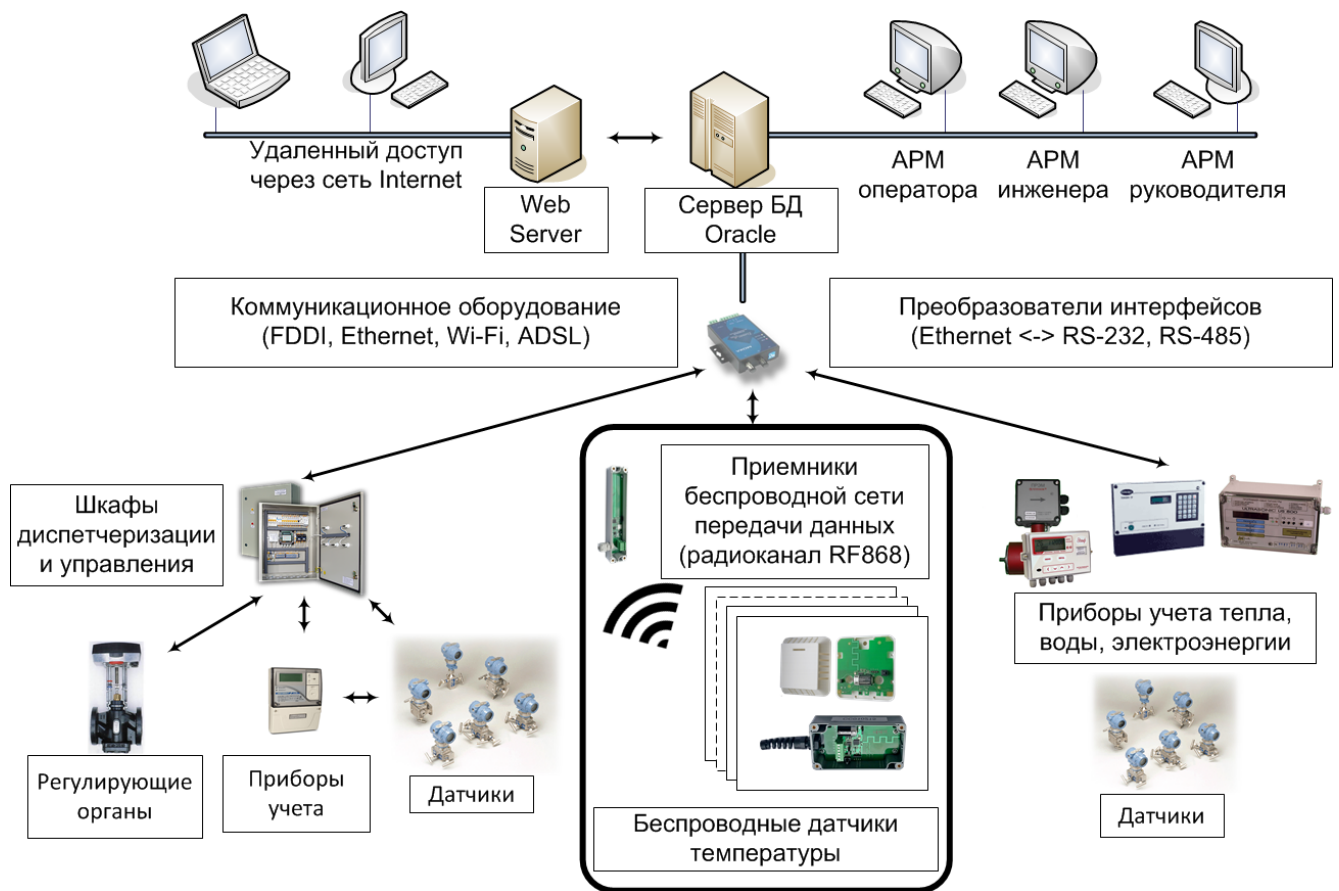


Рисунок 3.3 – Структурная схема комплекса технических средств
АСДУ ТЭК и АС АЭ ТЭК

Комплекс технических средств включает на нижнем уровне приборы учёта и управления, на среднем – коммуникационное оборудование, на верхнем – сервер базы данных, сервер анализа данных, Web-сервер, а также автоматизированные рабочие места пользователей.

На среднем уровне используются следующие модули:

- 1) телекоммуникационный модуль Wi-Fi (6 шт.);
- 2) модуль сбора и передачи данных (56 шт.);
- 3) координатор беспроводной сети (20 шт.).

Передача данных между коммуникационными модулями и сервером базы данных осуществляется с использованием локальной вычислительной сети (ЛВС) ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» на базе технологии выделенной виртуальной локальной сети VLAN (Virtual Local Area Network).

На полевом уровне используются следующие модули:

- 1) модуль регулирования и учета тепловой энергии на отопление зданий (22 шт.);
- 2) модуль приготовления и регулирования горячего водоснабжения зданий (16 шт.);
- 3) телекоммуникационный модуль (6 шт.);
- 4) модуль сбора и передачи данных (56 шт.);
- 5) модуль ввода и учёта тепловой энергии (56 шт.);
- 6) модуль ввода и учёта холодной воды (51 шт.);
- 7) модуль контроля и управления наружным освещением (6 шт.);
- 8) беспроводной датчик температуры воздуха в помещении (250 шт.);
- 9) беспроводной двухканальный преобразователь термосопротивлений для подключения датчиков температуры теплоносителя (32 шт.).

Значительно повысить функциональные возможности существующей проводной сенсорной сети позволили беспроводные технологии передачи данных. Беспроводная сенсорная сеть включает в себя координаторы беспроводной сети, беспроводные датчики температуры воздуха в помещении и беспроводные преобразователи термосопротивлений.

Параметры радиоканала:

- частотный диапазон: 868 МГц;
- ширина канала: 42 кГц;
- шаг каналов: 50 кГц;
- максимальное число каналов: 10;
- модуляция: 2GFSK;
- скорость передачи: 25 кбод;
- спектральная эффективность: 0,7 бит/Гц;
- чувствительность приемника: -108 дБм;
- мощность передатчика: +14 дБм.

Протокол передачи данных использует встроенное шифрование для конфиденциальности и защиты от подмены данных. В каждом датчике встроена сигнализация при вскрытии корпусов датчиков и приемников.

3.3. Программное обеспечение

В качестве SCADA-системы в АСДУ ТЭК применяется программно-технический комплекс (ПТК) «ПолиТЭР». На базе ПТК «ПолиТЭР» [12,93,94] создаются автоматизированные системы диспетчерского контроля и управления объектами ЖКХ, топливно-энергетической сферы, технологическими процессами и производствами. Для этого в ПТК «ПолиТЭР» обеспечивается поддержка различных управляющих контроллеров и приборов учета энергоресурсов.

Общая структурная схема АСДУ на базе ПТК «ПолиТЭР» включает в себя на нижнем уровне приборы учета энергоресурсов, датчики технологических параметров (давление теплоносителя, затопление тепловых пунктов, контроль доступа и пр.), а также управляющие устройства, насосное оборудование, пункты питания систем освещения и пр. Информация с нижнего уровня через управляющие контроллеры и преобразователи интерфейсов передается на сервер базы данных и далее на автоматизированные рабочие места пользователей. Передача данных может осуществляться с использованием различных проводных и беспроводных технологий (оптические линии связи, сотовая связь, передача по силовым питающим линиям и др.). Доступ пользователей к данным диспетчерского контроля предусмотрен по локальной сети либо через сеть Internet.

Основные характеристики ПТК «ПолиТЭР»:

1. Многоцелевая SCADA-система:

– решение для всех видов инженерных систем: теплоснабжение, водоснабжение, электроснабжение, освещение и пр.;

– может быть интегрирована в другие решения автоматизации услуг (РКЦ, платёжные, бухгалтерские системы и пр.).

2. Все функции человеко-машинного интерфейса интегрированы в едином пакете:

- администрирование пользователей;
- управление и мониторинг;
- сигнализация аварийных событий, квитирование и архивирование событий;
- сбор и архивирование параметров (включая резервное копирование);
- документирование данных процесса и конфигурации.

3. Создание пользовательских приложений:

- гибкая структура представления данных позволяет создавать пользовательские приложения, максимально учитывающие требования заказчика и удобство пользователя;
- представление данных в виде связанных многоуровневых интерактивных мнемосхем (схемы, карты, графики и т.д.).

4. Универсальное масштабирование:

- расширение от простой однопользовательской системы, устанавливаемой на одной офисной ПЭВМ до сетевых клиент-серверных конфигураций;
- возможность повышения надежности при помощи резервирования серверов.

5. Взаимодействие с широкой номенклатурой оборудования:

- поддержка и постоянное расширение линейки контроллеров и приборов учета сторонних производителей, используемых в системах ЖКХ;
- возможность реализации нестандартных протоколов обмена данными.

Программное обеспечение АС АЭ ТЭК, на базе которого выполняются предложенные в работе алгоритмы распределенного управления, включают в себя 2 среды разработки:

1. Среда программирования математических расчетов *RStudio* с использованием языка программирования *R* [81], предназначенная для

исполнения предложенных в работе алгоритмов идентификации и распределенного управления.

Язык программирования *R* предназначен для статистической обработки данных в рамках свободной программной среды вычислений с открытым исходным кодом. Язык программирования *R* позволяет реализовывать различные алгоритмы оптимизации, интеллектуального анализа данных, прогнозирования и управления различными технологическими и производственными процессами.

Среда программирования *RStudio* обладает возможностью гибкой настройки графического представления результатов статистического анализа. Указанная среда программирования позволяет использовать расширения базового языка *R* с помощью дополнительных пакетов с открытым кодом, доступных для свободной загрузки с публичных хранилищ данных. Программный пакет *RStudio* распространяется под лицензией *GNU GPL* в виде открытых исходных кодов и откомпилированных приложений для работы в операционных системах *Linux*, *FreeBSD*, *Windows*, *Solaris*, *Mac OS X* и некоторых других **nix*-системах.

2. Среда визуального моделирования *VisSim* [49], предназначенная для расчета макромодели системы централизованного теплоснабжения. Среда *VisSim* позволяет существенно ускорить и облегчить процесс построения и расчёта математических моделей за счет следующих возможностей:

- 1) ввод уравнений выполняется путём выбора и соединения стандартных элементарных математических блоков;
- 2) решение в ускоренном или реальном времени систем дифференциальных и нелинейных алгебраических уравнений;
- 3) возможность передачи по соединениям скалярных и векторных переменных;
- 4) возможность выполнения группировки нескольких блоков в составной блок;
- 5) наличие в палитре блоков переключателей сигналов, регистров-защёлок, а также пользовательских функций, позволяющих менять структуру уравнений в процессе расчета.

Указанное ПО в связке с используемым аппаратным обеспечением образует единый программно-технический комплекс. В рамках АИС АЭ ТЭК за обработку информации и формирование управляющих воздействий (в том числе на основе предложенных в данной работе алгоритмов распределенного управления) отвечают программные модули, реализованные с использованием языка программирования *R* и среды визуального моделирования *VisSim*. Обмен информацией между сенсорными сетями, управляющими устройствами и модулями, реализующими алгоритмы управления, обеспечивает АСДУ ТЭК на базе ПТК «ПолиТЭР».

Сбор данных с беспроводных сенсорных сетей организован посредством разработанного программного пакета, написанного на языке программирования *PL/SQL* и интегрированного в ПТК «ПолиТЭР». Предложенные в работе алгоритмы распределенного управления реализованы с применением языка программирования *R* в виде программного модуля, интегрированного в ПТК «ПолиТЭР» с использованием технологии *ODBC*.

3.4. Методика и схема расстановки беспроводных датчиков температуры помещений и приемников радиосигнала

Для реализации системы сбора данных с использованием сенсорной сети в работе предложена методика расстановки датчиков температуры воздуха в помещениях зданий.

Для выбора помещений, в которых должны быть установлены датчики температуры воздуха, разработаны следующие правила:

1) выбор помещений для установки датчиков должен осуществляться не менее чем для 2 фасадов с наибольшим количеством смежных помещений.

2) для выбора помещений вертикальную проекцию здания необходимо разделить на квадратные сегменты. Если высота здания больше длины, то сторона квадрата должна быть равна длине здания. Если длина здания больше высоты, то

сторона квадрата должна быть равна высоте здания. Допускается выбор прямоугольников, соотношение сторон которых не превышает 1,5.

3) необходимо посчитать количество стояков при вертикальной разводке (лежаков – при горизонтальной). Датчики должны быть размещены в помещениях, расположенных в середине сторон, центре и углах квадратного сегмента здания. Далее необходимо выбрать не менее чем по 2 помещения в каждом квадратном сегменте здания, охватываемые каждым стояком при вертикальной разводке (лежаком – при горизонтальной). При выборе помещений по охвату стояков (лежаков) желательно охватить максимальное количество помещений по высоте (длине) здания. Также возможно равномерно исключать охватываемые стояки (лежаки) при выборе помещений путем их прореживания в случае нехватки датчиков или при охвате 2-мя и более стояками одного помещения на каждом этаже.

4) допускается смещение выбора помещения вдоль стояка (лежака), если установка датчика в помещении, выбранном на основании предыдущих правил, невозможна.

На рисунке 3.4 представлен пример типовой схемы выбора помещений для установки датчиков в секции фасада здания, построенной с использованием описанной методики. 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.

Расстановка датчиков выполняется в углах квадрата и в пересечениях осей. В качестве осей расстановки по одному из диагональных направлений выбирается главная диагональ и две дополнительных оси с концами в середине сторон квадрата. По второму диагональному направлению выбирается столько осей, сколько необходимо для расстановки минимум 2 датчиков, охватывающих каждый непрореженный стояк при вертикальной разводке (лежак – при горизонтальной).

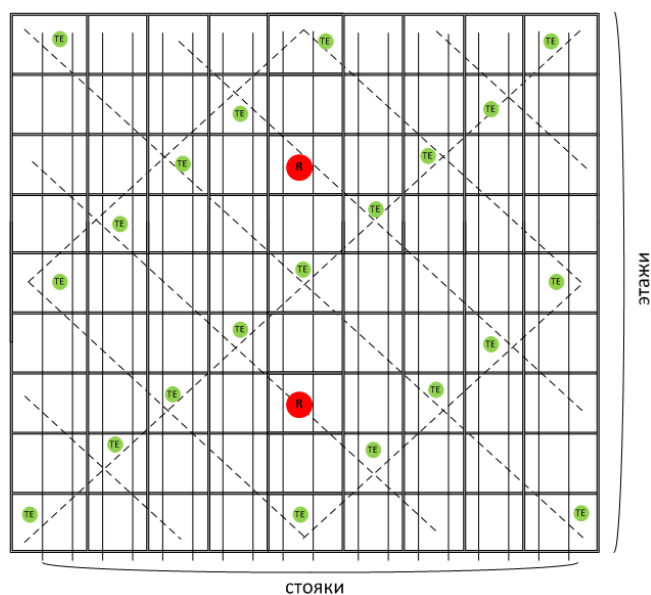


Рисунок 3.4 – Схема расстановки датчиков температуры помещений

Выбор помещений необходимо выполнять из числа помещений с постоянным пребыванием людей (в которых люди находятся не менее 2 ч непрерывно или 6 ч суммарно в течение суток). При этом в помещениях площадью более 100 м^2 измерение температуры следует проводить на равновеликих участках, площадь которых должна быть не более 100 м^2 [31].

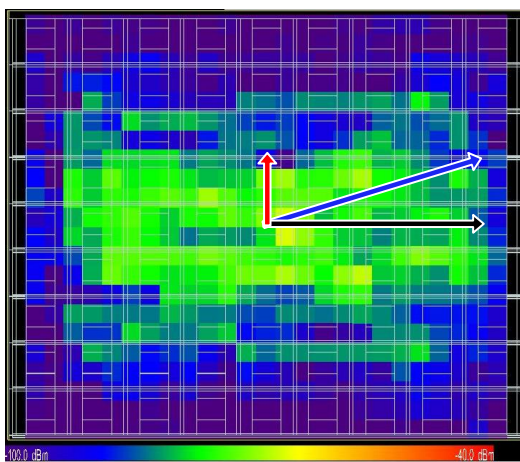
3.5. Использование беспроводных датчиков температуры помещений

Для проверки возможности применения предложенной схемы для расстановки беспроводных датчиков температуры в помещениях было выполнено моделирование прохождения сигнала через стены и перекрытия с целью выбора оптимальной схемы расстановки по критерию минимума количества приёмников радиосигнала при поддержании уровня сигнала, достаточного для организации стабильной передачи данных с учетом предложенной схемы расстановки.

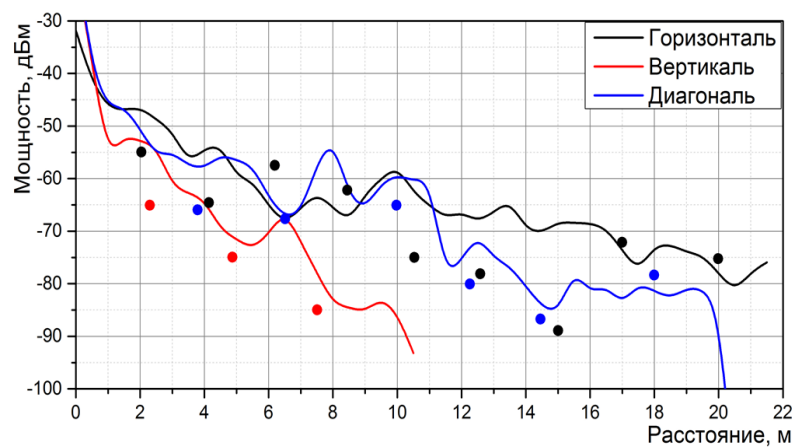
Для прогнозирования распространения радиосигнала была построена модель здания, состоящая из 9 этажей (на каждом этаже по 9 помещений). Помещение представляет собой квадрат $5 \text{ м} \times 5 \text{ м}$. Высота помещения $4,5 \text{ м}$. Каждое помещение оборудовано окном. Толщина несущих стен равна 40 см . Несущими стенами являются внешние стены здания. Толщина ненесущих стен – 20 см . Толщина перекрытий – 20 см . Материал стен и перекрытий – бетон с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 5.

Приемник сигнала располагается посередине 5 этажа здания. Передатчики и приёмники в модели оснащены полуволновыми диполями на частоту 868 МГц с коэффициентом усиления 2 дБи. К передатчику подведена мощность 12 дБи. Антенны приемников и передатчиков ориентированы вертикально.

Мощность сигнала измерялась в горизонтальной, вертикальной и диагональной плоскости, наклонённой на 30 градусов относительно горизонтальной плоскости. Диаграмма и графики расчетного распределения мощности радиосигнала в условном сегменте здания представлены на рисунке 3.5. Линиями на графике б) рисунка 3.5 представлено расчетное распределение мощности в зависимости от расстояния по горизонтали, вертикали и наибольшей диагонали распространения. Точками на графике б) рисунка 3.5 представлены фактические измерения уровня радиосигнала в зависимости от расстояния при прохождении сигнала через соответствующее модели количество стен в здании корпуса ЗБВ ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».



а) диаграмма распределения мощности радиосигнала



б) графики распределения мощности радиосигнала

Рисунок 3.5 – 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 3.4).

С помощью предложенной методики была произведена расстановка датчиков в семи зданиях ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». В таблице 3.1 для трех приемников, установленных на 7 этаже корпуса 3БВ, и датчиков температуры воздуха, расположенных в помещениях с 4-го по 10-ый этаж, представлены параметры, характеризующие качество сбора данных с использованием сенсорной сети: средний уровень сигнала (дБм) и среднее количество принятых показаний за интервал усреднения данных (15 минут).

Таблица 3.1 – Показатели качества сбора данных с использованием сенсорной сети

Помещение	Средний уровень сигнала, дБм	Среднее кол-во принятых показаний за 15 мин.	Помещение	Средний уровень сигнала, дБм	Среднее кол-во принятых показаний за 15 мин.
04 этаж, ауд. 0425	-88,2	15,0	07 этаж, ауд. 0714	-71,8	15,0
04 этаж, ауд. 0431	-96,1	15,0	07 этаж, ауд. 0716	-71,6	15,0
04 этаж, ауд. 0434 верх	-73,6	15,0	07 этаж, ауд. 0720а	-61,8	14,9
04 этаж, ауд. 0434 низ	-80,3	15,0	07 этаж, ауд. 0720б	-41,0	15,0
04 этаж, ауд. 0435а	-88,3	15,0	07 этаж, запас. лест.	-84,1	15,0
04 этаж, ауд. 0438	-94,2	15,0	07 этаж, коридор 1	-45,0	15,0
04 этаж, ауд. 0448	-92,5	15,0	07 этаж, коридор 2	-45,4	14,9
04 этаж, ауд. 0452	-95,4	14,8	07 этаж, холл	-63,1	15,0
04 этаж, коридор 1	-75,2	15,0	07 этаж, муж. т.	-64,3	15,0
04 этаж, коридор 2	-90,5	15,0	08 этаж, ауд. 0801	-81,1	15,0
04 этаж, холл	-75,0	15,0	08 этаж, ауд. 0802	-76,9	15,0
05 этаж, ауд. 0500	-81,0	15,0	08 этаж, ауд. 0804	-58,8	15,0
05 этаж, ауд. 0534	-67,5	15,0	08 этаж, ауд. 0807а	-73,3	15,0
05 этаж, ауд. 0539	-85,7	15,0	08 этаж, ауд. 0808	-67,4	15,0
05 этаж, ауд. 0540	-93,7	14,9	09 этаж, ауд. 0901	-93,0	15,0
05 этаж, ауд. 0546	-78,7	15,0	09 этаж, ауд. 0902	-75,1	15,0
05 этаж, ауд. 0548	-88,6	15,0	09 этаж, ауд. 0908	-67,8	15,0
05 этаж, глав. лест.	-91,6	15,0	09 этаж, ауд. 0911	-86,3	15,0
05 этаж, жен. т.	-84,2	15,0	09 этаж, ауд. 0912	-88,6	14,9
06 этаж, ауд. 0621	-54,7	15,0	09 этаж, ауд. 0914	-72,7	15,0
06 этаж, ауд. 0625	-70,2	15,0	09 этаж, ауд. 0917	-80,3	15,0
06 этаж, ауд. 0632 верх	-75,6	15,0	09 этаж, ауд. 1001 лев	-93,4	15,0
06 этаж, ауд. 0632 низ	-52,4	14,9	09 этаж, ауд. 1001 прав	-90,5	15,0
06 этаж, ауд. 0638	-69,7	15,0	10 этаж, ауд. 1002,	-94,3	15,0
06 этаж, ауд. 0644	-75,4	15,0	10 этаж, ауд. 1005	-83,6	15,0
07 этаж, ауд. 0701	-47,2	15,0	10 этаж, ауд. 1008	-90,9	11,2
07 этаж, ауд. 0707а	-63,0	15,0	10 этаж, ауд. 1013	-90,6	14,8
07 этаж, ауд. 0708	-64,7	15,0	10 этаж, ауд. 1014	-81,9	15,0
07 этаж, ауд. 0711	-58,1	15,0	10 этаж, ауд. 1016	-96,8	10,4
07 этаж, ауд. 0712а	-54,5	15,0	Чердак 1	-96,8	15,0
07 этаж, ауд. 0712б	-51,1	15,0	Чердак 2	-89,0	15,0

Чувствительность приемника составляет -108 дБм. Уровень сигнала, достаточный для уверенного приема данных используемыми в работе приемниками радиосигнала, должен составлять в среднем не менее -95...-100 дБм. Частота передачи данных датчиками – 1 раз в минуту. Архивация данных осуществляется по 15 показаниям (1 раз в 15 минут).

Как видно из таблицы 3.1, уровень сигнала не выходит за границу -100 дБм ни в одном помещении. Поскольку одна архивная запись рассчитывается на основании не менее чем по 10 показаниям из 15 возможных, можно считать, что данные поступают в архив базы данных автоматизированной системы в требуемом объеме.

Полученные результаты подтверждают корректность предложенной схемы расстановки температурных датчиков и приемников радиосигнала, что позволяет использовать данную схему при проектировании и развертывании беспроводных сенсорных сетей в зданиях.

Выводы к главе 3

1. Предложена общая схема АСУ теплоэнергетическим комплексом на базе сенсорных сетей, описана структура и функции её основных подсистем. Предложенная структурная схема АСУ включает себя подсистемы, необходимые для реализации всего комплекса управляющих воздействий, включающих оперативное управление и организационно-технические мероприятия, предполагаемые при использовании предложенного алгоритма управления по критерию максимума помещений с выполненными температурными условиями.

2. Рассмотрено техническое и программное обеспечение, используемое для реализации компонентов предложенной структуры АСУ теплоэнергетическим комплексом. Техническое обеспечение включает в себя клиентское и серверное аппаратное обеспечение АСУ, автоматизированные устройства управления генерацией и потреблением тепловой энергии и сенсорные сети, измеряющие различные количественные и качественные параметры теплоснабжения. Для передачи данных используются проводные и беспроводные ЛВС. Программное

обеспечение АСУ построено на базе ПТК «ПолиТЭР», взаимодействующего со средой статистического программирования *R*, используемой для решения оптимизационных задач в рамках предложенного алгоритма распределённого управления, и средой визуального моделирования *VisSim*, применяемой для имитационного макро моделирования централизованной системы теплоснабжения.

3. Предложена методика размещения беспроводных датчиков температуры в помещениях здания и приемников радиосигнала на основе моделирования и экспериментальных исследований распространения радиосигнала внутри здания. Применение методики позволяет равномерно расположить минимальное количество датчиков, достаточное для обеспечения представительного контроля теплового режима здания при реализации предложенного алгоритма распределенного управления в рамках автоматизированной системы управления отоплением.

ГЛАВА 4. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ НА ПРИМЕРЕ УНИВЕРСИТЕТСКОГО ГОРОДКА ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

4.1. Характеристики объекта управления

Теплоснабжение потребителей на территории ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» осуществляется:

- 1) от тепловой сети г. Челябинска по температурному графику 130/70 °С;
- 2) от двух собственных когенерационных установок: газопоршневой станции (энергоцентр №1) и газотурбинной станции (энергоцентр №2);
- 3) от собственной газовой котельной по температурному графику 105/70 °С.

Тепловая энергия из городской тепловой сети поступает на центральный тепловой пункт (ЦТП) и на насосную станцию №2. К ЦТП и энергоцентру №1 присоединены системы отопления, ГВС и вентиляции 36 объектов. К насосной №2, энергоцентру №2 и газовой отопительной присоединены системы отопления, ГВС и вентиляции 10 объектов. Суммарное годовое потребление тепловой энергии на вентиляцию, отопление и ГВС составляет 45000 Гкал.

Также к тепловой сети города Челябинска присоединены 8 зданий филиалов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» с суммарным годовым потреблением тепловой энергии 2000 Гкал.

Стоит отметить наличие на 16 объектах АИТП, с помощью которых возможно в автоматическом режиме регулировать потребление тепловой энергии зданиями.

Наряду с различными источниками тепловой энергии к тепловой сети университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» подключены различные типы потребителей большой и малой мощности с различными режимами работы и схемами присоединения. Реализация различных теплогидравлических режимов в собственной тепловой сети, включающей системы и средства группового регулирования теплоснабжения зданий, позволяет в некоторых случаях не

применять на стороне потребителей АИТП и дает возможность не устанавливать дополнительных насосов, повышающих давление для преодоления гидростатического и гидродинамического сопротивления зданий.

В случае применения АИТП в зданиях университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» применяются зависимые и независимые схемы присоединения зданий к тепловой сети. В зависимых схемах в качестве исполнительных устройств применяются двухходовые и трехходовые клапаны, циркуляционные насосы устанавливаются как в подающем, так и в обратном трубопроводе.

Схема системы теплоснабжения университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» представлена на рисунке 4.1.

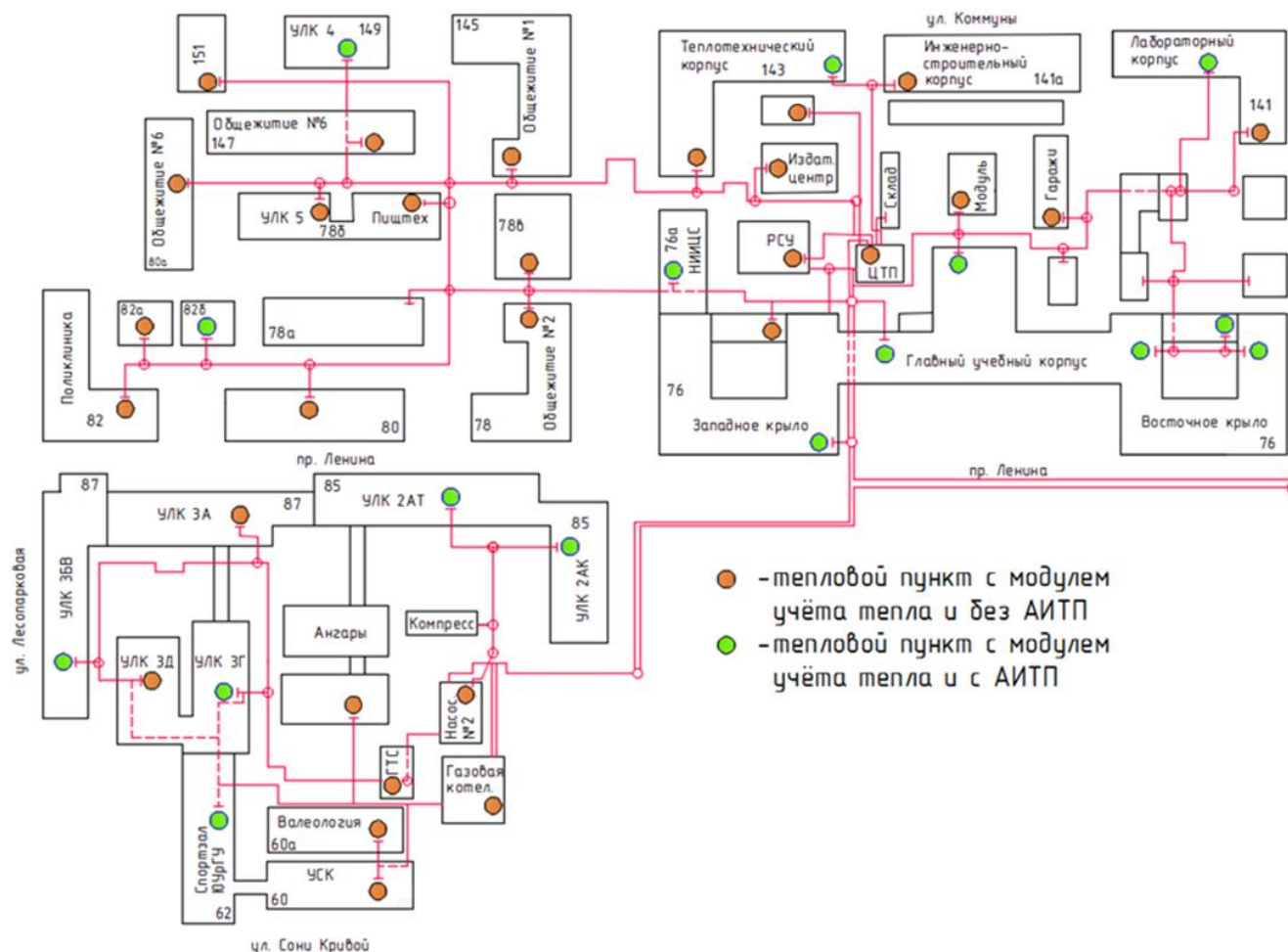


Рисунок 4.1 – Схема системы теплоснабжения университетского городка

4.2. Автоматизированная управляющая информационно-измерительная система теплоснабжения университетского городка на базе сенсорных сетей

В данном разделе представлены видеокadres основных видов пользовательских мнемосхем, инструментов построения, журналов событий, графиков и отчетов автоматизированной управляющей информационно-измерительной системы теплоснабжения университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», реализованной на основе ПТК «ПолиТЭР».

Видеокадр общей мнемосхемы контроля параметров теплоснабжения (на примере мнемосхемы контроля потребления тепловой энергии) представлен на рисунке 4.2. Мнемосхема контроля параметров ЦТП (на примере мнемосхемы ЦТП №1) представлена на рисунке 4.3. Мнемосхема контроля параметров АИТП (на примере мнемосхемы АИТП дворца спорта) представлена на рисунке 4.4.

Для контроля параметров энергоснабжения в системе помимо мнемосхем используются журналы событий, которые позволяют фиксировать время возникновения различных аварий и отклонений от энергоэффективных режимов эксплуатации (рисунок 4.5).

Архивы параметров потребления могут быть представлены различными графиками в виде зависимостей параметров (рисунок 4.6) и временных трендов (рисунок 4.7).

Генератор отчетов позволяет вывести архивные данные в той форме отчетности, которая принята в ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» для предоставления отчетности по потреблению тепловой энергии для узлов коммерческого учета (рисунок 4.8).

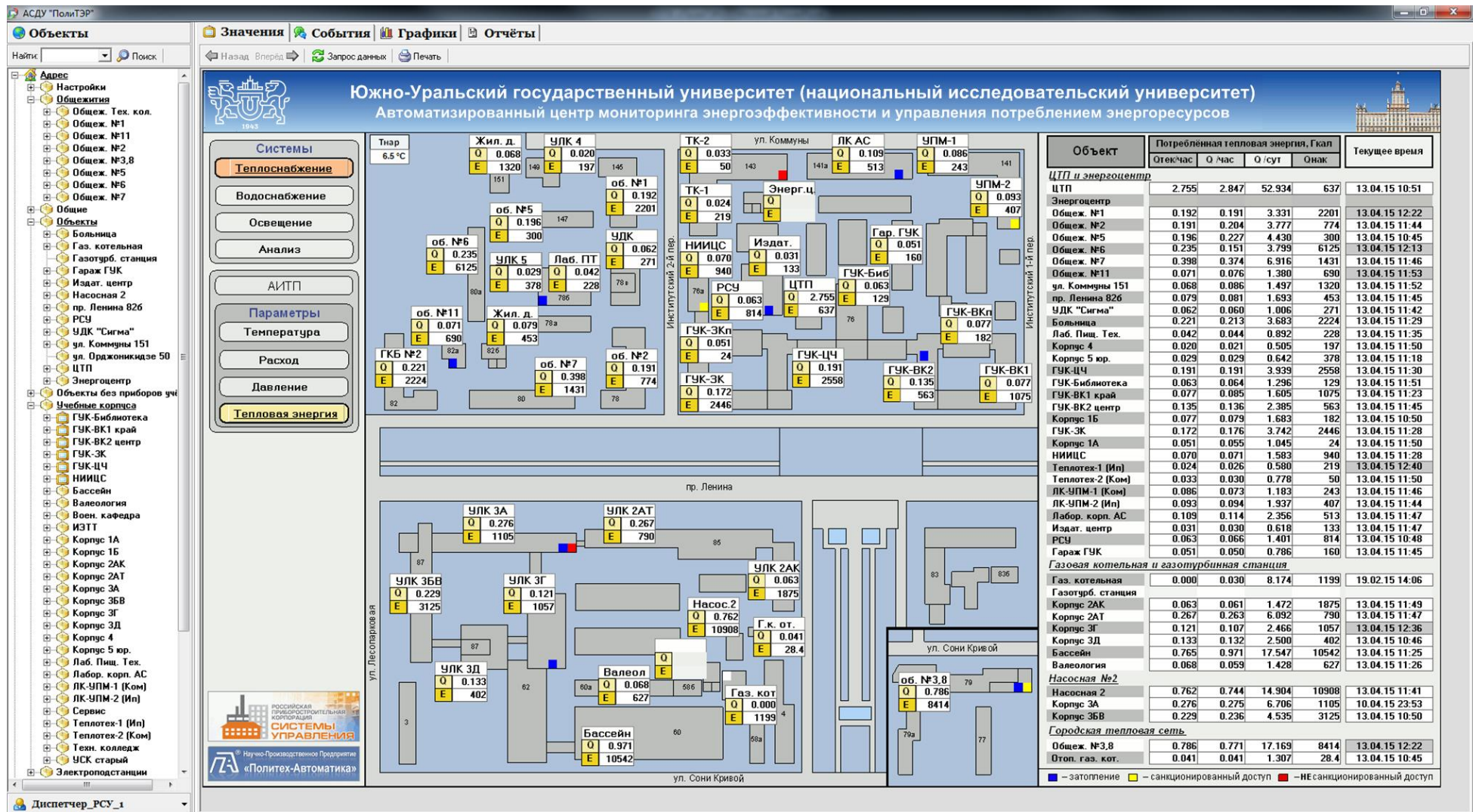


Рисунок 4.2 – Видеокадр общей мнемосхемы контроля параметров теплоснабжения

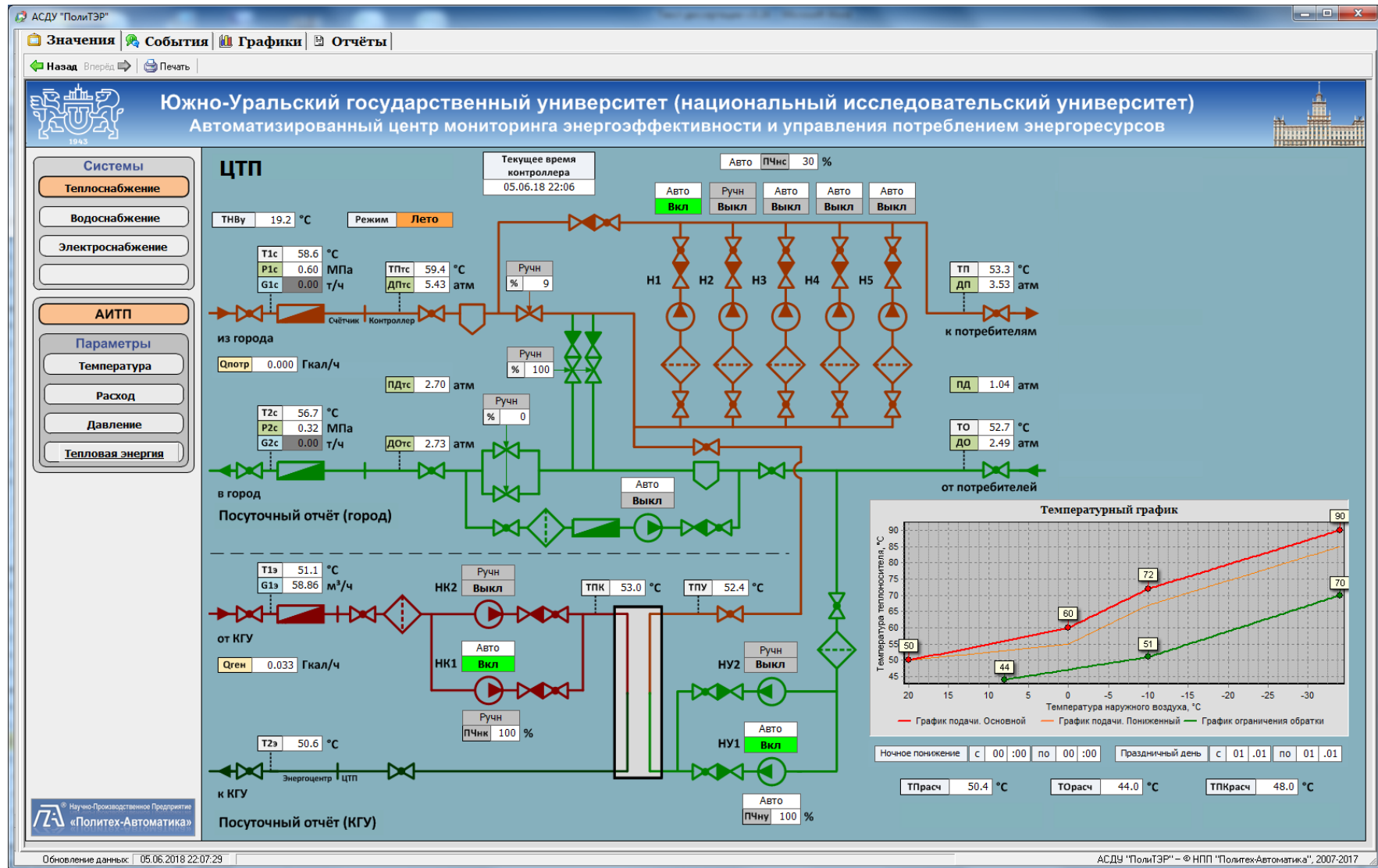


Рисунок 4.3 – Видеокадр мнемосхемы контроля и управления параметрами центрального теплового пункта

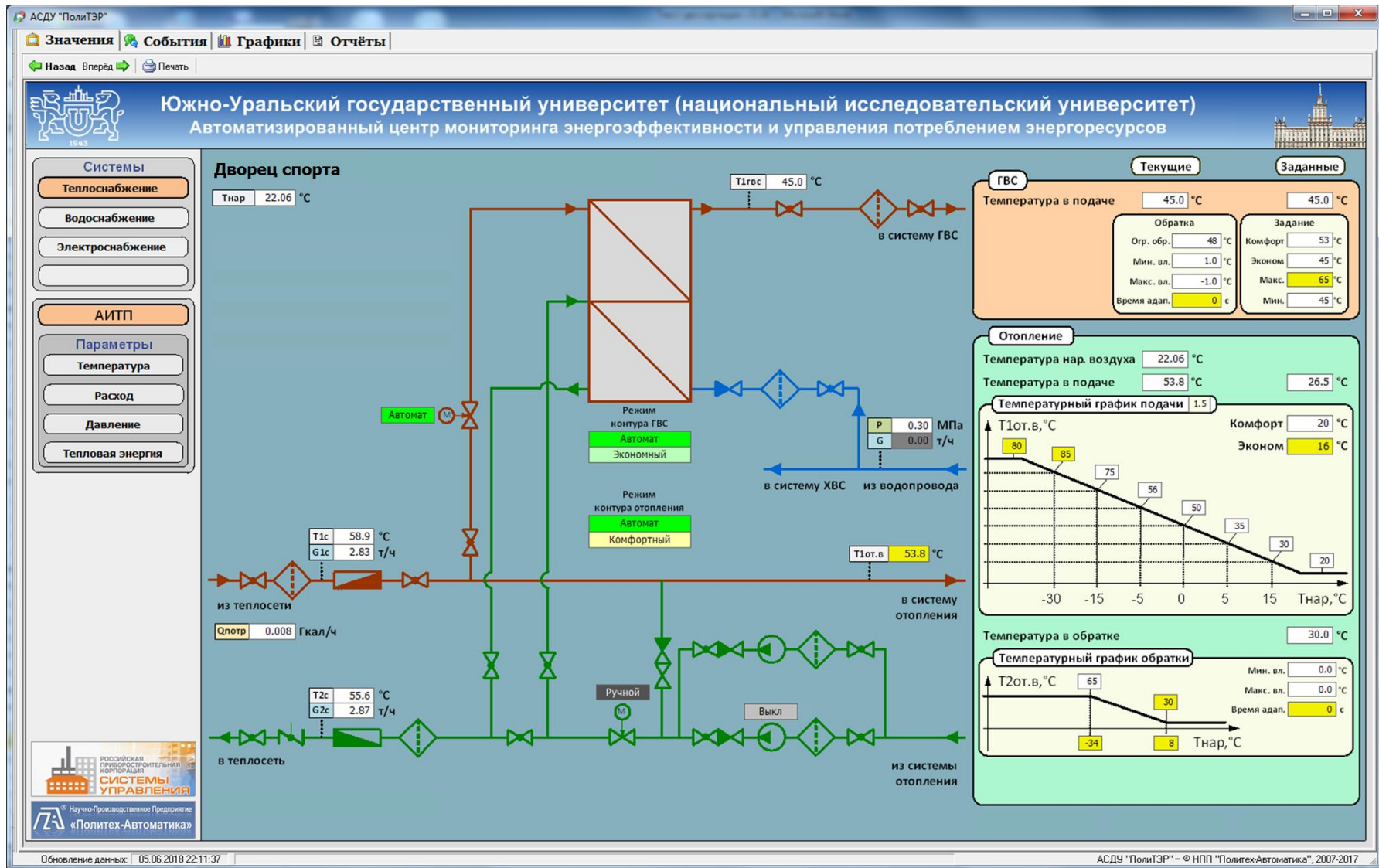


Рисунок 4.4 – Видеокادر мнемосхемы контроля и управления параметрами автоматизированного индивидуального теплового пункта

АСДУ "ПолиТЭР"

Объекты

Найти: Поиск

Значения События Графики Отчёты

Показывать не более 200 событий за последние 10 дней для выбранного объекта только критические. Показать события Автообновление

Дата - Время	Объект	Параметр	Событие	Значение	Пользов
13.04.15 - 15:11:38	Корпус 1А, ГУК-Зкл, Водоснабжение	Расход (тек)	В норме	0.12 т/ч	
13.04.15 - 15:11:24	ЛК-УПМ-1 (Ком), УПМ-1, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	В норме	0.12 т/ч	
13.04.15 - 15:11:17	ГУК-Библиотека, Теплоснабжение, Управление, Состояние, ГВС, Авария	Насос циркуляции ГВС (P1)	Норма		
13.04.15 - 15:10:34	УСК старый, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	В норме	0.12 т/ч	
13.04.15 - 15:10:22	Корпус 3Г, УЛК 3Г, Отопление, Анализ, Расход	Относительная разность расходов	В норме	18.4 %	
13.04.15 - 15:10:22	Корпус 3Г, УЛК 3Г, Отопление, Анализ, Расход	Расход (пр)[тек]	В норме	4.43 т/ч	
13.04.15 - 15:07:30	Теплотех-2 (Ком), ТК-2, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	В норме	0.24 т/ч	
13.04.15 - 15:06:38	Корпус 1А, ГУК-Зкл, Водоснабжение	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 15:05:24	УСК старый, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 15:03:43	НИИЦС, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	В норме	0.36 т/ч	
13.04.15 - 15:01:23	ЛК-УПМ-1 (Ком), УПМ-1, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 15:00:23	УСК старый, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	В норме	0.12 т/ч	
13.04.15 - 14:58:43	НИИЦС, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 14:56:38	Корпус 1А, ГУК-Зкл, Водоснабжение	Расход (тек)	В норме	0.12 т/ч	
13.04.15 - 14:56:12	ЛК-УПМ-1 (Ком), УПМ-1, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	В норме	0.12 т/ч	
13.04.15 - 14:52:27	Теплотех-2 (Ком), ТК-2, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 14:52:14	ГУК-Библиотека, Теплоснабжение, Управление, Состояние, ГВС, Авария	Насос циркуляции ГВС (P1)	Авария насоса циркуляции ГВС (P1)	1	
13.04.15 - 14:51:38	Корпус 1А, ГУК-Зкл, Водоснабжение	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 14:51:14	ГУК-Библиотека, Теплоснабжение, Управление, Состояние, ГВС, Авария	Насос циркуляции ГВС (P1)	Норма		
13.04.15 - 14:47:26	Теплотех-2 (Ком), ТК-2, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	В норме	0.12 т/ч	
13.04.15 - 14:46:38	Корпус 1А, ГУК-Зкл, Водоснабжение	Расход (тек)	В норме	0.12 т/ч	
13.04.15 - 14:46:11	УСК старый, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 14:46:10	ЛК-УПМ-1 (Ком), УПМ-1, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 14:43:43	НИИЦС, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	В норме	0.24 т/ч	
13.04.15 - 14:43:08	ЛК-УПМ-1 (Ком), УПМ-1, Теплоснабжение, Управление, Состояние, ГВС, Авария	Насос циркуляции ГВС (P1)	Авария насоса циркуляции ГВС (P1)	1	
13.04.15 - 14:41:38	Корпус 1А, ГУК-Зкл, Водоснабжение	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 14:41:10	УСК старый, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	В норме	0.12 т/ч	
13.04.15 - 14:41:01	ЛК-УПМ-1 (Ком), УПМ-1, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	В норме	0.12 т/ч	
13.04.15 - 14:39:20	Лаб. Пищ. Тех., Лаб. ПТ, Теплоснабжение, Давление	Давление (обр)[тек]	В норме	0.11 МПа	
13.04.15 - 14:38:43	НИИЦС, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 14:37:24	Теплотех-2 (Ком), ТК-2, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 14:36:10	УСК старый, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 14:35:57	Корпус 3Г, УЛК 3Г, Отопление, Анализ, Расход	Расход (пр)[тек]	Выше в подаче (звечка или погрешность расходомера)	5.77 т/ч	
13.04.15 - 14:35:57	Корпус 3Г, УЛК 3Г, Отопление, Анализ, Расход	Относительная разность расходов	Выше в подаче (звечка или погрешность расходомера)	-8.7 %	
13.04.15 - 14:32:12	ГУК-Библиотека, Теплоснабжение, Управление, Состояние, ГВС, Авария	Насос циркуляции ГВС (P1)	Авария насоса циркуляции ГВС (P1)	1	
13.04.15 - 14:31:37	Корпус 1А, ГУК-Зкл, Водоснабжение	Расход (тек)	В норме	0.12 т/ч	
13.04.15 - 14:31:12	ГУК-Библиотека, Теплоснабжение, Управление, Состояние, ГВС, Авария	Насос циркуляции ГВС (P1)	Норма		
13.04.15 - 14:30:59	УСК старый, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	В норме	0.12 т/ч	
13.04.15 - 14:26:37	Корпус 1А, ГУК-Зкл, Водоснабжение	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 14:26:12	Лаб. Пищ. Тех., Лаб. ПТ, Теплоснабжение, Давление	Давление (обр)[тек]	Ниже нормы	0.08 МПа	
13.04.15 - 14:25:58	ЛК-УПМ-1 (Ком), УПМ-1, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 14:25:58	УСК старый, Водоснабжение, Анализ, Расход	Расход (тек)	Нет расхода	0.00 т/ч	
13.04.15 - 14:25:12	Лаб. Пищ. Тех., Лаб. ПТ, Теплоснабжение, Давление	Давление (обр)[тек]	В норме	0.10 МПа	
13.04.15 - 14:21:37	Корпус 1А, ГУК-Зкл, Водоснабжение	Расход (тек)	В норме	0.12 т/ч	

Диспетчер_PCV_1

Рисунок 4.5 – Видеокадр журнала событий

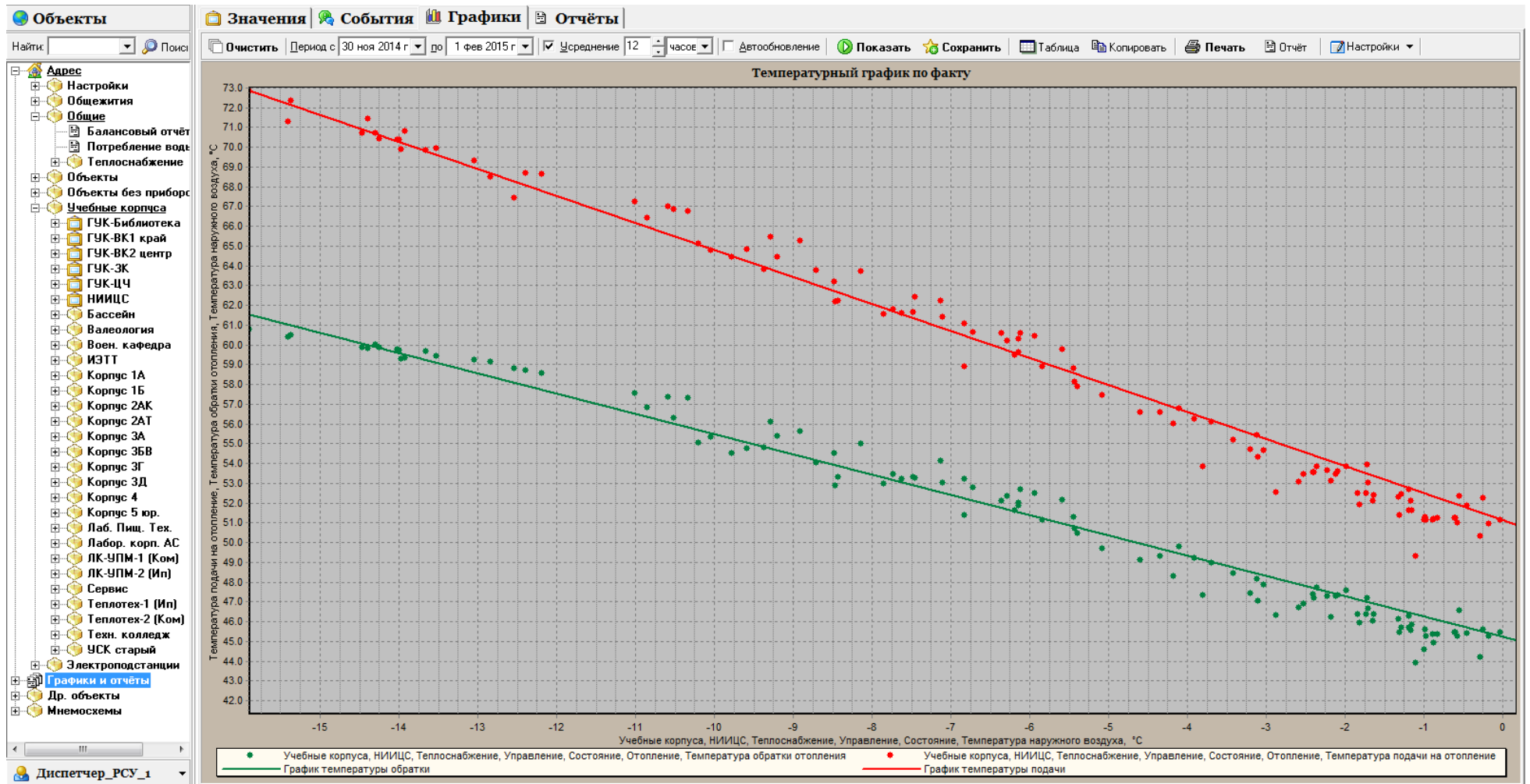


Рисунок 4.6 – Примеры построения графиков по архивам аналоговых параметров

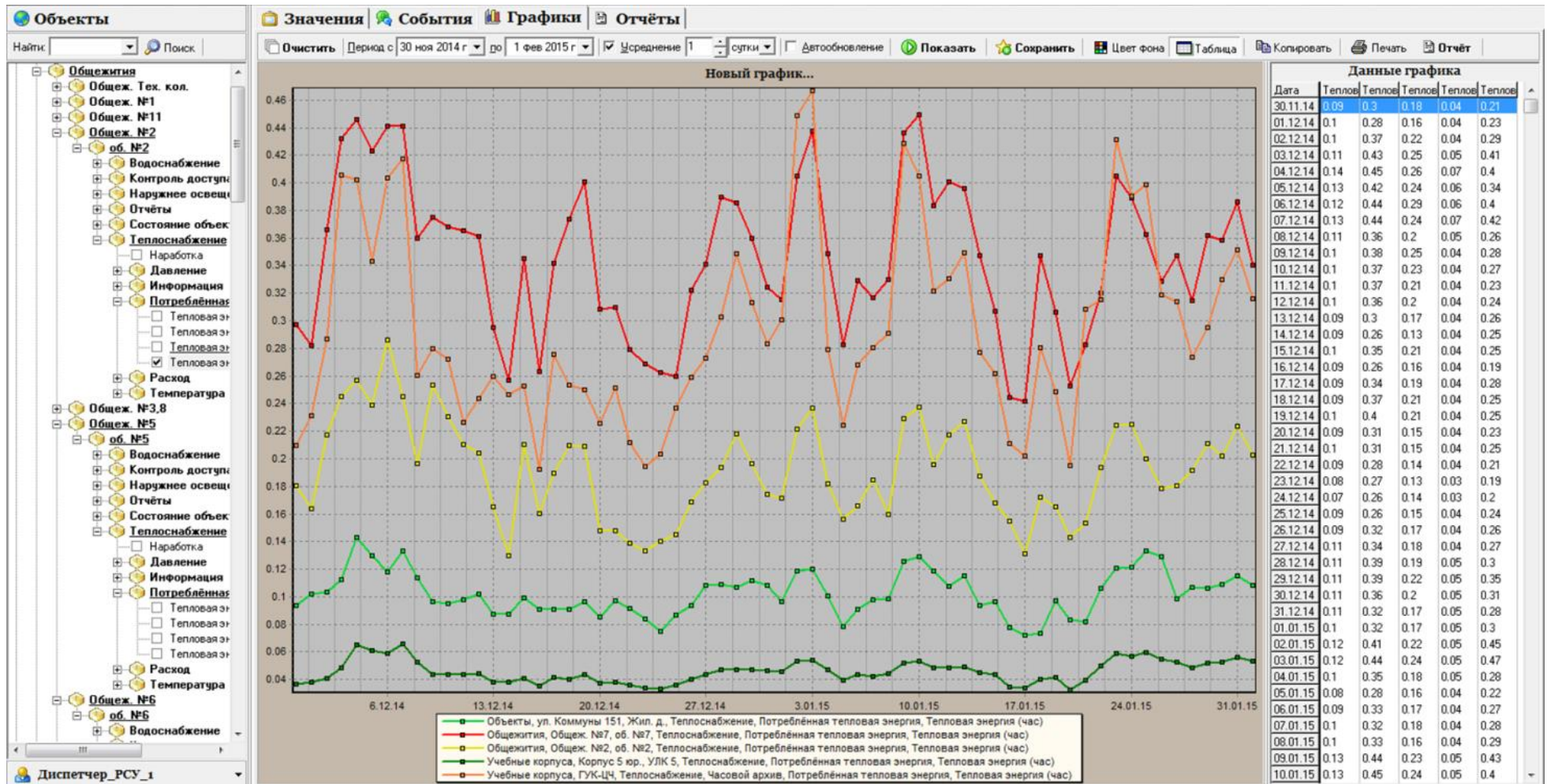


Рисунок 4.7 – Примеры построения графиков по архивам аналоговых параметров

АСДУ "ПолиТЭР"

Объекты

Найти: Поиск

Значения События Графики Отчёты

Период с 1 янв 2015 г до 1 фев 2015 г Показать Стр. 1 из 1 Печать Сохранить Открыть

Отчет о потреблении тепловой энергии
за **Январь/Февраль 2015г**
НИИЦ

Потребитель: ЮУрГУ
Договор Т-165
Адрес: пр.Ленина,76а

Дата	Время наработки час	Темпер-ра подачи, С	Темпер-ра обратки, С	Подача		Обратка		Кол-во тепла, Q, Гкал
				Расход воды м,т/час	Кол-во воды М,т	Расход воды м,т/час	Кол-во воды М,т	
02	13185	78.1	60.2	8.19	46355	8.26	46711	700.40
03	13209	84.1	63.7	7.80	46542	7.87	46900	704.10
04	13233	82.2	62.0	7.27	46716	7.35	47077	707.52
05	13257	68.7	51.6	5.77	46855	5.86	47218	709.77
06	13281	67.5	50.8	5.63	46990	5.72	47355	711.93
07	13305	68.5	51.4	5.74	47128	5.82	47494	714.19
08	13329	69.4	52.2	5.99	47272	6.05	47640	716.59
09	13353	76.5	58.9	8.53	47476	8.60	47846	720.08
10	13377	82.5	62.3	7.55	47657	7.62	48029	723.64
11	13401	81.7	61.2	7.12	47828	7.19	48202	727.03
12	13425	75.6	56.2	6.52	47985	6.59	48360	729.97
13	13449	76.6	58.3	7.84	48173	7.90	48549	733.33
14	13473	73.2	54.8	6.20	48322	6.25	48699	735.99
15	13497	70.6	52.7	5.77	48460	5.83	48839	738.40
16	13521	65.2	49.4	5.68	48597	5.74	48977	740.49
17	13545	61.7	48.1	6.44	48751	6.51	49133	742.50
18	13569	62.1	48.7	6.56	48909	6.63	49292	744.53
19	13593	69.5	52.6	6.02	49053	6.08	49438	746.90
20	13617	66.3	50.0	5.59	49187	5.65	49574	749.02
21	13641	63.5	49.4	6.79	49351	6.87	49739	751.22
22	13665	74.1	56.4	7.29	49526	7.35	49915	754.13
23	13689	76.7	58.3	7.38	49703	7.43	50093	757.32
24	13713	83.5	62.7	7.52	49883	7.56	50275	760.99
25	13737	82.3	62.1	7.72	50068	7.78	50462	764.62
26	13761	82.3	62.1	7.48	50248	7.55	50643	768.15
27	13785	77.0	57.7	6.75	50410	6.83	50807	771.16
28	13809	74.8	55.7	6.37	50563	6.45	50962	773.98
29	13833	74.8	55.4	6.02	50707	6.08	51106	776.70
30	13857	76.6	57.0	6.41	50861	6.47	51263	779.64
31	13881	77.7	57.9	6.72	51022	6.77	51426	782.74
01	13905	79.4	58.7	6.45	51177	6.51	51582	785.87
02	13929	78.7	57.6	6.16	51325	6.21	51731	788.91
Итого	744				4971		5019	88.51

Проректора по АХР _____
 Главный инженер _____
 Главный механик _____
 Инспектор ЧТС _____
 Составила _____

Расчет по потребителям:

Всего	88.51 Гкал
Учебные корпуса	88.51 Гкал
Общжития	0.00 Гкал
Арендаторы	0.00 Гкал

Дата составления: 13.04.2015г.

Диспетчер_PCU_1

Рисунок 4.8 – Видеокادر суточного отчёта для одного из узлов учёта

Для проверки предложенных в работе алгоритмов распределенного управления с использованием методики моделирования, описанной в разделе 2.4.5, в среде имитационного моделирования *VisSim* разработана имитационная макро модель системы теплоснабжения университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», которая содержит:

1) 46 потребителей (в том числе потребители без узлов учета с проектными параметрами тепловой нагрузки) с различными схемами подключения: без АИТП с балансировочным клапаном и с возможностью ручного регулирования расхода посредством двухходового клапана, с АИТП с регулированием с помощью двухходового или трехходового клапана по температуре подаваемого или возвращаемого теплоносителя или по средней температуре помещений;

2) 5 источников тепловой энергии: газотурбинная станция, газопоршневая станция, газовая котельная, городская тепловая сеть (2 узла подключения);

3) 80 соединительных трубопроводов различной длины и диаметра;

4) 45 блоков слияния и деления потоков.

Идентификация параметров модели была произведена на основании данных приборов учета тепловой энергии в зданиях, температурных сенсорных сетей и энергоаудита.

Видеокадр имитационной макро модели системы теплоснабжения северной части университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» с 2 источниками (центральными тепловым пунктом и газопоршневой станцией) и 36 потребителями приведен на рисунке 4.9. Видеокадр имитационной макро модели системы теплоснабжения южной части университетского городка с 3 источниками (городскими тепловыми сетями, газовой котельной и газотурбинной станцией) и 10 потребителями представлен на рисунке 4.10.

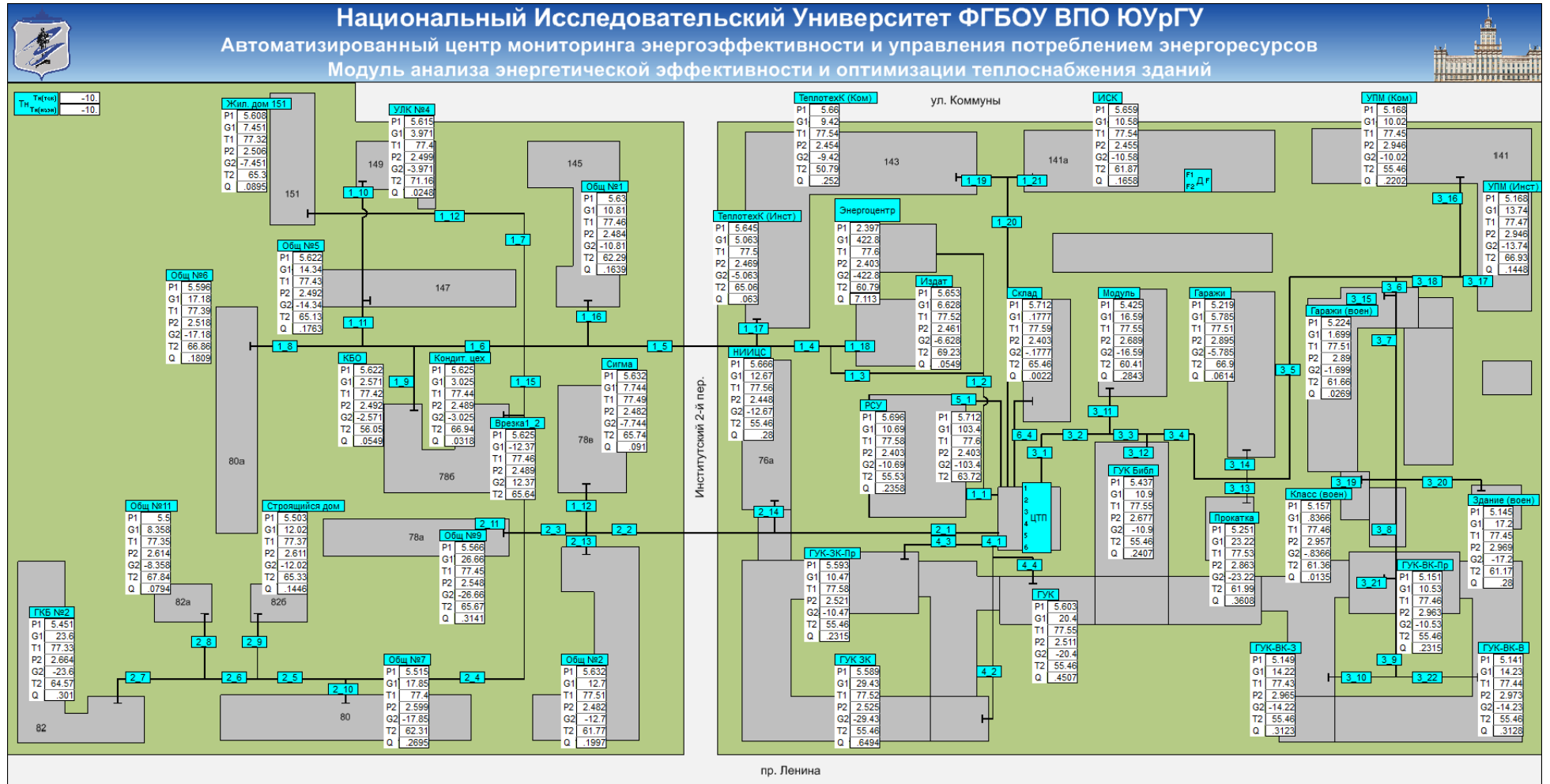


Рисунок 4.9 – Видеокادر имитационной макромоделли теплоснабжения комплекса северной части университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

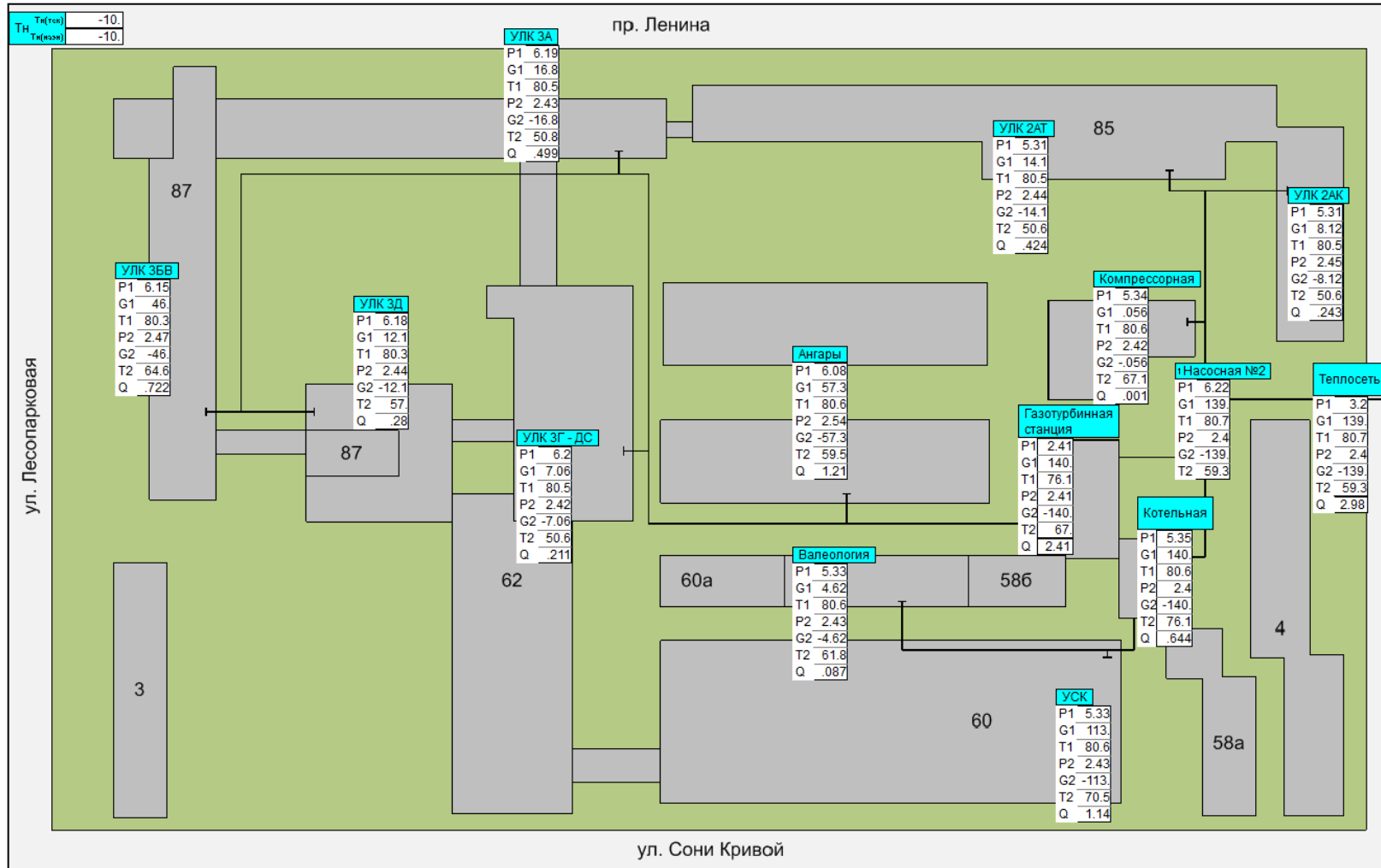


Рисунок 4.10 – Видеокادر имитационной макромодели теплоэнергетического комплекса южной части университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

4.3. Экспериментальные исследования применения алгоритмов распределенного управления

4.3.1. Расстановка датчиков температуры воздуха в помещениях

Беспроводная сенсорная сеть развернута для зданий южной части системы теплоснабжения ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» и включает в себя беспроводные датчики температуры воздуха в помещениях зданий (250 шт.) и обратного теплоносителя на стояках систем отопления (64 шт.).

Рассмотрим применение предложенной схемы расстановки датчиков температуры воздуха на примере корпуса ЗБВ. Фактическая реализация описанной выше схемы расстановки датчиков представлена на рисунках 4.11 - 4.13. Сплошными линиями обозначены линии сетки расстановки датчиков. Сплошной стрелкой обозначена принадлежность датчика пересечениям линий сетки или углам квадрата по предложенной схеме расстановки. Пунктирной стрелкой обозначено смещение датчиков вдоль стояков, когда датчик по организационным или техническим причинам невозможно было установить в помещении, согласно предложенной схеме расстановки.

Дополнительно к датчикам температуры воздуха в рабочих аудиториях и помещениях для тестирования были выбраны несколько секций коридоров и лестниц. На рисунке 4.14 представлен фрагмент архива данных с интервалом усреднения 15 минут, считанных с датчиков температуры помещений центральной секции западного фасада. Период передачи данных с датчиков температуры составляет 1 минуту.

Датчики температуры обратного теплоносителя были установлены в корпусе ЗБВ на выходах со всех стояков, а также на выходе лежачков, подключенных к общему обратному трубопроводу здания и объединяющих группы стояков. На рисунке 4.15 в качестве примера представлен фрагмент архива данных с интервалом усреднения 15 минут, считанных с датчиков температуры обратного теплоносителя центральной секции западного фасада.

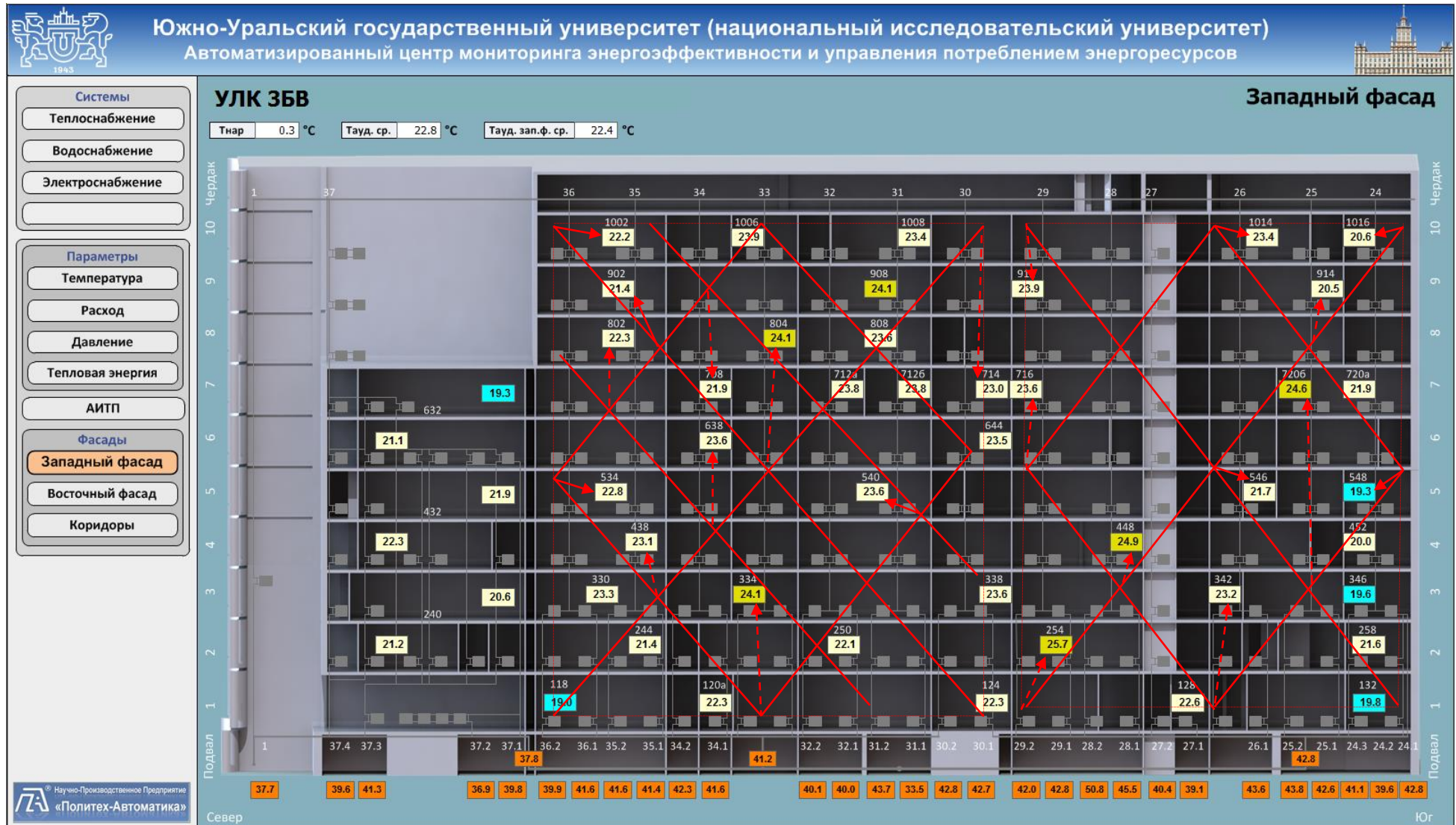


Рисунок 4.11 – Расстановка датчиков температуры в помещениях западного фасада корпуса 3БВ

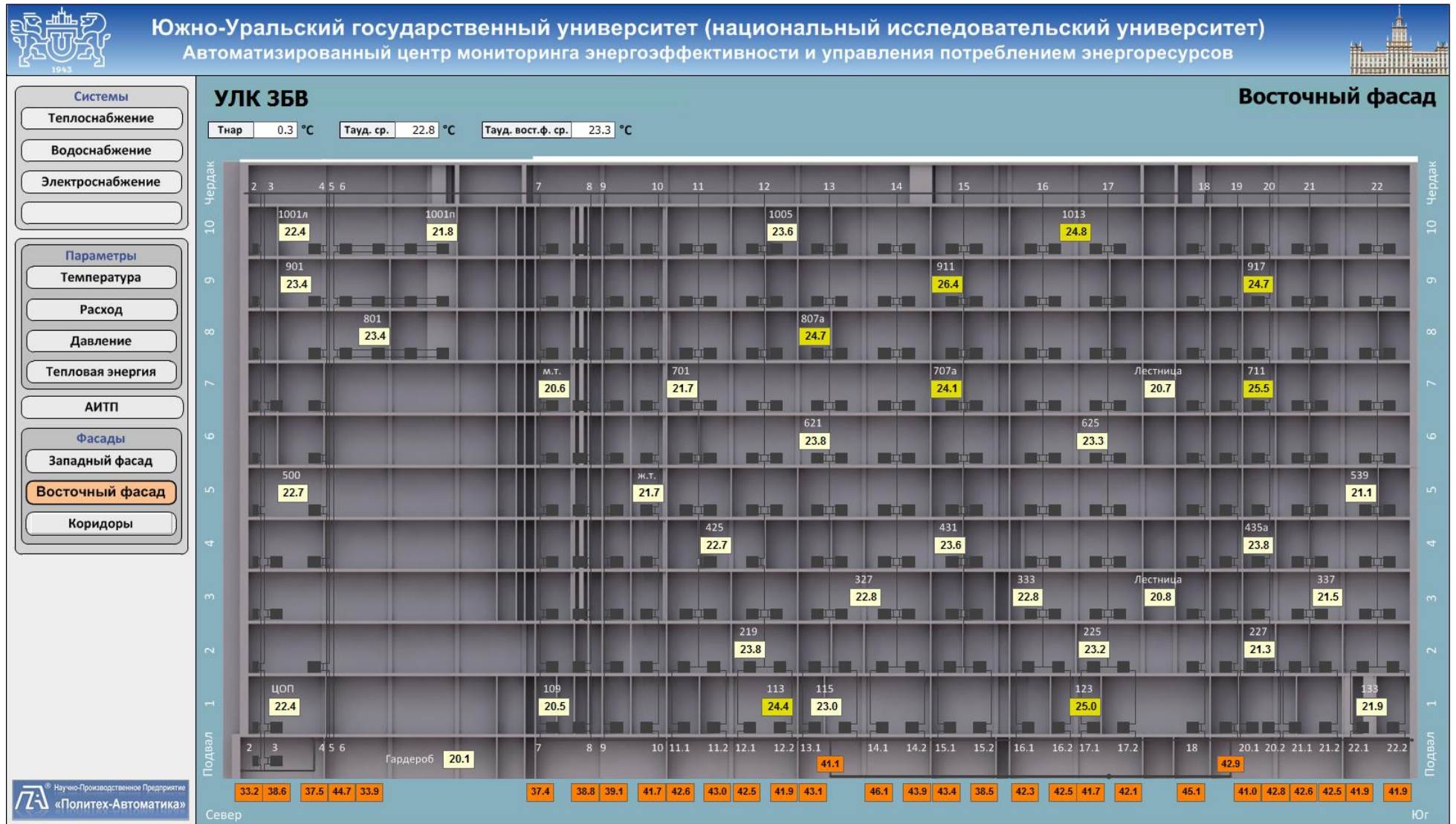


Рисунок 4.12 – Расстановка датчиков температуры в помещениях восточного фасада корпуса 3БВ

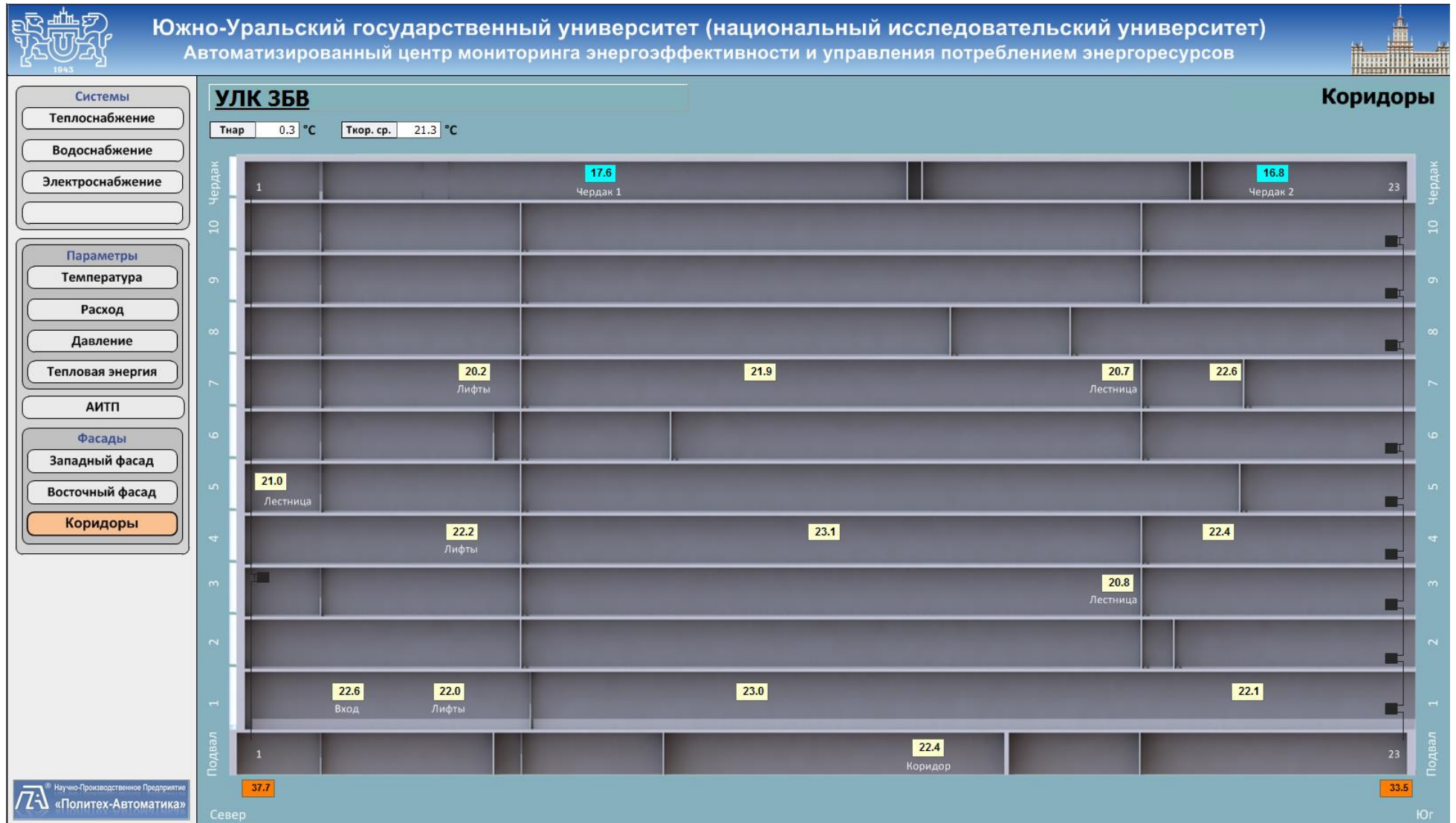


Рисунок 4.13 – Расстановка датчиков температуры в коридорах корпуса 3БВ

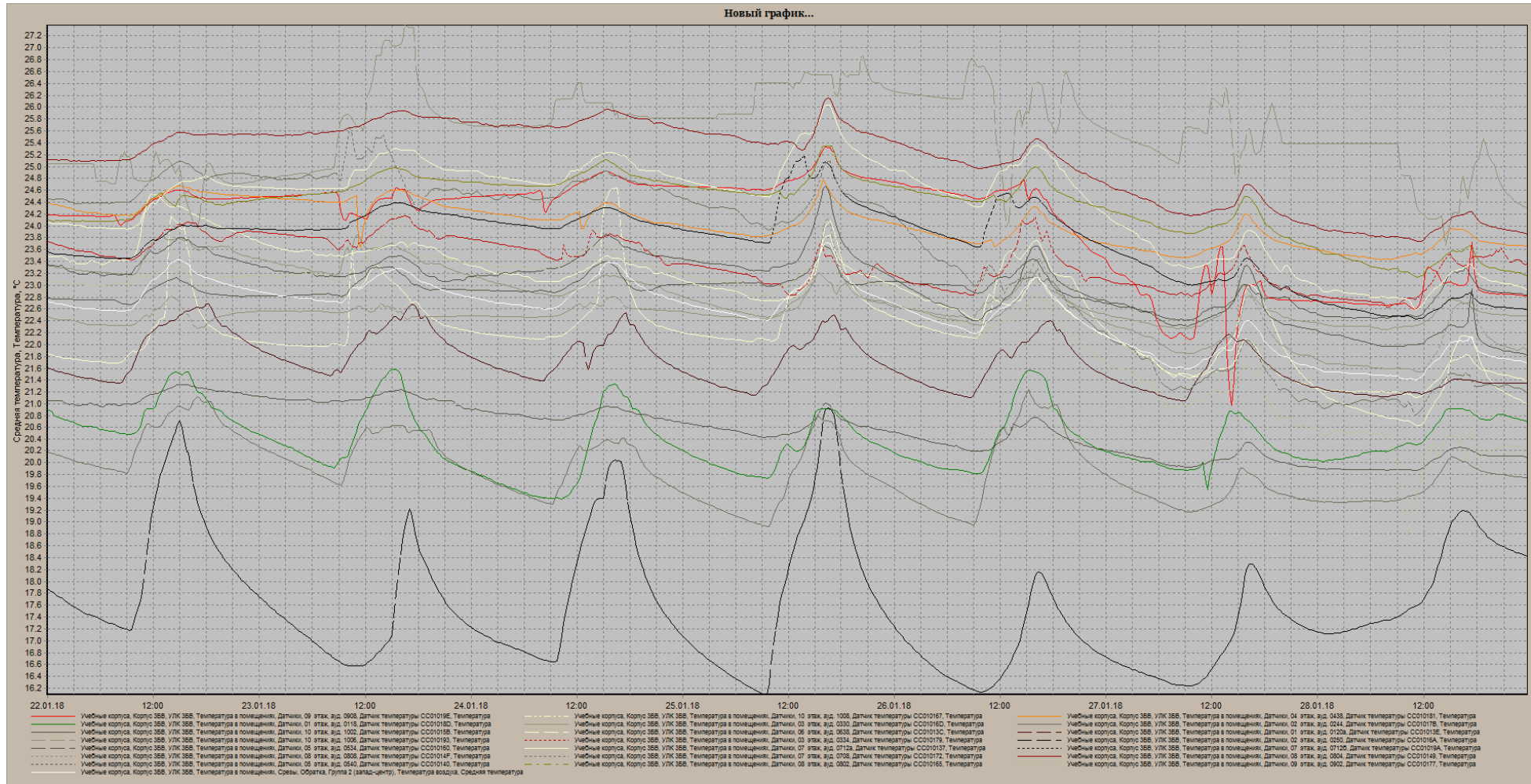


Рисунок 4.14 – Температуры помещений центральной секции западного фасада

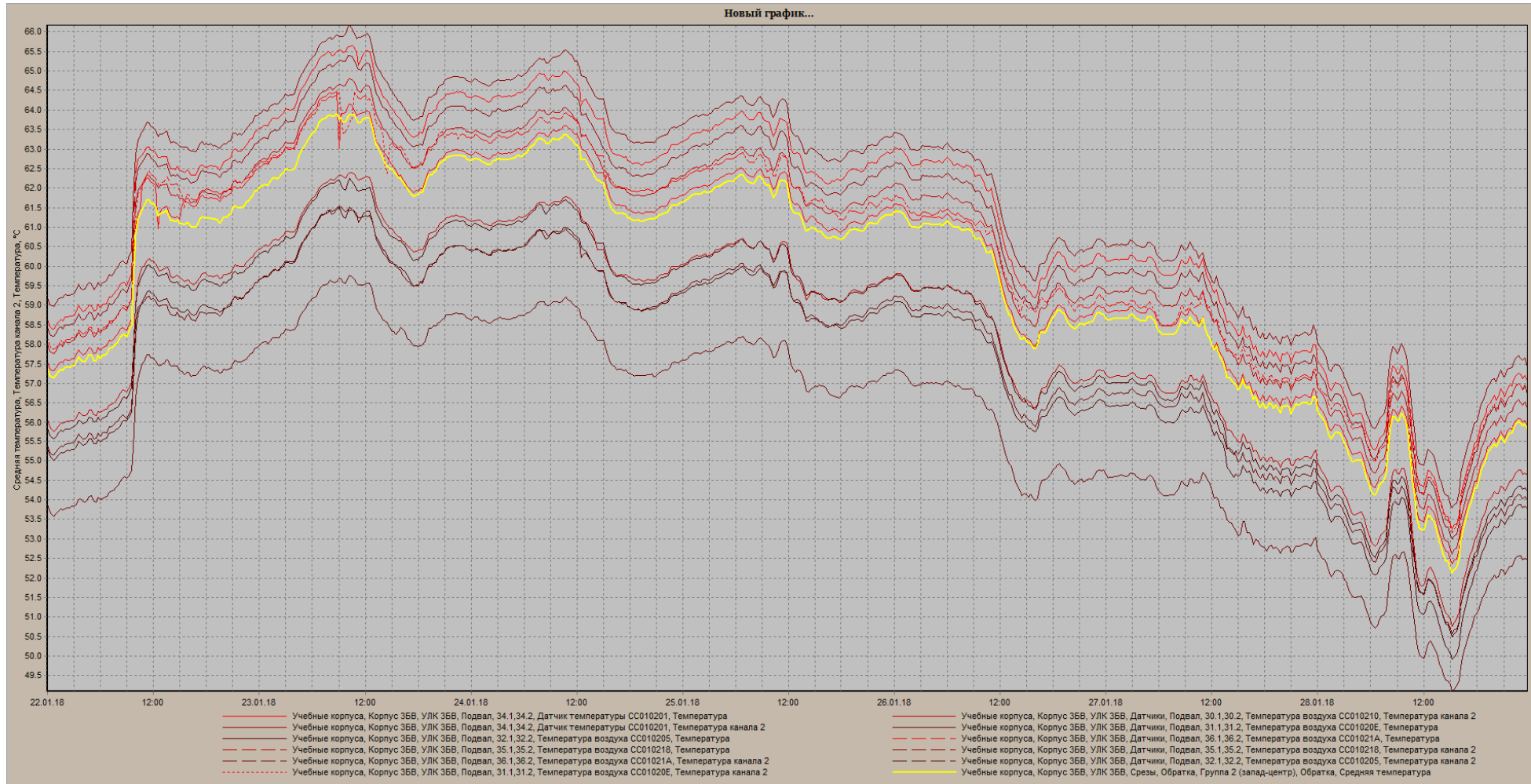


Рисунок 4.15 – Температуры обратного теплоносителя центральной секции западного фасада

4.3.2. Проверка алгоритма распределенного управления в дефицитном режиме с использованием имитационной макромодел

На основании полученных данных сенсорных сетей была произведена идентификация параметров имитационной макромодел южной стороны системы теплоснабжения ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» и проведена проверка алгоритма распределённого 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 4.1 приведены результаты расчёта параметров теплотребления рассматриваемых зданий с использованием разработанной имитационной макромодел 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 перераспределением тепловой энергии между зданиями согласно алгоритму (2.6).

При этом в третьем режиме были 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 таблице 4.1 приведены результаты расчета параметров каждого из 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 $T_{\text{П}}$ (°С); потребляемая зданием тепловая мощность Q (Гкал/ч).

Таблица 4.1 – Результаты моделирования

Потребители	Режим	G , т/ч	T_1 , °С	T_2 , °С	$T_{\text{П}}$, °С	Q , Гкал
УЛК 2АК ($T^{\text{min}}=17$ °С)	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 ($T^{\text{min}}=19$ °С)	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 ($T^{\text{min}}=17$ °С)	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

В примере 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 поддерживать свой температурный график, увеличивая расход теплоносителя.

Чтобы обеспечить требуемую минимальную температуру для УЛК 3Д, УЛК 2АК и УЛК 2АТ вводится централизованное управление потребителями с использованием предложенного алгоритма. С использованием имитационного макромодели предложенный алгоритм на менее приоритетных зданиях (для которых по условиям задания в примере не введено ограничение) подстраивает температурные графики контроллеров погодного регулирования таким образом, чтобы температура помещений этих зданий последовательно снижалась и выравнивалась. Снижение температуры происходит до тех пор, пока контроллеры погодного регулирования не обеспечат заданные в примере минимальные температуры помещений более приоритетных зданий. При этом температура подаваемого от источника теплоносителя становится соответствующей температурному графику источника за счёт снижения расхода теплоносителя (и потребляемой тепловой энергии) на менее приоритетных зданиях, вследствие чего на более приоритетных зданиях появляется возможность поддерживать требуемую температуру помещений.

4.3.3. Идентификация динамических характеристик распределенного объекта управления

Рассмотрим идентификацию динамических характеристик РОУ на примере корпуса 2АТ. Средние фактические температуры помещений фасадов корпуса 2АТ приведены на рисунке 4.16.

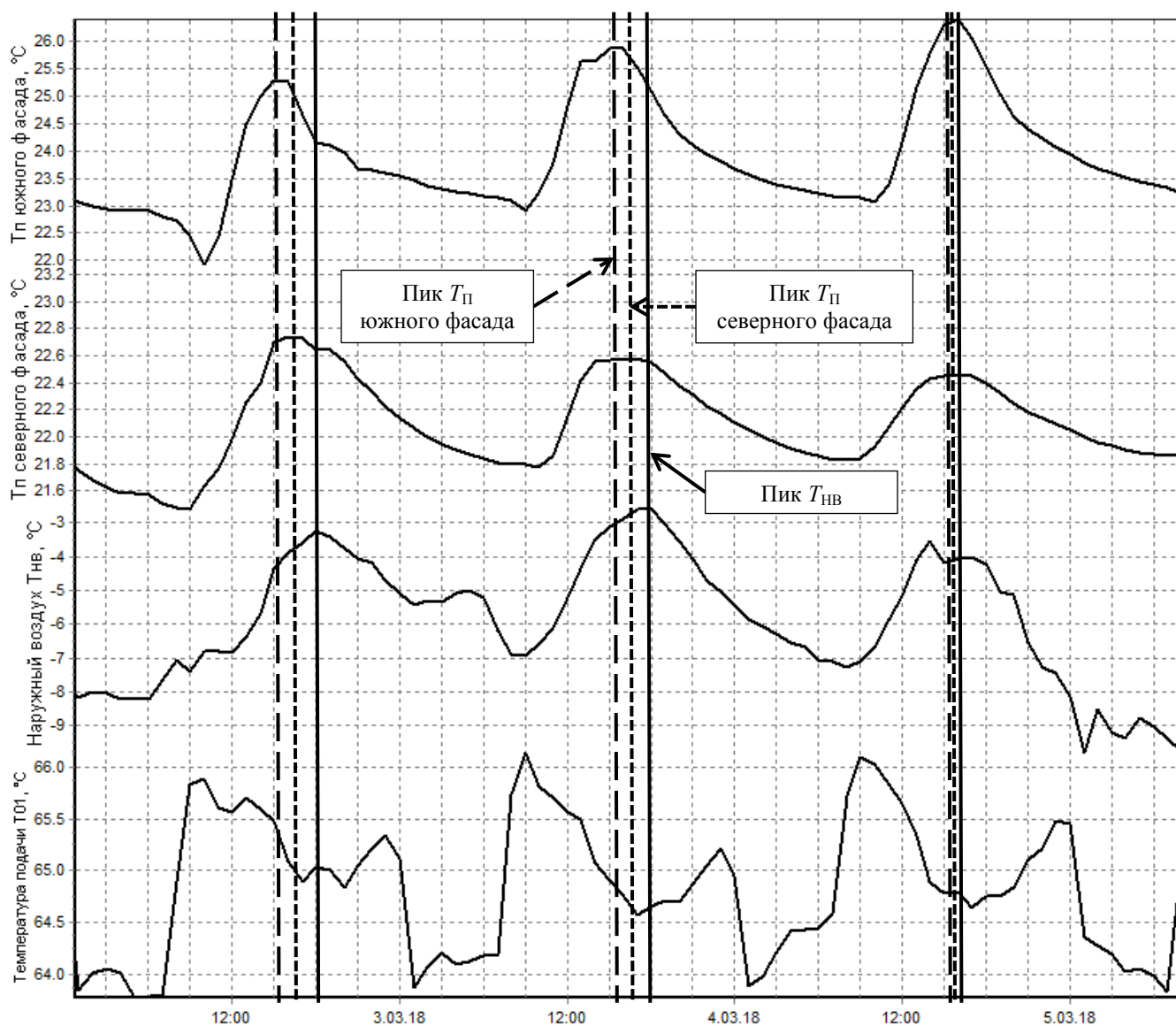


Рисунок 4.16 – Средние температуры помещений фасадов корпуса 2АТ

Обратим внимание, что пики средней температуры помещений южного фасада по времени наступают раньше, чем пики средней температуры помещений северного фасада. На представленном графике опережение по времени пиков температуры южного фасада для первых суток достигает 1,5 часа. При этом амплитуда суточных колебаний температур помещений южного фасада составляет около 3 °С, северного фасада – 1,5 °С. Поскольку на объекте отсутствует пофасадное регулирование, а также ветровое воздействие в данный период, указанные особенности являются следствием воздействия инсоляции на помещения южного фасада. Поэтому с целью уменьшения

влияния инсоляции далее будем рассматривать динамические характеристики помещений северного фасада.

В литературе [64] известно наличие существенной апериодической составляющей по каналу $T_{\text{Пi}}(T_{01}-T_{\text{НВ}})$, связанной с теплопередачей через ограждающие конструкции. В этом случае пик средней температуры помещений должен запаздывать относительно пика температуры наружного воздуха при колебательном характере изменения температуры наружного воздуха. Однако анализ графиков на рисунке 4.16 показывает отсутствие явно выраженного запаздывания между температурой помещений северного фасада и температурой наружного воздуха, что говорит о наличии существенной быстродействующей связи температуры наружного воздуха и температуры воздуха в помещениях. Вероятно, отмеченная зависимость связана с воздействием инфильтрации.

Определим количество теплотерь $Q_{\text{НВ}}$, связанных с температурой наружного воздуха, через следующую эмпирическую зависимость:

$$Q_{\text{НВ}} = -k_{\text{НВ}} \cdot T_{\text{НВ}} + c'_{\text{НВ}}, \quad (4.1)$$

где $k_{\text{НВ}}$ и $c'_{\text{НВ}}$ – некоторые эмпирические константы. Преобразуем (4.1) для удобства дальнейшего использования:

$$\begin{aligned} Q_{\text{НВ}} &= -k_{\text{НВ}} \cdot T_{\text{НВ}} - c_{\text{НВ}}, \\ c_{\text{НВ}} &= -c'_{\text{НВ}}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Будем считать коэффициент $k_{\text{НВ}}$ на интервале идентификации и управления постоянным.

Предположим, что на интервале идентификации и управления внутренние тепlopоступления $Q_{\text{ВН}}$ также не изменяются:

$$Q_{\text{ВН}} = c_{\text{ВН}} = \text{const}. \quad (4.3)$$

Таким образом, сумма возмущающих воздействий примет вид:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ВОЗМ}} &= -Q_{\text{НВ}} + Q_{\text{ВН}} \\ Q_{\text{ВОЗМ}} &= k_{\text{НВ}} \cdot T_{\text{НВ}} + c_{\text{НВ}} + c_{\text{ВН}}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Перепишем выражение (2.55) для i -го потребителя с учетом выражения (4.4):

$$T_{\Pi i} = T_{\text{Н}} + K_i \cdot (T_{01} - T_{\text{НВ}}) + \frac{k_{\text{НВ}i} \cdot T_{\text{НВ}} + c_{\text{НВ}i} + c_{\text{ВН}i}}{(q_i \cdot t)} \cdot (1 - K_i). \quad (4.5)$$

Коэффициент $0 < K_i < 1$, так как в случае отсутствия возмущающих воздействий $Q_{\text{ВОЗМ}}$ температура помещения $T_{\Pi i}$ не может быть выше температуры подаваемого теплоносителя T_{01} .

Произведем группировку:

$$T_{\Pi i} = K_i \cdot (T_{01} - T_{\text{НВ}}) + T_{\text{НВ}} \cdot \left(1 + \frac{k_{\text{НВ}i}}{q_i \cdot V_i} \cdot (1 - K_i) \right) + \frac{c_{\text{НВ}i} + c_{\text{ВН}i}}{q_i \cdot V_i} \cdot (1 - K_i). \quad (4.6)$$

Выполним следующие замены:

$$\begin{aligned} a_i &= K_i, \\ b_i &= 1 + \frac{k_{\text{НВ}i}}{q_i \cdot V_i} \cdot (1 - K_i), \\ c_i &= \frac{c_{\text{НВ}i} + c_{\text{ВН}i}}{q_i \cdot V_i} \cdot (1 - K_i), \\ \Delta T_{\text{ОТ}} &= T_{01} - T_{\text{НВ}}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Поскольку на рисунке 4.16 при увеличении температуры наружного воздуха наблюдается возрастание температуры помещений, то $k_{\text{НВ}}$ на рассматриваемом периоде должен быть больше 0 ($k_{\text{НВ}i} > 0$). Следовательно, так как $0 < K_i < 1$, то должно выполняться неравенство $b_i > 1$.

Будем считать коэффициент K_i постоянной величиной на рассматриваемом интервале времени, поскольку корпус 2АТ оборудован АИТП, в котором в контуре циркуляции поддерживается постоянный расход. Поскольку на рассматриваемом интервале K_i , $k_{\text{НВ}i}$, $c_{\text{НВ}i}$, $c_{\text{ВН}i}$, q_i приняты постоянными, то a_i , b_i , c_i на этом же интервале также не будут изменяться.

В результате получаем факторную зависимость:

$$T_{\Pi i} = a_i \cdot \Delta T_{\text{ОТ}} + b_i \cdot T_{\text{НВ}} + c_i. \quad (4.8)$$

С учетом инерционности передачи тепловой энергии [64] и наличия запаздывания $\tau_{\text{ТР}i}$ по каналу $T_{\Pi i}(\Delta T_{\text{ОТ}})$, воспользуемся выражением (2.39):

$$T_i \frac{dT_{\Pi i}}{dt} + T_{\Pi i} = a_i \cdot \Delta T_{\text{OT}}(t - \tau_{\text{TP}i}) + b_i \cdot T_{\text{HВ}} + c_i, \quad (4.9)$$

где T_i – постоянная времени переходного процесса на i -ом потребителе; $\tau_{\text{TP}i}$ – задержка по каналу $T_{\Pi i}(\Delta T_{\text{OT}})$.

Выражение (4.9) можно представить в виде блок-схемы динамической системы, представленной на рисунке 4.17. В блок-схеме $Z_i(t)$ – коррекция температуры i -го помещения, связанная с возмущающими воздействиями $Q_{\text{ВОЗМ}i}$, действующими в i -ом помещении.

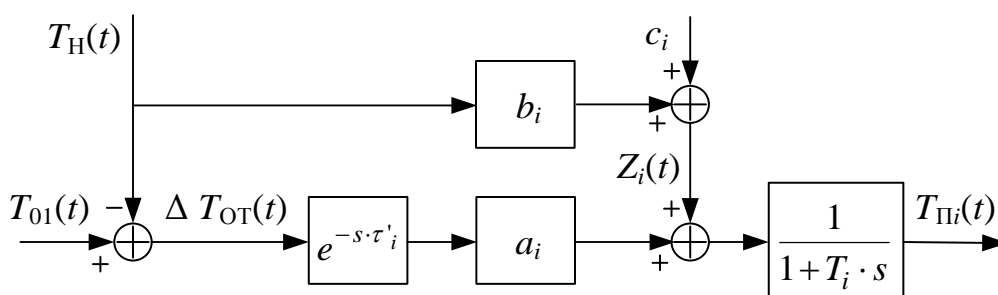


Рисунок 4.17 – Блок-схема макромоделли динамической системы i -ой связи РОУ

С использованием неявного метода Эйлера перейдем к дискретной записи в разностных уравнениях:

$$T_{\Pi i, k} = \frac{T_i}{T_i + \Delta t} \cdot T_{\Pi i, k-1} + a_i \cdot \frac{\Delta t}{T_i + \Delta t} \cdot \Delta T_{\text{OT}, k - \tau'_i} + b_i \cdot \frac{\Delta t}{T_i + \Delta t} \cdot T_{\text{HВ}, k} + \frac{\Delta t}{T_i + \Delta t} \cdot c_i, \quad (4.10)$$

где k – номер шага выборки из набора экспериментальных данных; τ'_i – целочисленное количество интервалов дискретизации, приближенно отражающее задержку по каналу $T_{\Pi i}(T_{01} - T_{\text{HВ}})$ с точностью до интервала дискретизации Δt :

$$\tau'_i = \lceil \tau_{\text{TP}i} / \Delta t \rceil. \quad (4.11)$$

Далее обозначим:

$$\alpha_i = \frac{T_i}{T_i + \Delta t}; \beta_i = a_i \cdot \frac{\Delta t}{T_i + \Delta t}; \gamma_i = b_i \cdot \frac{\Delta t}{T_i + \Delta t}; \nu_i = \frac{\Delta t}{T_i + \Delta t} \cdot c_i. \quad (4.12)$$

Таким образом, получим следующую рекуррентную факторную зависимость:

$$T_{\Pi i, k} = \alpha_i \cdot T_{\Pi i, k-1} + \beta_i \cdot \Delta T_{\text{OT}, k - \tau'_i} + \gamma_i \cdot T_{\text{HВ}, k} + \nu_i. \quad (4.13)$$

Идентификация $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \nu_i$ выполняется по МНК с поиском дискретной задержки τ'_i путем перебора значений отступов φ_i от округленной снизу минимальной задержки τ_i^{\min} до округленной сверху максимальной задержки τ_i^{\max} из множества Φ_i :

$$\varphi_i \in \Phi_i, \Phi_i = [0, 1, 2, \dots, (\tau_i^{\max} - \tau_i^{\min})], \tau_i^{\min} = \left\lfloor \frac{\tau_{\text{ТР}i}^{\min}}{\Delta t} \right\rfloor, \tau_i^{\max} = \left\lceil \frac{\tau_{\text{ТР}i}^{\max}}{\Delta t} \right\rceil. \quad (4.14)$$

Перебор осуществляется по критерию минимальной квадратичной ошибки при идентификации параметров $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \nu_i$ по МНК для каждого $\tau'_{\varphi_i} \in T_{\text{ТР}i}, T_{\text{ТР}i} = [\tau_i^{\min}, \tau_i^{\min} + 1, \tau_i^{\min} + 2, \dots, \tau_i^{\min} + \varphi_i, \dots, \tau_i^{\max}]$:

$$(\alpha_i; \beta_i; \gamma_i; \nu_i; \tau'_i) = \arg \min_{\tau'_{\varphi_i} \in T_{\text{ТР}i}} \left(\sum_{k=2+\tau'_{\varphi_i}}^K (T_{\text{П}i,k} - f_{\text{МНК}}(k, \varphi_i)) \right), \quad (4.15)$$

где $f_{\text{МНК}}(k, \varphi_i)$ – функция, определяющая расчетное значение температуры $T_{\text{П}i,k}$ помещений в зависимости от $T_{\text{П}i,k-1}, \Delta T_{\text{ОТ}}$ и $T_{\text{Н}}$ при найденных по МНК параметров $\alpha_{\varphi_i}, \beta_{\varphi_i}, \gamma_{\varphi_i}, \nu_{\varphi_i}$ для каждого отступа φ_i :

$$f_{\text{МНК}}(k, \tau'_{\varphi_i}) = \alpha_{\varphi_i} \cdot T_{\text{П}i,k-1} + \beta_{\varphi_i} \cdot \Delta T_{\text{ОТ},k-\tau'_{\varphi_i}} + \gamma_{\varphi_i} \cdot T_{\text{НВ},k} + \nu_{\varphi_i}. \quad (4.16)$$

Величины $\tau_{\text{ТР}i}^{\min}$ и $\tau_{\text{ТР}i}^{\max}$ могут варьироваться в зависимости от структуры системы отопления, связанной с габаритами здания, численным расходом теплоносителя и расположением помещения в здании. Для рассматриваемого здания $\tau_{\text{ТР}i}^{\min} = 0$ и $\tau_{\text{ТР}i}^{\max} = 5$ часов. $\Delta t = 1$ час – максимальный интервал архивации данных по всем факторам.

На рисунке 4.18 представлены результаты идентификации и прогноза по идентифицированным параметрам средней температуры помещений северного фасада здания УЛК 2АТ на период, равный 6 суткам. Период идентификации составил 3 суток, период прогноза – 3 суток.

На интервале идентификации найдены следующие параметры:

– коэффициент передачи $K = 0,8638$;

- время запаздывания реакции скорректированной температуры помещений $\tau_{TP}=3$ часа;
- постоянная времени переходного процесса $T=21,4$ часов;
- коэффициент влияния температуры наружного воздуха с учетом инфильтрации $b=1,139$. Отметим, что условие $b>1$ при идентификации выполняется.

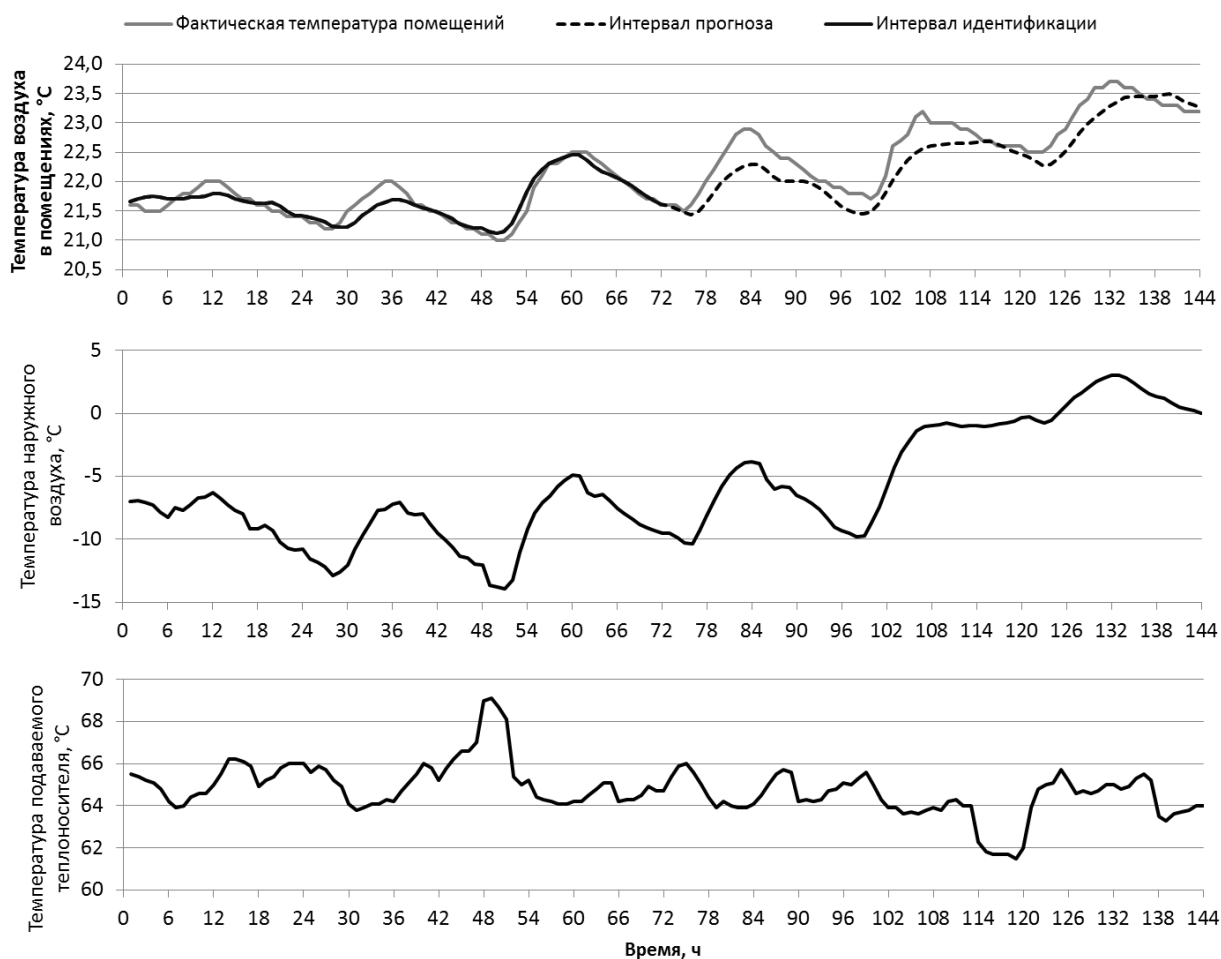


Рисунок 4.18 – Графики идентификации и прогнозирования температуры помещений здания корпуса 2АТ

На интервале идентификации были определены следующие статистические показатели по температуре помещений: средняя ошибка – (-0,013 °C); СКО – 0,147 °C. На интервале прогноза статистические показатели по температуре помещений составили: средняя ошибка – (-0,255 °C); СКО – 0,213 °C.

Диапазон изменения температуры помещений на интервале идентификации составил $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, на интервале прогноза – $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Соответственно, на интервале идентификации значения средней ошибки и СКО, нормированные на диапазон изменения температуры, составили: средняя ошибка – $(-0,9\%)$; СКО – $9,8\%$. Нормированные значения на интервале прогноза составили: средняя ошибка – $(-1,61\%)$; СКО – $9,68\%$.

Полученные результаты говорят 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.

Далее идентифицированные коэффициенты могут быть использованы для реализации модельно-прогнозирующего управления по критерию максимального количества помещений с выполненными температурными условиями. В этом случае в системе неравенств (2.2) вектор входных воздействий \mathbf{u} будет включать задание температуры теплоносителя T_{01} на выходе из смесительного устройства АИТП, а факторная зависимость F_i примет дискретный вид:

$$T_{\Pi i, k} = F(T_{01, k}) = \alpha_i \cdot T_{\Pi i, k-1} + \beta_i \cdot (T_{01, k-\tau'_i} - T_{H, k-\tau'_i}) + \gamma_i \cdot T_{H, k} + \nu_i. \quad (4.17)$$

В выражении (4.17) основным измеряемым возмущающим воздействием является температура наружного воздуха $T_{HВ}$ как по каналу быстропеременных воздействий, так и медленных воздействий с задержкой на величину $\tau_{ТР}$.

Коэффициенты β_i , γ_i , ν_i согласно (4.7) и (4.13) зависят от коэффициента передачи K_i . Коэффициент передачи K_i зависит от расхода теплоносителя G_{01} , а также от соотношения удельного теплотребления $q_i \cdot V_i$ и удельной теплопередачи отопительных приборов $k_i \cdot F_i$ i -го потребителя. Здесь стоит отметить, что влияние коэффициента K_i на управление i -ым потребителем уточняется посредством идентификации коэффициентов β_i , γ_i , ν_i на каждой итерации работы предложенного алгоритма управления в соответствии с

применяемой концепцией модельно-прогнозирующего управления. Таким образом, идентификация коэффициентов α_i , β_i , γ_i , ν_i по выражению (4.17) позволяет адаптировать систему управления не только к отклонению удельных тепловых характеристик $k_i \cdot F_i$, $q_i \cdot V_i$ и изменению возмущающих воздействий, связанных с быстрым характером влияния температур наружного воздуха $T_{\text{НВ}}$ и внутренних теплопоступлений $Q_{\text{НВ}}$, но и к изменению расхода теплоносителя G_{0i} на i -ом потребителе.

4.3.4. Реализация системы регулирования отоплением здания с использованием модельно-прогнозирующего управления на основе предложенного алгоритма

На рисунке 4.19 представлена структурная схема разработанной системы модельно-прогнозирующего управления РОУ, включающая рассмотренные выше макромоделли динамических связей РОУ.

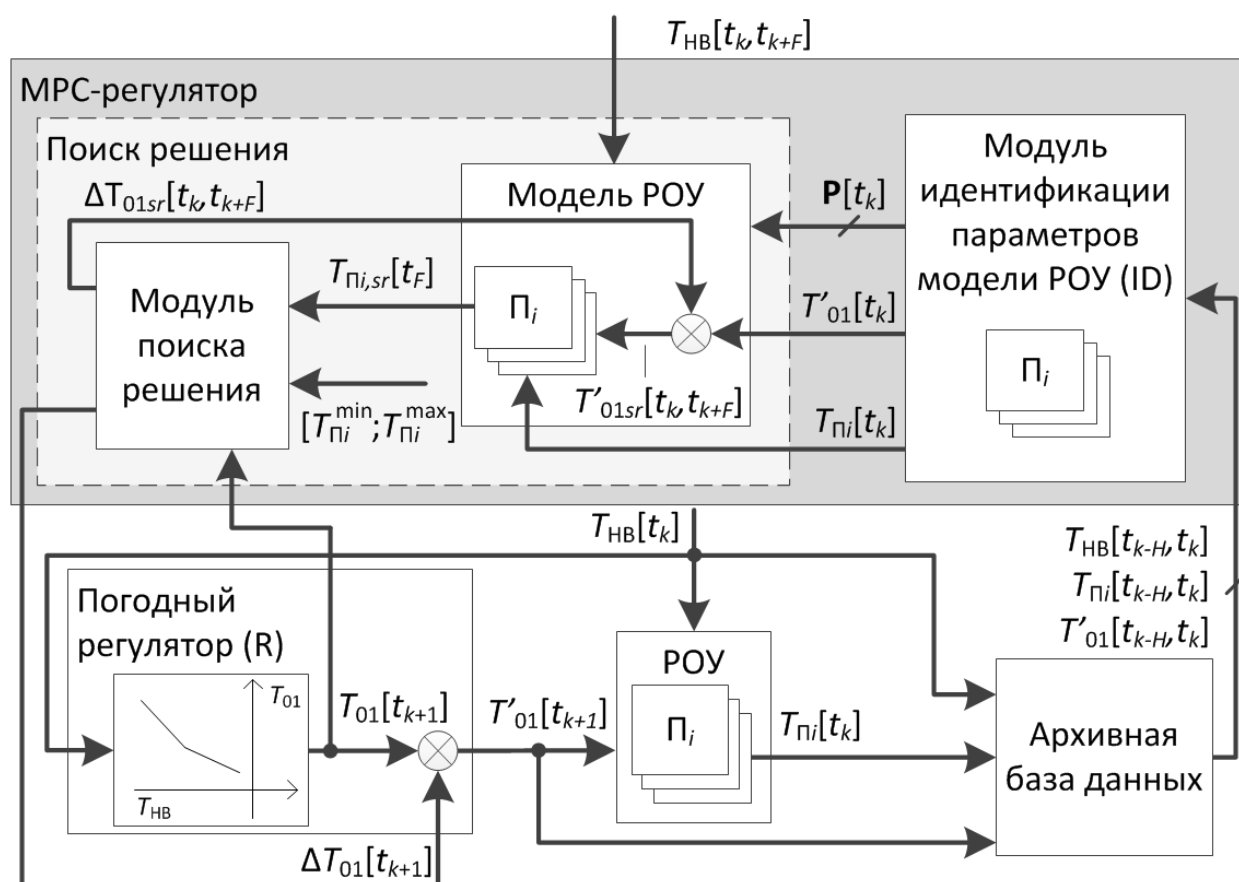


Рисунок 4.19 – Структурная схема системы управления РОУ

На рисунке 4.19 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 $T_{\Pi i}[t_k]$. 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 ($T_{\Pi i}^{\min} \leq T_{\Pi i, sr}(t_k) \leq T_{\Pi i}^{\max}$) 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.

Поскольку стандартный контроллер погодного регулирования управляет температурой теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха в реальном времени с малым временным тактом, то запись оптимальных заданий температуры теплоносителя чаще, чем 1 раз в час может привести к выходу энергонезависимой памяти контроллера из строя. Поэтому оптимизацию управления системой отопления будем осуществлять в базисе основного возмущающего воздействия (температуры наружного воздуха). Разработанная многомерная динамическая модель здания будет использоваться при оптимизации коэффициентов температурного графика контроллера погодного регулирования по критерию выполнения температурных условий на горизонте прогнозирования. С учетом этого решим задачу распределенного управления для динамической системы в векторно-матричной форме.

В работе используется макро модель i -ой связи РОУ (4.9). Учтем, что контроллеры погодного регулирования поддерживают температуру подаваемого в систему отопления здания T_{01} в зависимости от температуры наружного воздуха $T_{\text{НВ}}$:

$$T_{01} = \varphi T_{\text{НВ}} + \psi, \quad (4.18)$$

где φ, ψ – постоянные наклона и сдвига температурного графика погодного регулирования.

Запишем (4.9) с учетом управления по температурному графику:

$$\frac{dT_{\text{П}i}}{dt} = -\frac{1}{T_i} T_{\text{П}i} + \frac{a_i}{T_i} \cdot ((\varphi \cdot T_{\text{НВ}}(t - \tau_{\text{ТР}i}) + \psi) - T_{\text{НВ}}(t - \tau_{\text{ТР}i})) + \frac{b_i}{T_i} \cdot T_{\text{НВ}} + \frac{c_i}{T_i}. \quad (4.19)$$

Введем следующие замены:

$$\alpha'_i = -\frac{1}{T_i}, \beta'_i = \frac{a_i}{T_i}, \rho'_i = \frac{b_i}{T_i}, \mathcal{G}'_i = \frac{c_i}{T_i}. \quad (4.20)$$

С учетом (4.20) выражение (4.19) примет вид:

$$\frac{dT_{\text{П}i}}{dt} = \alpha'_i T_{\text{П}i} + \beta'_i \cdot ((\varphi \cdot T_{\text{НВ}}(t - \tau_{\text{ТР}i}) + \psi) - T_{\text{НВ}}(t - \tau_{\text{ТР}i})) + \rho'_i \cdot T_{\text{НВ}} + \mathcal{G}'_i. \quad (4.21)$$

С учетом идентифицированных запаздываний возмущающее воздействие по каналам $T_{\text{П}i}(T_{01}-T_{\text{НВ}})$ запишем в следующей матрично-векторной форме на шаге k :

$$\mathbf{w}_{1,k} = \begin{Bmatrix} T_{\text{НВ},k-\tau'_1} & 1 \\ T_{\text{НВ},k-\tau'_2} & 1 \\ \dots & \dots \\ T_{\text{НВ},k-\tau'_m} & 1 \end{Bmatrix}, \quad (4.22)$$

где τ'_i – целочисленное количество интервалов дискретизации, приближенно отражающее задержку по каналу $T_{\text{П}i}(T_{01}-T_{\text{НВ}})$ с точностью до интервала дискретизации Δt :

$$\tau'_i = \lceil \tau_{\text{ТР}i} / \Delta t \rceil. \quad (4.23)$$

В качестве управляющего воздействия выберем параметры корректировки температурного графика, принимаемые постоянными на горизонт управления, равный горизонту прогноза:

$$\mathbf{u} = \{\varphi, \psi\}^T. \quad (4.24)$$

Введем вектор, учитывающий влияние $T_{\text{Н}}$ по каналу $T_{\text{П}i}(T_{01}-T_{\text{Н}})$ в виде:

$$\mathbf{u}_0 = \{-1, 0\}^T. \quad (4.25)$$

Вектор возмущающих воздействий по каналу $T_{\Pi i}(T_{\text{НВ}})$ с учетом наличия постоянной составляющей \mathcal{G}'_i запишем в следующей матрично-векторной форме на шаге k :

$$\mathbf{w}_{2,k} = \{T_{\text{НВ},k} \quad 1\}^T. \quad (4.26)$$

В результате динамическая система в векторно-матричном виде примет вид:

$$\dot{\mathbf{x}}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{w}_{1,k}(\mathbf{u} + \mathbf{u}_0) + \mathbf{H}\mathbf{w}_{2,k}, \quad (4.27)$$

где \mathbf{A} – диагональная матрица состояния РОУ, \mathbf{B} – диагональная матрица управления, \mathbf{H} – матрица возмущения:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \text{diag}(\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \alpha'_m), \\ \mathbf{B} &= \text{diag}(\beta'_1, \beta'_2, \dots, \beta'_m), \end{aligned} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \rho'_1 & \mathcal{G}'_1 \\ \rho'_2 & \mathcal{G}'_2 \\ \dots & \dots \\ \rho'_m & \mathcal{G}'_m \end{bmatrix}. \quad (4.28)$$

Представим (4.27) в разностной форме с использованием неявного метода Эйлера и, выполнив группировку, получим:

$$\mathbf{x}_k = (\mathbf{I} - T_0\mathbf{A})^{-1}(\mathbf{x}_{k-1} + T_0\mathbf{B}\mathbf{w}_{1,k}\mathbf{u} + T_0(\mathbf{B}\mathbf{w}_{1,k}\mathbf{u}_0 + \mathbf{H}\mathbf{w}_{2,k})), \quad (4.29)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица размером $m \times m$.

Введем дополнительные обозначения:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}'' &= (\mathbf{I} - T_0\mathbf{A})^{-1}, \quad \mathbf{B}'' = T_0(\mathbf{I} - T_0\mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}, \\ \mathbf{z}_k &= T_0(\mathbf{I} - T_0\mathbf{A})^{-1}(\mathbf{B}\mathbf{w}_{1,k}\mathbf{u}_0 + \mathbf{H}\mathbf{w}_{2,k}). \end{aligned} \quad (4.30)$$

В результате для динамической системы в рамках MPC решение задачи (2.67) в разностной форме, представленной с использованием неявного метода Эйлера, примет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \mathbf{A}''\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}''\mathbf{w}_{1,k}\mathbf{u} + \mathbf{z}_k \\ \boldsymbol{\mu}_k &= \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x}^{\min} \leq \mathbf{x}_k) \wedge \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x}_k \leq \mathbf{x}^{\max}) \\ C(\mathbf{u}) &= \sum_{k=1}^P \boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{\mu}_k \\ \mathbf{u} &= \arg \text{abs max}_{\mathbf{u} \in \mathbf{U} \subset \mathbf{R}^2} C(\mathbf{u}) \\ \mathbf{U} &= \{\mathbf{u} \in \mathbf{R}^2 : (\varphi^{\min} \leq \varphi \leq \varphi^{\max}) \wedge (\psi^{\min} \leq \psi \leq \psi^{\max})\}, \end{aligned} \quad (4.31)$$

где P – горизонт прогноза (принятый равным 6 часов для рассматриваемого далее корпуса 2АТ).

Ограничениями управляющих воздействий являются ограничения изменения параметров температурного графика:

$$\varphi^{\min} = \varphi^0 - \Delta\varphi, \varphi^{\max} = \varphi^0 + \Delta\varphi, \psi^{\min} = \psi^0 - \Delta\psi, \psi^{\max} = \psi^0 + \Delta\psi, \quad (4.32)$$

где φ^0, ψ^0 – фиксированные постоянные наклона и сдвига температурного графика погодного регулирования в соответствии с нормативной документацией, $\Delta\varphi$ и $\Delta\psi$ – допустимые отклонения от нормативного наклона и сдвига температурного графика погодного регулирования.

4.3.5. Проверка алгоритма распределенного управления с гарантированным обеспечением качества микроклимата

На основании проведенной идентификации динамических связей РОУ по данным сенсорных сетей был проведен эксперимент по реализации предложенного алгоритма управления зданием корпуса 2АТ ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». С использованием идентифицированных динамических связей РОУ найдены управляющие воздействия для повышения количества удовлетворенных температурных условий.

На графиках на рисунке 4.20 представлены результаты применения управляющих воздействий. В результате снижения задания температуры теплоносителя и проведения организационно-технических мероприятий по балансировке системы отопления была снижена средняя температуры помещений. Также наблюдается снижение потребленной тепловой энергии. Повышение количества выполненных температурных условий и снижение потребления тепловой энергии свидетельствуют в целом об эффективности применения предложенного алгоритма управления.

Расчет технико-экономического эффекта от применения алгоритма управления по критерию максимального количества помещений с выполненными температурными условиями в УЛК 2АТ был выполнен на

основании положений Международного протокола измерения и верификации (*International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP)*) [109].

Согласно протоколу *IPMVP* на основе данных эксплуатации построена регрессионная модель для базового периода (до проведения мероприятий по повышению энергоэффективности). Выход модели – потребление тепловой энергии. Независимой переменной модели является разность температуры подаваемого теплоносителя и температуры наружного воздуха.

Построенная регрессионная модель базового периода используется для оценки потребления тепла в отчетном периоде для фактической температуры наружного воздуха с учетом применяемого температурного графика АИТП, которое было бы потреблено, если бы не применялся предложенный алгоритм управления. Полученные на модели данные сравниваются с фактическими данными потребления тепла в отчетном периоде для расчета экономии в сопоставимых условиях (при одной и той же температуре наружного воздуха).

Контроль температуры воздуха в помещениях осуществлялся с использованием 31 датчика температуры, расположенных в учебных аудиториях, кабинетах и коридорах здания. Нормативные диапазоны температур помещений согласно СП 2.1.2.3358-16 [78] для аудиторий и кабинетов приняты 19-23 °С, для коридоров – 14-20°С.

Базовым периодом является отопительный период с 07.03.2018 г. по 15.03.2018 г. Отчётным периодом является отопительный период с 17.03.2018 г. по 25.03.2018 г.

В результате применения предложенного алгоритма управления зданием корпуса 2АТ экономия тепловой энергии в отчётный период в сопоставимых температурных условиях составила 8,53 Гкал (16,5%) при увеличении количества помещений с выполненными температурными условиями с 34% до 56% от общего количества контролируемых помещений. Стандартная ошибка расчета в модели потребления тепловой энергии базового периода в пересчете на длительность отчетного периода составила $SE_{RP}=0,34$ Гкал.

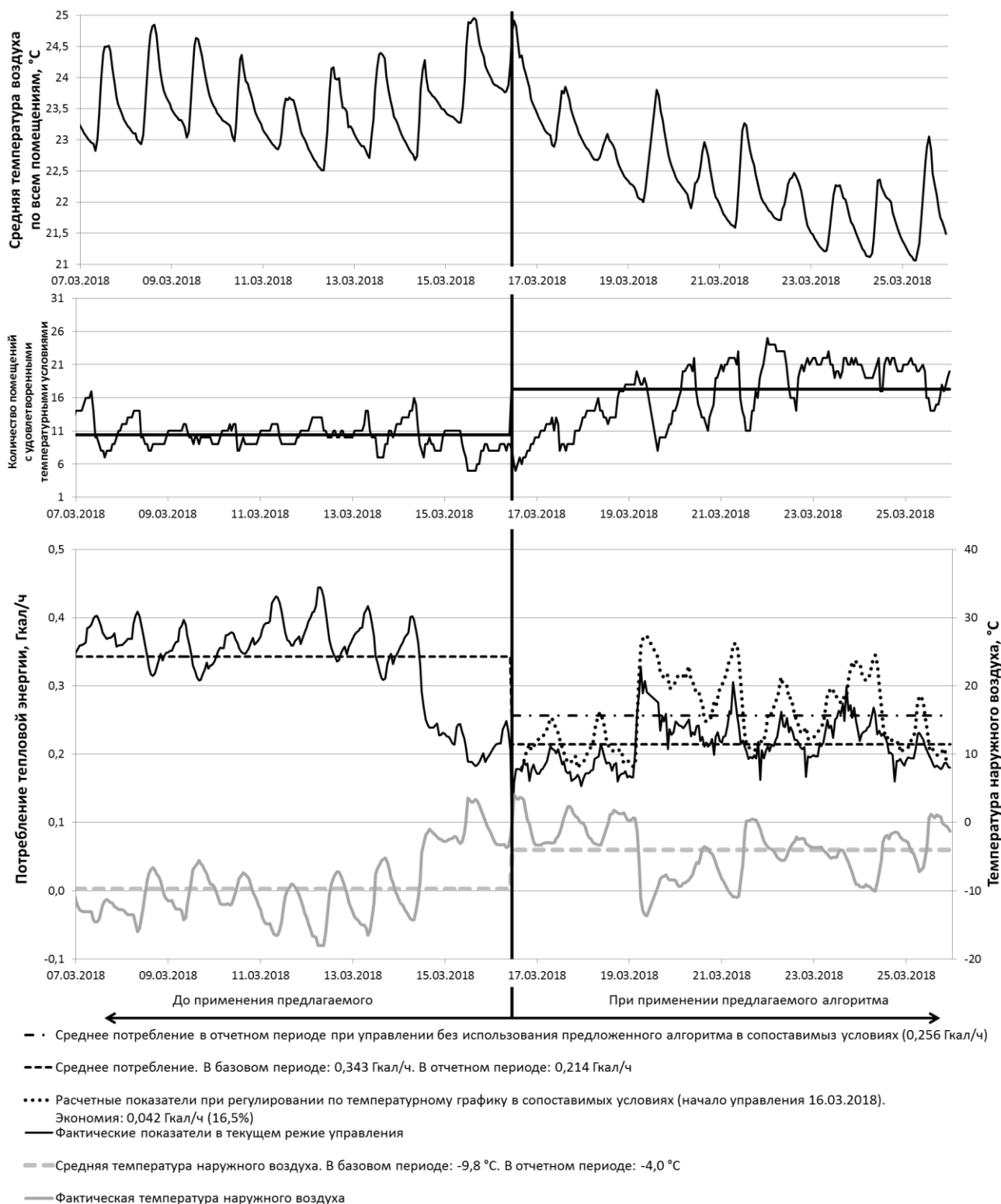


Рисунок 4.20 – Сравнение в сопоставимых условиях потребления тепловой энергии зданием корпуса 2АТ в базовом периоде (07.03.2018 г. по 15.03.2018) и в отчётном периоде (17.03.2018 г. по 25.03.2018)

Необходимо отметить, что значение экономии за отчетный период превышает стандартную ошибку примерно в 25 раз. Это удовлетворяет условию приемлемой неопределённости *IPMVP* – экономия должна быть как минимум в 2 раза больше стандартной ошибки [109].

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. На рисунке 4.21 представлен фактический график разброса температур помещений до (в базовом периоде) и после (в отчетном периоде) применения предложенного алгоритма управления.

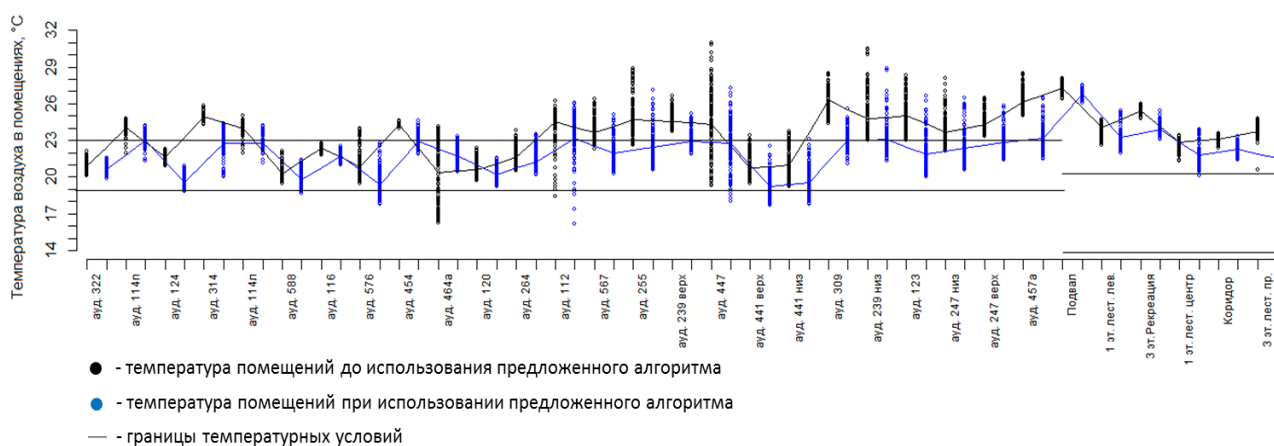


Рисунок 4.21 – Фактический график температур помещений до и после применения предложенного алгоритма управления

На рисунке 4.22 приведено сравнение предложенного алгоритма по максимуму выполненных температурных условий (ВТУ) с широко распространенным алгоритмом регулирования по температурному графику (ТГ) на примере корпуса №2АТ ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». Для сопоставимости сравнения сначала вводим ограничение на число управляющих устройств – один контроллер погодного регулирования в автоматизированном индивидуальном тепловом пункте (АИТП). Соответствующая подобласть неулучшаемых решений представлена черной границей. Вводим второй регулирующий фактор – балансировка помещений здания. Подобласть неулучшаемых решений в этом случае представляется желтой границей. Из рассмотрения рисунка 2 видно, что

подобласть, соответствующая регулированию по максимуму ВТУ с балансировкой, более эффективна, чем подобласть регулирования по ТГ.

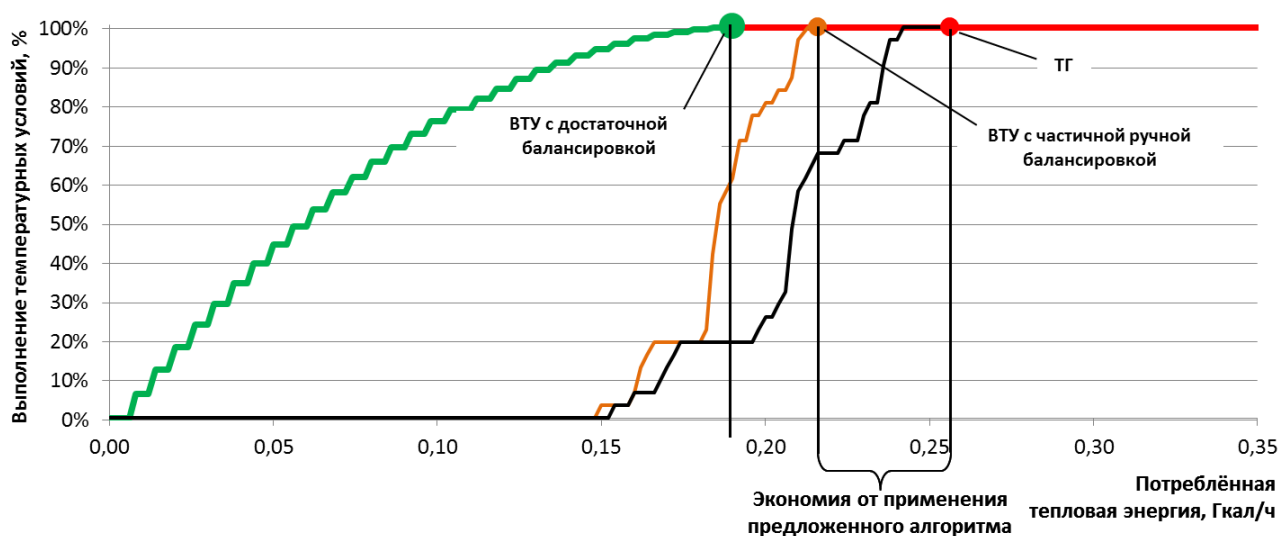


Рисунок 4.22 – Графики зависимости количества взвешенных выполненных температурных условий от количества тепловой энергии, подаваемой в здание корпуса 2АТ

Фактическая экономия тепловой энергии и повышение количества выполненных температурных условий, полученные в результате эксплуатации разработанной автоматизированной системы на базе сенсорных сетей с использованием предложенных алгоритмов распределенного управления отоплением здания учебно-лабораторного корпуса 2АТ, подтверждены актом внедрения, приведённом в Приложении А.

4.3.6. Анализ энергоэффективности и качества теплоснабжения здания

С использованием предложенного в работе алгоритма был проведен анализ эффективности функционирования системы управления отоплением здания, на примере корпуса 3БВ ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». На рисунке 4.23 представлены графики температуры помещений, количества помещений с выполненными температурными условиями и оценки экономии тепловой энергии при различных подходах к управлению. На рисунке 4.24 представлена гистограмма выполнения нижних и верхних границ температурных условий при различных подходах к управлению.

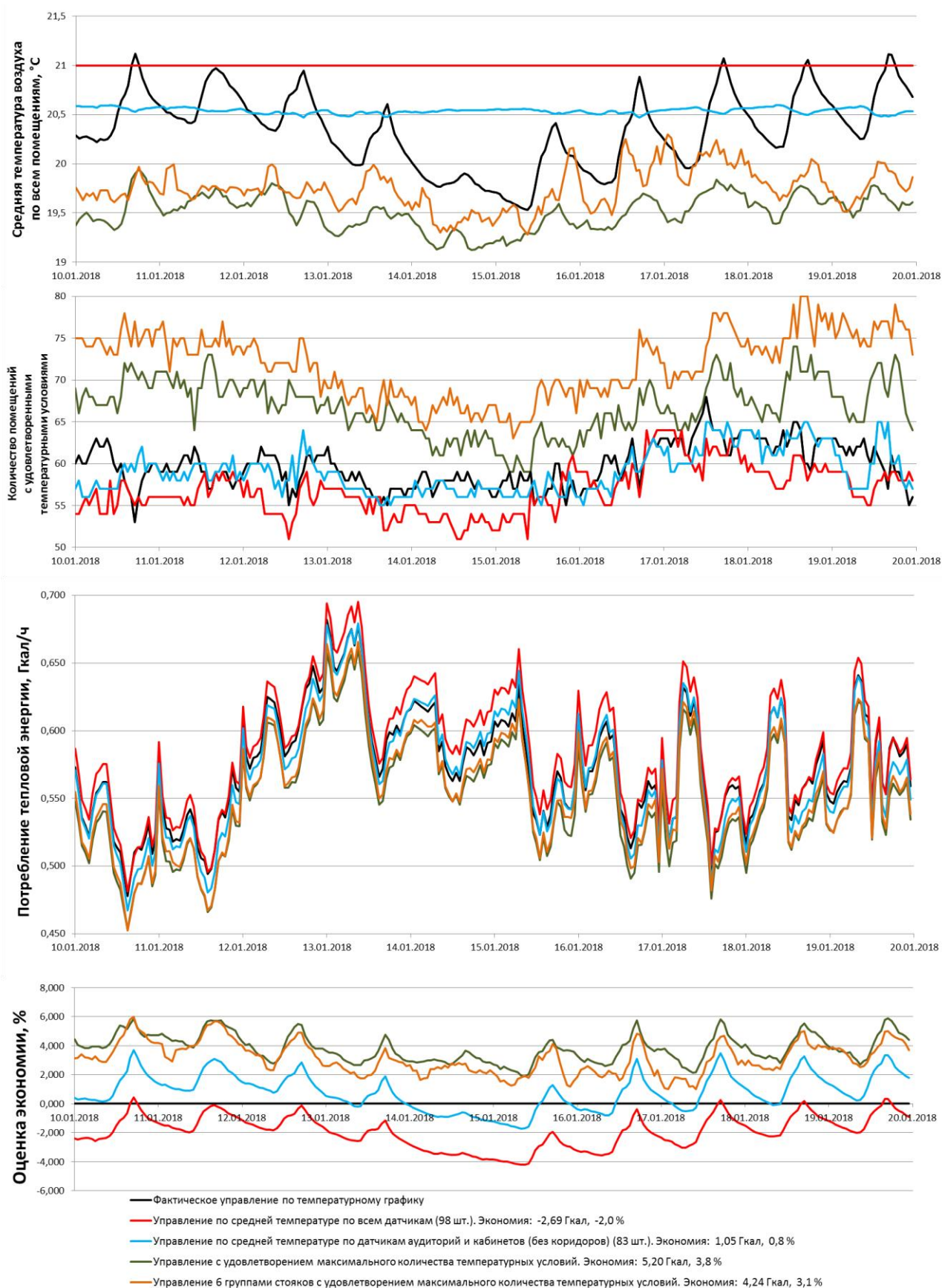


Рисунок 4.23 – Графики выполнения температурных условий помещений и потребления тепловой энергии при различных подходах к управлению

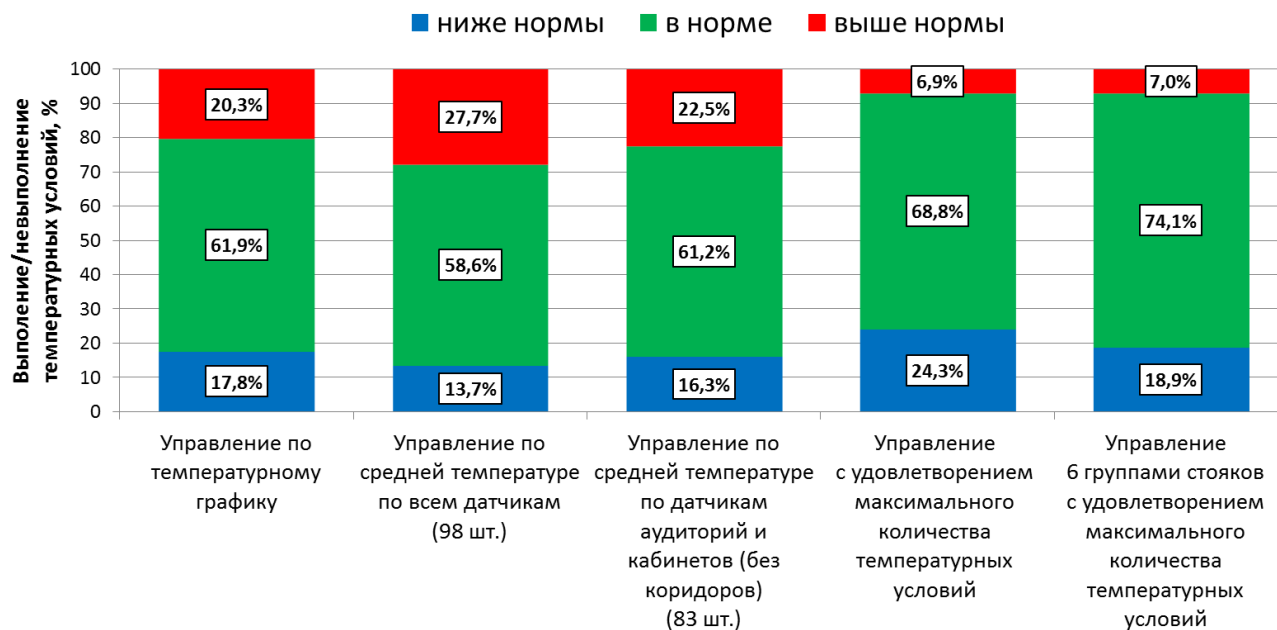


Рисунок 4.24 – Гистограмма выполнения температурных условий при различных подходах к управлению

На представленных графиках рисунка 4.23 в качестве базового уровня принято фактическое управление температурой подаваемого теплоносителя по температурному графику в зависимости от температуры наружного воздуха (черная линия). Далее рассмотрен вариант поддержания средней температуры помещений по всем датчикам (красная линия). В качестве задания принято среднее значение ($21\text{ }^{\circ}\text{C}$) допустимого диапазона температур помещений административных зданий ($19\text{--}23\text{ }^{\circ}\text{C}$) согласно СП 2.1.2.3358-16 [78]. Здесь рассмотрен идеализированный вариант, когда удастся поддерживать среднюю температуру на заданном уровне. Связи РОУ, определяющие зависимость между заданием средней температуры и температурами отдельных помещений, идентифицированы на основе показаний сенсорной сети температур помещений. Также на рисунке 4.23 рассмотрен режим поддержания на указанном уровне ($21\text{ }^{\circ}\text{C}$) среднего значения температур только для лекционных аудиторий и рабочих кабинетов при поддержании среднего значения, равного $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ (синяя линия). Зеленым цветом показаны графики режима с формированием задания на среднюю температуру помещений по критерию удовлетворения максимального количества температурных условий в соответствии с задачей (2.3)-(2.4) с

управлением температурой подаваемого теплоносителя на АИТП. Оранжевым цветом показаны графики режима с формированием задания на среднюю температуру помещений по критерию удовлетворения максимального количества температурных условий в соответствии с задачей (2.3)-(2.4) с возможностью дополнительного индивидуального управления шестью группами стояков.

Анализ полученных результатов показывает, что:

1) учет помещений с более низким температурным диапазоном приводит к повышению задания средней температуры помещений, и, как следствие, «перетопу» помещений зданий в целом и перерасходу тепловой энергии;

2) из-за наличия различных факторов теплопотребления, приводящих к разбросу температур воздуха в помещениях внутри здания, в существующем режиме управления по температурного графику, а также в режимах с поддержанием среднего значения температур помещений, наблюдается снижение количества помещений с выполненными температурными условиями по сравнению с предложенным в работе режимом управления температурой помещений по критерию максимума количества выполненных температурных условий. Использование предложенного алгоритма при регулировании температуры теплоносителя на АИТП позволяет достичь 68,8% выполненных температурных условий. При этом выявленный потенциал экономии тепловой энергии составляет около 3,8% от базового уровня. В результате для относительно небольшого количества помещений (6,5 %), температуры которых находились на границе нижнего диапазона температурных условий, при выборе задания на управление температурные условия могут быть нарушены, но за счет этого появится возможность для большего количества помещений (13,4 %) с «перетопами» выполнить температурные условия. Для помещений, вышедших за нижний диапазон температур, рекомендуется провести энергосберегающие мероприятия или произвести балансировку системы отопления;

3) при использовании предложенного алгоритма с возможностью дополнительного индивидуального управления шестью группами стояков на рисунке 4.24 наблюдается уменьшение количества помещений с нарушенными нижними границами температурных условий на 5,4%. Однако количество нарушений верхних температур помещений возросло на 0,1%. При этом на рисунке 4.23 на всем временном интервале наблюдается снижение экономии в среднем на 0,7% по сравнению с режимом с управлением только температурой подаваемого теплоносителя на АИТП. Это означает, что оставшиеся «перетопы» не могут быть устранены за счет индивидуального управления существующими в здании 6 группами стояков. Уменьшение количества «недотопленных» помещений связано с тем, что в некоторых группах было повышено количество потребляемой энергии для повышения температуры в этих помещениях. При этом были повышены температуры в других помещениях этих групп, но, в общем, в пределах заданных для них температурных условий. В результате оценка количества выполненных температурных условий составила 74,1%. Для устранения оставшихся нарушений температурных условий необходимо принимать меры, связанные с точечным перераспределением тепловой энергии и выполнять соответствующие энергосберегающие мероприятия.

Полученные результаты объясняются тем, что в здании присутствуют в значительном количестве помещения с «перетопом» и относительно небольшое количество помещений с пониженной температурой. В результате подбора максимально совместной системы отдельные помещения со значительно заниженными температурами исключаются из решения в рамках предложенного алгоритма. Температуры воздуха остальных помещений понижаются из-за снижения задания средней температуры, включающей преобладающее количество помещений с повышенной температурой воздуха, относительно других помещений в максимально совместной подсистеме. Снижение выполняется до уровня, соответствующего максимальному количеству выполненных температурных условий. Идентифицированные таким образом

помещения с пониженной температурой воздуха формируют приоритетный перечень объектов для проведения энергосберегающих мероприятий.

На основании полученных результатов составлен рейтинг помещений по возможности выполнения температурных условий для различных алгоритмов управления (рисунок 4.25).

Помещения на рисунке 4.25 отсортированы по длительности выполнения температурных условий для алгоритма управления с удовлетворением максимального количества температурных условий. При этом на графике для некоторых помещений длительность выполнения температурных условий при работе по предложенному алгоритму управления меньше, чем при работе других алгоритмов. Это связано со снижением задания средней температуры с целью удовлетворения максимального количества температурных условий.

Для выявления причин нарушения нижних границ температурных условий в некоторых помещениях могут быть использованы результаты тепловизионной съемки, выполненной в ходе проведения энергоаудита зданий ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». На рисунке 4.26 в качестве примера представлены температуры помещений аудиторий 250 и 902, в которых нарушаются нижние границы температурных условий.

В выделенных фрагментах показаны оконные проемы рассматриваемых аудиторий. Цветовая температура в зонах оконных рам этих аудиторий значительно выше, чем в аналогичных зонах большинства других аудиторий. Это говорит о повышенной инфильтрации в этих помещениях при невысоких внутренних теплопоступлениях. Таким образом, в данных помещениях необходимо проведение энергосберегающих мероприятий по устранению зон проникновения наружного воздуха в помещения.

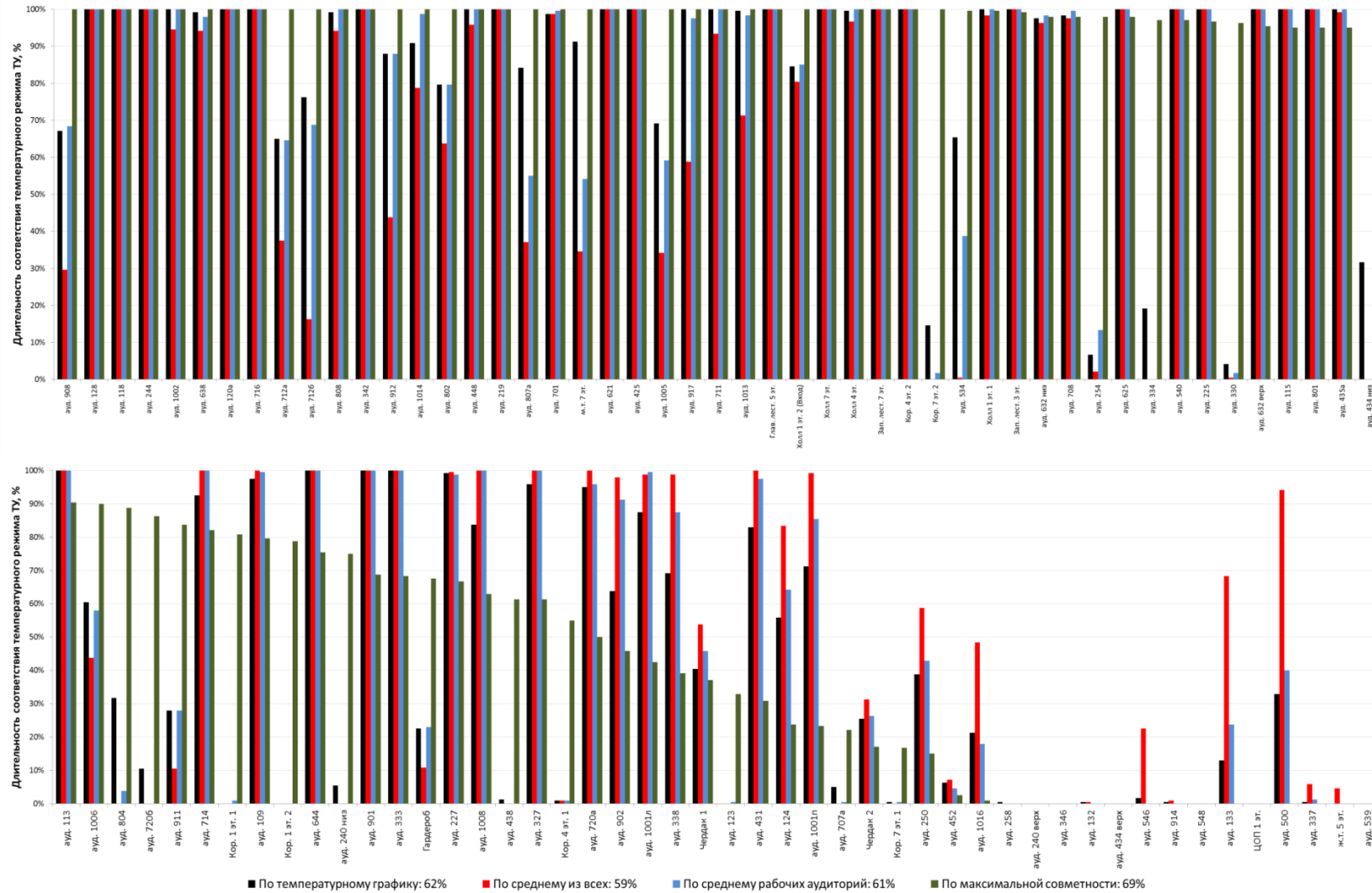


Рисунок 4.25 – Рейтинг помещений по возможности выполнения температурных условий для различных алгоритмов управления

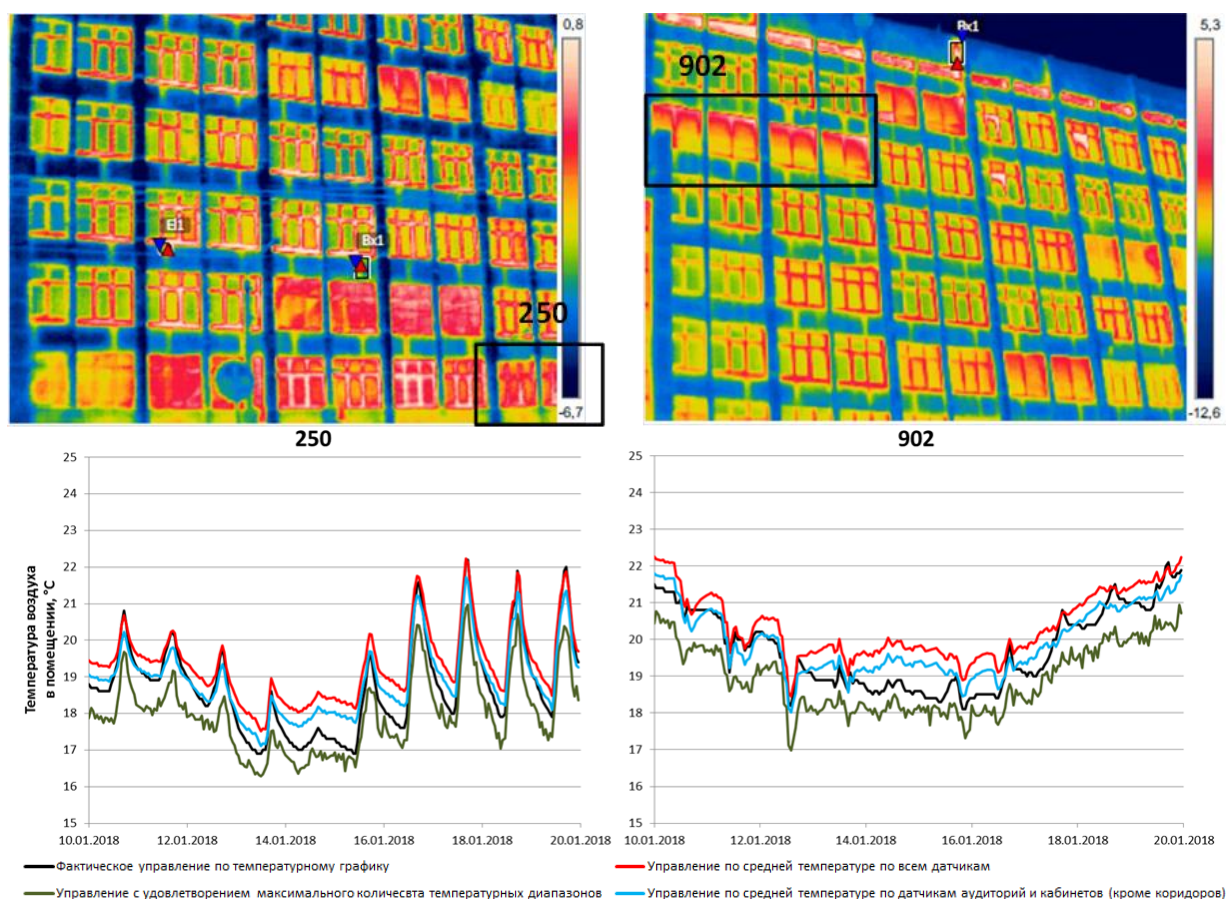


Рисунок 4.26 – Температуры помещений аудиторий 250 и 902, в которых нарушаются нижние границы температурных условий

4.3.7. Оценка потенциала экономии от применения предложенного алгоритма для семи корпусов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

В работе выполнен расчет потенциала энергосбережения при применении предложенного алгоритма управления для семи учебно-лабораторных корпусов, где был развернуты беспроводные сенсорные сети температур воздуха помещений: 2АК, 2АТ, 3А, 3БВ, 3Г, 3Д и здание факультета валеологии. Для каждого объекта с использованием указанного алгоритма было рассчитано задание средней температуры воздуха помещений, при которой в максимальном количестве помещений были бы выполнены температурные условия. Нормативные диапазоны температур помещений составляют: для аудиторий и кабинетов – 19-23 °С; для коридоров – 14-20 °С.

На рисунке 4.27 представлены расчетные графики выполнения температурных условий до и после применения предложенного алгоритма. В рассматриваемом периоде с 01.02.2018 по 31.03.2018 для каждого здания слева представлено фактическое значение выполненных температурных условий за рассматриваемый период, достигаемое при применяемом режиме управления по температурному графику. Для каждого здания справа представлен расчет выполнения температурных диапазонов в случае применения предложенного алгоритма управления при регулировании температуры теплоносителя на АИТП. По результатам модельного эксперимента количество выполненных температурных условий повысилось для каждого здания: для УЛК 2АК – с 39,1% до 82,4%, УЛК 2АТ – с 38,0% до 66,6%, УЛК 3А – с 38,5% до 65,4%, УЛК 3БВ – с 44,5% до 76,5%, УЛК 3Г – с 31,7% до 58,3%, УЛК 3Д – с 17,5% до 81,9%, УЛК факультета валеологии – с 20,0% до 70,8%.

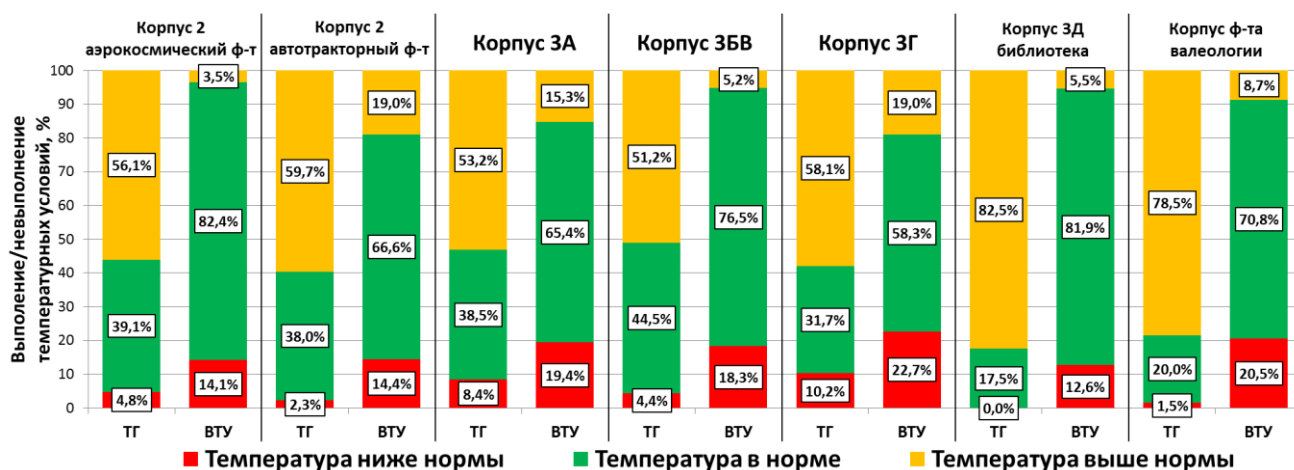


Рисунок 4.27 – Гистограмма сравнения выполнения температурных условий при управлении по температурному графику (ТГ) и с применением предложенного алгоритма управления по критерию максимума выполненных температурных условий (МК ВТУ)

В соответствии с выявленными нарушениями верхних и нижних границ температурных условий, указанных на рисунке 4.27, далее в модельном эксперименте было произведено перераспределение тепловой энергии из

помещений с завышенной температурой воздуха в помещения с заниженной температурой воздуха.

На основе данных эксплуатации построена регрессионная модель для периода с 01.02.2018 по 31.03.2018. Выход модели – потребление тепловой энергии. Независимой переменной модели является разность средней температуры помещений и температуры наружного воздуха.

Для каждого момента времени (часа) рассматриваемого периода с использованием указанной модели было рассчитано потребление с заданием средней температурой помещений, рассчитанной с использованием указанного алгоритма, и соответствующая экономия в процентах от фактического потребления. На основании проведенных расчетов были построены зависимости экономии (%) от температуры наружного воздуха (рисунок 4.28).

С использованием статистики фактического потребления, температуры наружного воздуха в отопительном периоде с 15.10.17 по 15.04.18 и полученных зависимостей экономии от температуры наружного воздуха была оценена потенциальная экономия тепловой энергии при использовании предложенного алгоритма на указанном отопительном периоде. Фактическая средняя температура наружного воздуха для отопительного периода с 15.10.17 по 15.04.18 составила $-7,3$ °С. График итогового потенциала экономии представлен на рисунке 4.29. График построен с учетом перераспределения тепловой энергии между помещениями с невыполненными температурными условиями.

В случае недостатка тепловой энергии после балансировки «недотопленных» и «перетопленных» помещений требуемое количество тепловой энергии отнималось (заштрихованная область на белом фоне) от возможной экономии. В случае избытка тепловой энергии после балансировки «недотопленных» и «перетопленных» помещений высвобождаемое количество тепловой энергии добавлялась (заштрихованная область на зеленом фоне) к возможной экономии. Суммарный уровень экономии характеризуется зеленой областью и дополнительно отмечен горизонтальной чертой для каждого здания.

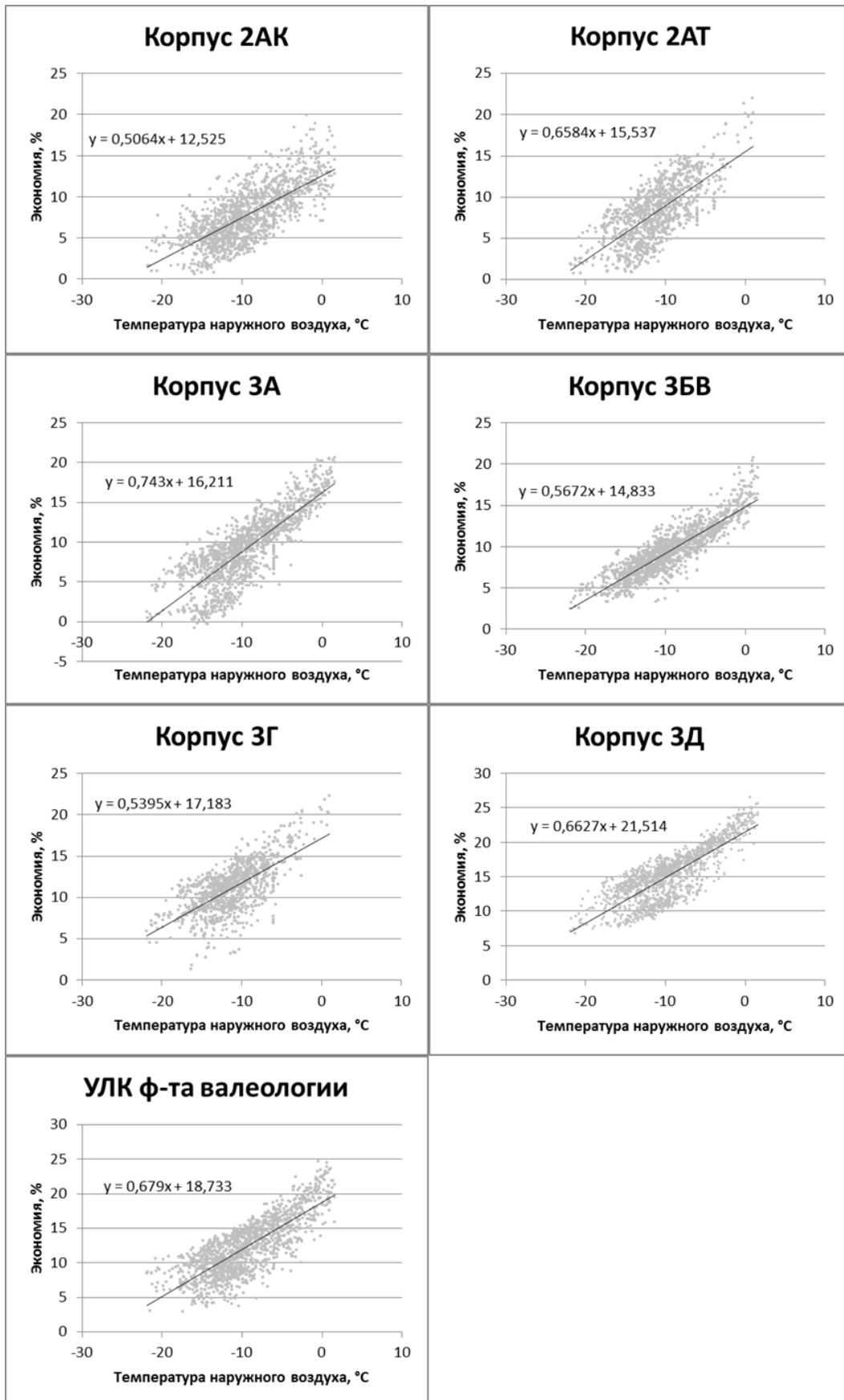


Рисунок 4.28 – Зависимости потенциала экономии от температуры наружного воздуха

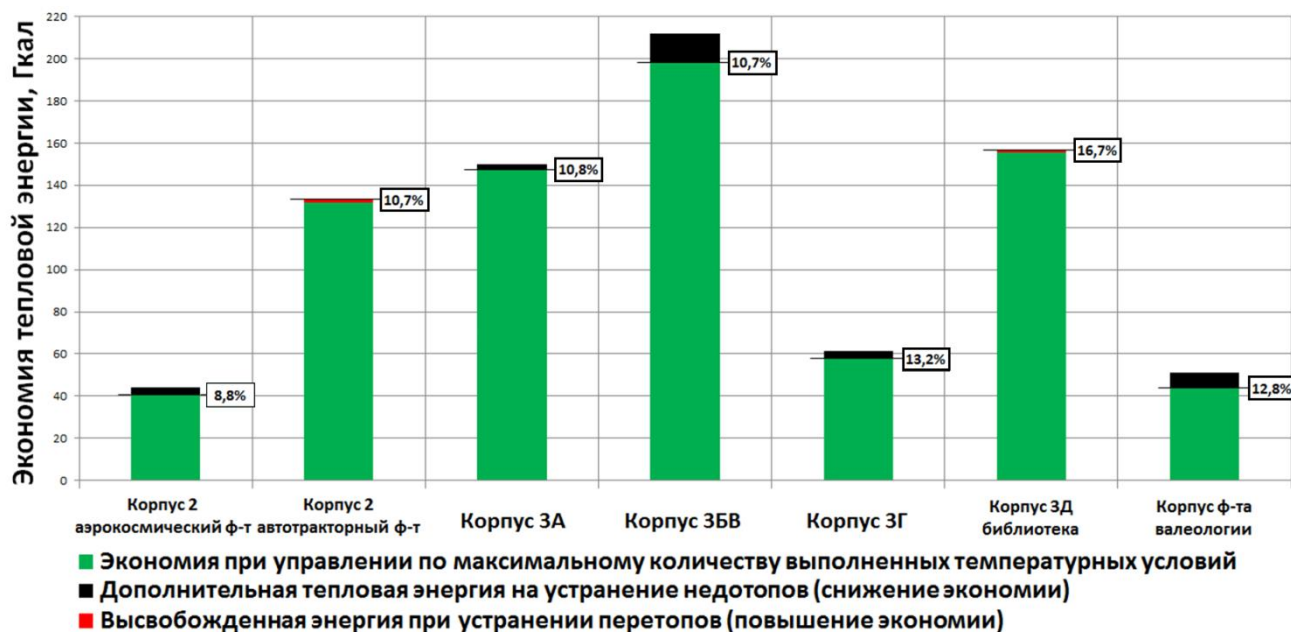


Рисунок 4.29 – График экономии тепловой энергии с учетом перераспределения тепловой энергии между «недотопленными» и «перетопленными» помещениями

Итоговая оценка экономии представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Потенциал экономии тепловой энергии при использовании предложенного алгоритма

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%
3БВ	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%

Выводы к главе 4

1. Для контроля, анализа и управления теплоснабжением университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» разработана и введена в эксплуатацию автоматизированная система управления теплоэнергетическим комплексом на базе сенсорных сетей. В зданиях корпусов УЛК 2АК, УЛК 2АТ, УЛК 3А, УЛК 3БВ, УЛК 3Г, УЛК 3Д, УЛК факультета валеологии в соответствии с предложенной схемой расстановки температурных датчиков установлены 250 беспроводных датчиков температур воздуха помещений. В здании корпуса 3БВ дополнительно установлены 64 беспроводных датчиков температуры обратного теплоносителя.

2. Для решения задач оперативного управления режимными параметрами теплоэнергетического комплекса университетского городка разработана имитационная макромоделю с различными видами источников и потребителей тепловой энергии. Параметры макромоделю идентифицированы с использованием показаний сенсорных сетей. С помощью разработанной имитационной макромоделю произведены модельные эксперименты, подтверждающие корректность работы алгоритма оперативного управления централизованной системой теплоснабжения зданий в дефицитном режиме.

3. В рамках работ по реализации предложенного метода управления проведены активные эксперименты по идентификации динамических параметров объектов управления. На основании проведенной идентификации динамических связей РОУ по данным сенсорных сетей был выполнен активный эксперимент по реализации предложенного алгоритма управления зданием УЛК 2АТ. В результате эксперимента экономия тепловой энергии составила 16,5%. При этом количество помещений в здании с выполненными нормативными диапазонами температур воздуха было повышено с 34% до 56% от общего количества контролируемых помещений.

4. Выполнен анализ энергоэффективности и качества теплоснабжения здания УЛК 3БВ. Составлен рейтинг помещений по возможности выполнения температурных условий для различных алгоритмов управления. Составленный рейтинг показал, что при использовании предложенного алгоритма количество выполненных температурных условий увеличится по сравнению с применяемыми алгоритмами управления. При этом для устранения оставшихся помещений с невыполненными температурными условиями необходимо провести энергосберегающие мероприятия или мероприятия по балансировке системы отопления.

5. С использованием предложенного алгоритма управления по критерию максимального количества помещений с выполненными температурными условиями произведена оценка потенциала энергосбережения для семи объектов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»: УЛК 2АК, УЛК 2АТ, УЛК 3А, УЛК 3БВ, УЛК 3Г, УЛК 3Д, УЛК факультета валеологии. Выявленный потенциал экономии от внедрения разработанных методов управления составил 11,3%.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллин, В. В. Подход к оперативному анализу эффективности теплоснабжения зданий [Текст] / В. В. Абдуллин, Д. А. Шнайдер, А. А. Басалаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» – 2011. – Вып. 13. – №2 (219). – С. 70–73.
2. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления [Текст] / С. А. Чистович, В. К. Аверьянов, Ю. Я. Темпель, С. И. Быков. – Ленинград : Стройиздат, Ленингр. отд., 1987. – 248 с.
3. Автоматическое регулирование систем отопления с применением регулятора Т-48 [Текст] / М. М. Грудзинский, В. И. Ливчак, В. И. Медведь, А. А. Чугункин, Л. Ф. Куклик, Н. И. Коровин // Водоснабжение и санитарная техника. – 1980. – № 1. – С. 23–26.
4. Андрющенко, А. И. Оптимизация тепловых циклов и процессов ТЭС [Текст] / А. И. Андрющенко, А. В. Змачинский, В. А. Понятов. – М. : Высш. шк., 1974. – 279 с.
5. Апарцев, М. М. Наладка водяных систем централизованного теплоснабжения: Справочно-методическое пособие [Текст] / М.М. Апарцев. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 204 с.
6. Байтингер, Н. М. «Система оптимального теплопотребления» как пример реализации модели «энергоэффективного здания» в рамках концепции «интеллектуальное здание» [Текст] / Н. М. Байтингер, В. В. Бурцев // Проектирование и строительство в Сибири. – 2003. – №1. – С. 57–58.
7. Басалаев, А. А. Автоматизированный энергоменеджмент теплоэнергетического комплекса университетского городка [Текст] / А. А. Басалаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15. – № 4. – С. 26–32.
8. Басалаев, А. А. Метод оптимизации температуры подаваемого теплоносителя в системе централизованного теплоснабжения зданий на основе

имитационного моделирования [Текст] / А. А. Басалаев, Д. А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» – 2017. – Т. 17. – № 1. – С. 15–22.

9. Басалаев, А. А. Метод расчета норм потребления технической воды для металлургических предприятий [Текст] / А. А. Басалаев, Л. С. Казаринов, Д. А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» – 2014. – Т. 14. – № 4. – С. 99–106.

10. Басалаев, А. А. Модель системы энергоэффективного теплоснабжения зданий [Текст] / А. А. Басалаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» – 2012. – № 23. – С. 216–218.

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

12. Басалаев, А. А. Поддержка принятия решений и мониторинг эффективности энергосберегающих проектов в системах тепло-, водоснабжения на основе ПТК «ПолиТЭР» [Текст] / А. А. Басалаев, Д. А. Шнайдер // XV всероссийское совещание по энергосбережению. IX техническая конференция «Автоматизация инженерных систем», сборник докладов и статей, 15-16 апреля 2015 г. – Екатеринбург: ООО ПК «Артикул», 2015. – С. 80–82.

13. Басалаев, А. А. Распределенное имитационное моделирование систем теплоснабжения [Текст] / 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. 55–58.

14. Басалаев, А. А. Распределенное имитационное моделирование системы теплоснабжения зданий в среде Vissim [Текст] / А. А. Басалаев //

Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 82–87.

15. Благих, В. Т. Пофасадное местное управление водяными системами теплоснабжения [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.273 / Благих Владимир Тимофеевич. – Челябинск, 1971. – 28 с.

16. Богословский, В. Н. Тепловой режим здания [Текст] / В. Н. Богословский. – М. : Высшая школа, 1979. – 246 с.

17. Богословский, В. Н. Отопление и вентиляция [Текст] / В. Н. Богословский, В. П. Щеглов, Н. Н. Разумов. – М. : Стройиздат, 1980. – 295 с.

18. Бурцев, В. В. Математическая модель управления тепловым режимом современного здания [Текст] / В. В. Бурцев, М. И. Ершова // Проектирование и строительство в Сибири. – 2002. – №4. – С. 23–24.

19. Волов, Г. Я. Моделирование гидравлических сетей [Электронный ресурс] / Г. Я. Волов. – Режим доступа: <http://www.energovent.com/images/19.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.

20. Волов, Г. Я. МОДЭН изнутри [Электронный ресурс] / Г. Я. Волов. – Режим доступа: <http://www.energovent.com/images/71.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.

21. Волов, Г. Я. Энергосбережение и имитационное моделирование [Электронный ресурс] / Г. Я. Волов. – Режим доступа: <http://www.energovent.com/images/46.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.

22. Вульман, Ф. А. Применение модульного принципа для описания задач математического моделирования теплоэнергетических установок [Текст] / Ф. А. Вульман, Н. С. Хорьков, Л. М. Куприянова // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1978. – № 4. – С. 129–136.

23. Вульман, Ф. А. Тепловые расчеты на ЭВМ теплоэнергетических установок [Текст] / Ф. А. Вульман, Н. С. Хорьков. – М. : Энергия, 1975. – 200 с.

24. Вульман, Ф. А. Математическое моделирование тепловых схем паротурбинных установок на ЭВМ [Текст] / Ф. А. Вульман, А. В. Корягин, М. З. Кривошей. – М. : Машиностроение, 1985. – 111 с.

25. Выбор оптимального состава оборудования промышленно-отопительных ТЭЦ [Текст] / Е. Я. Соколов, А. И. Корнеичев, Е. Г. Скловская, М. О. Фридман // Теплоэнергетика. – 1970. – №10. – С. 25–28.

26. Гилюс, А. Экспериментальные исследования тепловых вводов многоквартирных зданий [Электронный ресурс] / А. Гилюс, Э. Исявичюс // АВОК. – 2003. – №3. – Режим доступа: http://tgv.khstu.ru/lib/artic/abok/2003/3/8/3_8.html, свободный. – Загл. с экрана.

27. Гойтина, Е. В. Автоматизированное управление режимами тепловых сетей на основе макро моделирования [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Гойтина Екатерина Владимировна. – Челябинск, 2008. – 125 с.

28. Голованчиков, А. Б. Разработка и исследование моделей структуры потоков для высоковязких и неньютоновских жидкостей [Текст] : дис. ... д-ра тех. наук : 05.17.08 / Голованчиков Александр Борисович. – М., 1983. – 405с.

29. Голяк, С. А. Уточнение параметров теплового баланса зданий с системами радиационно-конвективного отопления [Текст] / С. А. Голяк, В. В. Пятачков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2010. – № 2. – С. 41–44.

30. Горнштейн, В. М. Методы оптимизации режимов энергосистем [Текст] / В. М. Горнштейн, Б. П. Мирошниченко, А. В. Пономарев. – М. : Энергоиздат, 1981. – 336 с.

31. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях [Текст]. – Взамен ГОСТ 30494–96; введ. 2013–01–01. – М. : Стандартинформ, 2013. – 23 с.

32. ГОСТ Р ИСО 50001–2012. Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению [Текст]. – Введ. 2012–12–01. – М. : Стандартинформ, 2012. – 60 с.

33. Гринёв, А. В. Комбинированный метод расчёта норм потребления топливно-энергетических ресурсов [Текст] / А. В. Гринёв // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – №6. – С. 42–44.

34. Гринёв, А. В. Эволюция системы нормирования ТЭР предприятия [Текст] / А. В. Гринёв // Электрика. – 2009. – № 4. – С. 23–26.

35. Громов, Н. К. Водяные тепловые сети. Справочное пособие по проектированию [Текст] / Н. К. Громов, Е. П. Шубин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 376 с.

36. Грудзинский, М. М. Отопительно-вентиляционные системы зданий повышенной этажности [Текст] / М. М. Грудзинский, В. И. Ливчак, М. Я. Поз. – М. : Стройиздат, 1982. – 255 с.

37. Данилов, Ю. М. Численное решение стационарных уравнений гидродинамики в области течения [Текст] / Ю. М. Данилов // ИВУЗ. Авиационная Техника. – 1980. – № 3. – С. 42–45.

38. Демченко, В. А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС [Текст] / В. А. Демченко. – Одесса : Астропринт, 2001. – 306 с.

39. Зингер, Н. М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем [Текст] / Н. М. Зингер. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 320 с.

40. Зингер, Н. М. Повышение эффективности работы тепловых пунктов [Текст] / Н. М. Зингер, В. Г. Бестолченко, А. А. Жидков. – М. : Стройиздат, 1990. – 188 с.

41. Зингер, Н. М. Система автоматического регулирования расхода теплоты на отопление в центральных тепловых пунктах открытых систем теплоснабжения [Текст] / Н. М. Зингер, В. Г. Бестолченко, Г. М. Захаров // Теплоэнергетика. – 1982. – № 5. – С. 67–70.

42. Имитационное моделирование для инженерных систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.energovent.narod.ru/articles/sting.htm>, свободный. – Загл. с экрана.

43. Исследование динамических характеристик элементов автоматизации умного дома по параметрическим структурным схемам [Текст] / В. М. Зарипова, И. Ю. Петрова, К. А. Шумаков, Ю. А. Лежнина // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12. – № 12 (111). – С. 1424–1434.

44. Казаринов, Л. С. Системные исследования и управление: когнитивный подход [Текст] : науч.-метод. пособие / Л. С. Казаринов. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ : Издатель Т. Лурье, 2011. – 523 с.

45. Карпенко, А.В. Модели управления микроклиматом в помещении [Текст] / А.В. Карпенко, И.Ю. Петрова // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 7-2. – С. 224–229

46. Кафаров, В. В. Оптимизация теплообменных процессов и систем [Текст] / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин, Л. В. Гурьева. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.

47. Клер, А. М. Математическое моделирование и оптимизация в задачах оперативного управления тепловыми электростанциями [Текст] / А. М. Клер, Н. П. Деканова, С. К. Скрипкин и др. – Новосибирск : Наука. Сиб. издат. фирма РАН, 1997. – 120 с.

48. Клер, А. М. Методы оптимизации сложных теплоэнергетических установок [Текст] / А. М. Клер, Н. П. Деканова, Т. П. Щеголева и др. – Новосибирск : ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1993. – 116 с.

49. Клиначёв, Н. В. Моделирование систем в программе VisSim [Электронный ресурс] : Справочная система / Н. В. Клиначёв. – Режим доступа: <http://model.exponenta.ru/help/vissim.htm>, свободный. – Загл. с экрана.

50. Ковальногов, Н. Н. Автоматизированная система оптимизации теплопотребления учебного заведения [Текст] / Н. Н. Ковальногов. – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – 46 с.

51. Ковальногов, Н. Н. Оценка эффективности использования автоматизированной системы управления теплопотреблением главного корпуса

УлГТУ [Текст] / Н. Н. Ковальногов, А. С. Ртищева // Вестник УлГТУ. – 2005. – №2. – С. 55–57.

52. Крицкий, Г. Г. Эффективные решения для систем теплоснабжения [Текст] / Г. Г. Крицкий, А. А. Аширов // Теплоэнергетика. – 2004. – №10. – С. 66–69.

53. Левенталь, Г. Б. Оптимизация теплоэнергетических установок [Текст] / Г. Б. Левенталь, Л. С. Попырин. – М. : Энергия, 1970. – 352 с.

54. Ливчак, В. И. К нормированию потребления тепла на отопление и вентиляцию жилых и административных зданий [Электронный ресурс] / В. И. Ливчак // Энергосбережение. – 1999. – №5. – Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=86, свободный. – Загл. с экрана.

55. Ливчак, В. И. Расчет теплоснабжения эксплуатируемых жилых зданий – основа энергосбережения [Электронный ресурс] / В. И. Ливчак // АВОК. – 2005. – №7. – Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3013, свободный. – Загл. с экрана.

56. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса [Текст] / В. И. Полежаев, А. В. Бунэ, Н. А. Везуб [и др.]. – М. : Наука, 1987. – 270с.

57. Математическое моделирование энергосистем зданий с нулевым энергопотреблением [Текст] / И. Д. Калякин, А. А. Ашихмина, И. А. Султангузин, А. В. Федюхин, Ю. В. Яворовский // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования металлургических печей; труды VIII Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 295–299.

58. Матросов, Ю. А. Стратегия по нормированию теплозащиты зданий с эффективным использованием энергии [Электронный ресурс] / Ю. А. Матросов, И. Я. Бутовский // Экологические системы. – 2002. – №3. – Режим доступа: http://esco-ecosys.narod.ru/2002_3/art16.htm, свободный. – Загл. с экрана.

59. Мелентьев, Л. А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики [Текст]: 2-е изд., доп. и перераб. / Л. А. Мелентьев. – М. : Высш. школа, 1982. – 320 с.

60. Мелентьев, Л. А. Системные исследования в энергетике [Текст] / Л. А. Мелентьев. – М. : Наука, 1983. – 456 с.

61. Меренков, А. П. Математические модели и методы для анализа и оптимального проектирования трубопроводных систем [Текст] : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 05.13.03 / Меренков Анатолий Петрович. – Новосибирск, 1975. – 34 с.

62. Меренков, А. П. Методы комплексной оптимизации тепловых сетей с применением электронных вычислительных машин [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.03 / Меренков Анатолий Петрович. – Новосибирск, 1963. – 13 с.

63. Меренков, А. П. Теория гидравлических цепей [Текст] / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев. – М. : Наука, 1985. – 279 с.

64. Методические рекомендации по расчету температурного режима отапливаемых помещений при переменных тепловых воздействиях [Текст]. – М. : АКХ им. К.Д. Памфилова, 1982. – 46 с.

65. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей [Текст] / В. Я. Хасилев, А. П. Меренков, Б. М. Каганович [и др.]. – М. : Энергия, 1978. – 176 с.

66. Моделирование энергоэффективных индивидуальных домов с помощью пакетов DesignPH и PHPP [Текст] / И.Д. Калякин, А.А. Ашихмина, И.А. Султангузин, А.В. Федюхин // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России Материалы 17-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов / под общей редакцией Е.Б. Агапитова. – 2016. – С. 189–190.

67. Мызников, А. М. Моделирование и идентификация параметров сложных гидравлических сетей [Текст] : дис. канд. физ.-мат. наук : 05.13.18 / Мызников Алексей Михайлович. – М. : РГБ, 2006. – 116 с.

68. Ноздренко, Г. В. Алгоритмическое и программное обеспечение задач распределения нагрузки между энергоустановками ТЭЦ [Текст] / Г. В. Ноздренко, Е. Б. Корытный, О. П. Алексеенко // Экономичность и оптимизация режимов энергосистем. – Новосибирск : НЭТИ, 1984. – С. 75–84.

69. Панферов, В. И. К теории математического моделирования теплового режима зданий [Текст] / В. И. Панферов, А. Н. Нагорная, Е. Ю. Пашнина // Вестник ЮУрГУ Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2006. – Вып. 4. – №16 (69). – С. 128–133.

70. Панферов, В. И. Математическая модель теплового режима зданий [Текст] / В. И. Панферов, А. Н. Нагорная, Е. Ю. Пашнина // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: тез. докл. 5-й Всероссийской научно-техн. конф. – Магнитогорск : МГТУ, 2004. – С. 23.

71. Панферов, В. И. О структуре математической модели теплового режима здания [Текст] / В. И. Панферов, А. Н. Нагорная, Е. Ю. Пашнина // VIII Международная науч.-практич. конф.: Экология и жизнь: сб. науч. тр. – Пенза, 2005. – С. 135–138.

72. Петрова, И. Ю. Проектирование информационно-измерительных и управляющих систем для интеллектуальных зданий. направления дальнейшего развития [Текст] / И. Ю. Петрова, В. М. Зарипова, Ю. А. Лежнина // Вестник МГСУ. – 2015. – № 12. – С. 147–159.

73. Попырин, Л. С. Автоматизация математического моделирования теплоэнергетических установок [Текст] / Л. С. Попырин, В. И. Самусев, В. В. Эпельштейн. – М. : Наука, 1981. – 236 с.

74. Разработка автоматизированной системы регулирования теплоснабжения зданий с изменяемым сопротивлением теплопередаче окон [Текст] / В. В. Тютиков, А.А. Яблоков, Н. Н. Смирнов, Д. А. Лапатеев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 11 (172) . – С. 199–213.

75. Рекомендации по применению средств автоматического регулирования систем отопления и горячего водоснабжения эксплуатируемых жилых зданий [Текст]. – М. : ОНТИ АКХ им. К.Д. Памфилова, 1988. – 58 с.

76. Ртищева, А. С. Моделирование тепловых режимов и исследование системы оптимизации теплоснабжения здания [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / Ртищева Алена Сергеевна. – Ульяновск, 2006. – 120 с.

77. Рубашкин, А. С. Методы моделирования технологических процессов, происходящих в энергетическом оборудовании [Текст] / А. С. Рубашкин, В. Л. Вербицкий // Теплоэнергетика. – 2003. – №8. – С. 44–48.

78. Санитарно-эпидемиологические требования к размещению, устройству, оборудованию, содержанию, санитарно-гигиеническому и противоэпидемическому режиму работы организаций социального обслуживания [Текст] : СП 2.1.2.3358–16 : утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 27.05.16 : введ. в действие с 04.09.16. – М. : Межфедеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2017. – 23 с.

79. Сикерин, И. Е. Влияние гидравлического режима сети теплоснабжения на тепловую устойчивость абонентов [Текст] / И. Е. Сикерин, С. А. Голяк // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2010. – № 2. – С. 20–22.

80. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети [Текст] / Е. Я. Соколов. – М. : Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.

81. Статистический анализ данных в системе R [Текст] : Учебное пособие / А.Г. Буховец, П.В. Москалев, В.П. Богатова, Т.Я. Бирючинская; Под ред. проф. Буховца А.Г. – Воронеж: ВГАУ, 2010. – 124 с.

82. Табунщиков, Ю. А. Интеллектуальные здания [Электронный ресурс] / Ю. А. Табунщиков // АВОК. – 2001. – №3. – Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=125, свободный. – Загл. с экрана.

83. Табунщиков, Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий [Текст] / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.

84. Табунщиков, Ю. А. Научные основы проектирования энергоэффективных зданий. [Электронный ресурс] / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач // АВОК. – 1998. – №1. – Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=143, свободный. – Загл. с экрана.

85. Технология открытых систем [Текст] / В. К. Батоврин, В. В. Васютович, Ю. В. Гуляев, А. Б. Петров; под ред. А. Я. Олейникова. – М. : Янус-К, 2004. – 288 с.

86. Туркин, В. П. Автоматическое управление отоплением жилых зданий [Текст] : Опыт стр-ва и эксплуатации жил. фонда в Челябинске / В. П. Туркин. – М. : Стройиздат, 1987. – 189 с.

87. Файда, Е. Л. Регулирование максимума нагрузки в электрических сетях жилых домов с электротеплоснабжением [Текст] / Е. Л. Файда, В. В. Варганов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2005. – № 9 (49). – С. 62–65.

88. Хлебалин, Ю. М. Эксергетический метод выбора экономичного режима совместной работы энергетического оборудования [Текст] / Ю. М. Хлебалин // Изв. вузов, Энергетика. – 1973. – № 4. – С. 48–54.

89. Цынаева, Е. А. Моделирование динамических режимов и исследование автоматизированных систем управления теплоснабжением зданий [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / Цынаева Екатерина Александровна. – Ульяновск, 2008. – 147 с.

90. Шишкин, М. В. Моделирование теплогидравлических систем в среде Vissim [Текст] / М. В. Шишкин, Д. А. Шнайдер // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2004. – Вып. 3. – №9 (38). – С. 120–123.

91. Шнайдер, Д. А. Автоматизация управления системами теплоснабжения промышленных объектов при низкотемпературных режимах

[Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Шнайдер Дмитрий Александрович. – Челябинск, 2003. – 159 с.

92. Шнайдер, Д. А. Автоматизированные системы упреждающего управления по критериям энергетической эффективности (в теплоэнергетических комплексах металлургических предприятий) [Текст] : дис. ... д-ра тех. наук : 05.13.06 / Шнайдер Дмитрий Александрович. – Челябинск, 2011. – 345 с.

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

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

95. 4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems [Текст] / H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J.E. Thorsen, F. Hvelplund, B.V. Mathiesen // Energy. – 2014. – Vol. 68. – P. 1–11.

96. Abdullin, V. V. Identification of Multistorey Building's Thermal Performance Based on Exponential Filtering [Текст] / V. V. Abdullin, D. A. Shnayder, L. S. Kazarinov // Transactions on Engineering Technologies. – Heidelberg; New York; London: Springer Dordrecht, 2015. – P. 69–84.

97. Abdullin, V. V. Model predictive control of building heating process using exponential filtration in harmonic basis [Текст] / V. V. Abdullin, D. A. Shnayder, L. S. Kazarinov // The 21st World-Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Proceedings. Volume II. – 8–11 July, 2017. Orlando, USA. – P. 152–157.

98. Adaptive fuzzy control of thermal comfort in smart houses [Текст] / B. Walek, J. Zacek, M. Janosek, R. Farana // 15th International Carpathian Control Conference, ICC 2014. – P. 675–678.
99. Basalaev, A. A. Simulation Study on Supply Temperature Optimization of University Campus Heating System [Текст] / A. A. Basalaev, T. A. Barbasova, D. A. Shnayder // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 587–594.
100. Carlin, B. Bayesian Methods for Data Analysis [Текст] / B. Carlin, T. Louis. – Boca Raton : CRC Press, 2008. – 552 p.
101. Dahlblom, M. Variations in indoor temperature in residential apartments of different size and building category [Текст] / M. Dahlblom, B. Nordquist, L. Jensen // 10th Nordic Symposium on Building Physics, 15-19 June 2014 Lund, Sweden. – P. 830–837.
102. El-Masri, M. A. GASCAN – An Interactive Code for Thermal Analysis of Gas Turbine Systems [Текст] / M. A. El-Masri // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1988. – Vol. 110. – P. 201–207.
103. Evans, D. The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything [Электронный ресурс] / D. Evans. – Режим доступа: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
104. Fanger, P. O. Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering [Текст] / P. O. Fanger. – New York : McGraw-Hill, 1970. – 244 с.
105. Filimonova, A. A. Heat supply modes optimization based on macromodeling technology [Текст] / A. A. Filimonova, T. A. Barbasova, D. A. Shnayder, A. A. Basalaev // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 111. – P. 710–719.
106. Gelman, A. Bayesian Data Analysis [Текст] / A. Gelman, J. Carlin, H. Stern, D. Rubin. – Boca Raton : CRC Press, 2003. – 696 p.
107. Genetic algorithms optimized fuzzy controller for the indoor environmental management in buildings implemented using PLC and local operating networks

[Текст] / D. Kolokotsa, GS. Stavrakakis, K. Kalaitzakis, D. Agoris // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2002. – № 15. – P. 417–428.

108. Hansen, E. R. Global Optimization Using Interval Analysis [Текст] / E. R. Hansen. – New York : Marcel Dekker, 1992. – 230 p.

109. International Performance Measurement and Verification Protocol. Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings. Volume 1 [Текст] – http://www.coned.com/energyefficiency/PDF/IPMVP%20Vol%201_2010_En.pdf, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

110. Kintner-Meyer, M. Opportunities of wireless sensors and controls for building operation [Текст] / M. Kintner-Meyer, R. Conant // Energy Engineering Journal. – 2009. – № 102 (5). – P. 27–48.

111. Kler, A. M. A system for Computer-Based Creation of Static and Dynamic Mathematical Models of Thermal Power Plants [Текст] / A. M. Kler, V. A. Mai, S. K. Skripkin // Expert System and Computer Simulation in Energy Engineering. – 1992. – P. (22.4.1)–(22.4.3).

112. Kuntze, H.-B. A new fuzzy-based supervisory control concept for the demand-responsive optimization of HVAC control systems [Текст] / H.-B. Kuntze, Th. Bernard // 37th IEEE Conference on Decision and Control. Proceedings. Volume 4. – 16-18 December, 1998. Tampa, USA. – P. 4258–4263.

113. Metzger, C. The Building America Indoor Temperature and Humidity Measurement Protocol [Электронный ресурс] / C. Metzger, P. Norton. – United States : NREL, 2014. – 35 p. – Режим доступа: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61040.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

114. Nemhauser, G. L. Integer and Combinatorial Optimization [Текст] / G. L. Nemhauser, A. L. Wolsey. – Chichester: John Wiley & Sons, 1988. – 763 p.

115. Nuorkivi, A. District heating and cooling policies worldwide [Текст] / A. Nuorkivi // Advanced district heating and cooling (DHC) systems. – Sawston : Woodhead Publishing, 2015. – P. 17–41.

116. On-line learning of indoor temperature forecasting models towards energy efficiency [Текст] / F. Zamora-Martínez, P. Romeu, P. Botella-Rocamora, J. Pardo // *Energy and Buildings*. – 2014. – № 83. – P. 162–172.

117. PÖYRY: DH Network Simulations – Important Tool in Operation and Construction of DHC Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lsta.lt/files/events/2011-05-09-10_EHP%20kongresas/geguzes%2010%20d_pranesimai/16_Poury_DistrictHeatingNetworkSimulations_v3.pdf, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

118. Prud'homme, M. Prediction of Wall Bounded Turbulent Flows with an Improved Reynolds-Stress Model [Текст] / M. Prud'homme, S. Elghobashi // *Proceedings of the IV Symposium on Turbulent Shear Flows*. Karlsruhe. – 1983. – P. 1.7–1.12.

119. Shnaider, D. A. Building Heating Feed-Forward Control Method and Its Application in South Ural State University Academic Building [Текст] / D. A. Shnaider, V. V. Abdullin, A. A. Basalaev // *Transactions on Engineering Technologies*. San Francisco, USA. – P. 69–85.

120. Shnayder, D. A. Building Heating Feed-forward Control Based on Indoor Air Temperature Inverse Dynamics Model [Текст] / D. A. Shnayder, V. V. Abdullin, A. A. Basalaev // *Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science 2014*. Volume II. – 22-24 October, 2014. San Francisco, USA. – P. 886–892.

121. Spencer, B. Forecasting Internal Temperature in a Home with a Sensor Network [Текст] / B. Spencer, F. O. Alfandi // *Procedia Computer Science*. – 2016. – № 83. – P. 1244–1249.

122. Spencer, B. Selecting Sensors when Forecasting Temperature in Smart Buildings [Текст] / B. Spencer, F. Al-Obeidat, O. Alfandi // *Procedia Computer Science*. – 2017. – № 109. – P. 777–784.

123. Takeya, K. Performance of the Integrated Gas and steam Cycle (IGSC) for Reheat Gas Turbine [Текст] / K. Takeya, H. Yasui // *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 1988. – № 2. – P. 220–232.

124. Termis Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.schneider-electric.com/en/product-range/61418-termis-software/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

125. The Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings [Электронный ресурс]. – BRE, 2012. – Режим доступа: http://www.bre.co.uk/filelibrary/SAP/2012/SAP-2012_9-92.pdf, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

126. Zhang, G. Forecasting with artificial neural networks: the state of the art [Текст] / G. Zhang, B. E. Patuwo, M. Y. Hu // International Journal of Forecasting. – 1998. – № 14. – P. 35–62.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор
по административно-хозяйственной
работе и строительству
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»
В.А. Трофимычев
« 07 » _____ 2018 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Басалаева Александра Анатольевича на тему
«Распределенное управление теплоснабжением зданий на основе сенсорных сетей»
в зданиях университетского городка
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университете
(национальный исследовательский университет)»

Комиссия в составе представителей ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»:

- председателя – главного инженера Басарыгина Андрея Геннадьевича,
 - начальника управления энергетики Циulina Александра Николаевича,
 - заместителя начальника управления энергетики Пескова Михаила Александровича,
 - д.т.н., проф., заведующего кафедры АиУ Казаринова Льва Сергеевича,
 - д.т.н., доцента, проф. кафедры АиУ Шнайдера Дмитрия Александровича,
- созданная распоряжением проректора по административно-хозяйственной работе и строительству Трофимычева Вадима Александровича, рассмотрела результаты диссертационной работы Басалаева А.А. на тему: «Распределенное управление теплоснабжением зданий на основе сенсорных сетей».

Комиссия отмечает, что основные результаты диссертационной работы были получены Басалаевым А.А. в рамках приоритетного направления развития «Энергосбережение в социальной сфере» (ПНР-1) Программы развития Национального исследовательского университета ЮУрГУ и Программы «5-100».

Комиссия утвердила следующие выводы и результаты работы:

1. Разработана и введена в эксплуатацию автоматизированная система мониторинга и управления тепловым режимом зданий с использованием беспроводной сенсорной сети датчиков температуры в помещениях зданий университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»:

- учебно-лабораторный корпус 2АК;
- учебно-лабораторный корпус 2АТ;
- учебно-лабораторный корпус 3А;
- учебно-лабораторный корпус 3БВ;
- учебно-лабораторный корпус 3Г;
- учебно-лабораторный корпус 3Д;
- учебно-лабораторный комплекс факультета валеологии.

2. Внедренная автоматизированная система позволяет:

- выполнять в автоматическом режиме сбор, обработку, архивацию, контроль качества отопления зданий с использованием данных 250 беспроводных датчиков температуры воздуха в помещениях и 64 беспроводных датчиков температуры теплоносителя;

- формировать оптимальные задания на температуру подаваемого теплоносителя в здания по критерию выполнения максимального числа температурных технических условий помещений с учетом их значимости согласно действующим нормативам;

- выполнять в интерактивном режиме автоматизированное диспетчерское управление теплотреблением зданий на основании собранной информации посредством дистанционной корректировки параметров автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов зданий и центрального теплового пункта;

- формировать перечни приоритетных помещений зданий для проведения энергосберегающих мероприятий;

- проводить оценку потенциала экономии тепловой энергии с учетом температур воздуха в помещениях зданий и температуры наружного воздуха.

3. Проведена экспериментальная отработка разработанного метода и алгоритма оптимизации температуры подаваемого теплоносителя в автоматизированном индивидуальном тепловом пункте (АИТП) здания корпуса 2АТ по критерию максимального количества помещений с выполненными температурными техническими условиями. В рамках эксперимента с 16.03.2018 проводилась корректировка заданий контроллера АИТП здания корпуса 2АТ. Экономия тепловой энергии составила 0,042 Гкал/ч (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.

4. В результате внедрения автоматизированной системы мониторинга и управления тепловым режимом зданий на объектах университетского городка ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», оборудованных беспроводными датчиками температуры воздуха в помещениях, за период опытно-промышленной эксплуатации с 01.02.2018 по 31.03.2018 с использованием алгоритма управления по критерию максимального количества помещений с выполненными температурными техническими условиями был выявлен следующий потенциал энергосбережения:

- учебно-лабораторный корпус 2АК: 41,1 Гкал (8,8%);
- учебно-лабораторный корпус 2АТ: 133,3 Гкал (10,7%);
- учебно-лабораторный корпус 3А: 147,7 Гкал (10,8%);
- учебно-лабораторный корпус 3БВ: 198,2 Гкал (10,7%);
- учебно-лабораторный корпус 3Г: 58,2 Гкал (13,2%);
- учебно-лабораторный корпус 3Д: 157,0 Гкал (16,7%);
- учебно-лабораторный комплекс факультета валеологии: 43,8 Гкал (12,8%).

Суммарный выявленный потенциал энергосбережения рассматриваемой группы зданий по данным за отопительный сезон 2017-2018 г. составляет в 779,3,1 Гкал (11,3%).

Главный инженер ЮУрГУ



А.Г. Басарыгин

Начальник управления энергетики



А.Н. Циулин

Заместитель начальника управления энергетики



М.А. Песков

Заведующий кафедрой автоматики
и управления ЮУрГУ, проф., д.т.н.



Л.С. Казаринов

Профессор кафедры автоматики
и управления ЮУрГУ, доцент., д.т.н.



Д.А. Шнайдер

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СПРАВКА О СОГЛАСОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
НАУЧНЫХ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ТРУДОВ,
ОПУБЛИКОВАННЫХ В СОВАВТОРСТВЕ**

Справка о согласовании результатов
научных и учебно-методических трудов
Басалаева Александра Анатольевича,
опубликованных в соавторстве

№ п/п	Наименование работы, её вид	Выходные данные	объем в стр.	Соавторы
1	Подход к оперативному анализу эффективности теплоснабжения зданий	Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2011. – Выпуск 13. – №2 (219). – С.70–73.	4/1	Абдуллин В.В. Шнайдер Д.А.
2.	Оперативный анализ энергетической эффективности теплоснабжения зданий в автоматизированных системах диспетчеризации и управления	Информационно-измерительные и управляющие системы, 2013. – Т. 11. – № 1. – С.16–23.	8/6	Шнайдер Д.А., Хасанов А.Р.
3.	Распределённое имитационное моделирование систем теплоснабжения	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.	5/2	Барбасова Т.А. Хасанов А.Р. Абдуллин В.В.
4.	Интеллектуальная автоматизация на базе ПТК «ПолиТЭР» – ключ к энергосбережению в системах городского уличного освещения	XIII всероссийское совещание по энергосбережению. VII техническая конференция «Автоматизированный учет энергоресурсов», сборник докладов и статей, 23-24 апреля 2013 г. – Екатеринбург : ООО ПК «Артикул», 2013 г. – С.80–82.	3/1	Шнайдер Д.А. Абдуллин В.В.
5.	ПТК «ПолиТЭР» – единое решение для диспетчерского управления и коммерческого учета энергоресурсов .	Энергоназор. – 2014. – №4 (56). – С. 127–128.	2/0,5	Шнайдер Д.А. Абдуллин В.В.
6.	Диспетчерское управление и коммерческий учет энергоресурсов в ЖКХ на базе программно-технического комплекса «ПолиТЭР»	Коммерческий учет энергоносителей: Материалы XXXIV международной научно-практической Конференции. – СПб., 2014. – С. 90–100.	10/2	Шнайдер Д.А. Абдуллин В.В.
7.	Упреждающее управление отоплением здания на основе модели обратной динамики температуры воздуха помещений – Building Heating Feed-forward Control Based on Indoor Air Temperature Inverse Dynamics Model	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.	7/1	Шнайдер Д.А. Абдуллин В.В.
8.	Метод расчета норм потребления технической воды для металлургических предприятий	Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – Том 14. – № 4. – С.99–106.	8/4	Казаринов Л.С., Шнайдер Д.А.
9.	Поддержка принятия решений и мониторинг эффективности энергосберегающих проектов в системах тепло-, водоснабжения на основе ПТК «ПолиТЭР»	XV всероссийское совещание по энергосбережению. IX техническая конференция «Автоматизация инженерных систем», сборник докладов и статей, 15-16 апреля 2015 г. – Екатеринбург : ООО ПК «Артикул», 2015 г. – С.80–82.	3/2	Шнайдер Д.А.

1	2	4	5	6
10.	Метод упреждающего управления отоплением здания и его применение в учебном корпусе Южно-Уральского государственного университета – Building Heating Feed-Forward Control Method and Its Application in South Ural State University Academic Building	Transactions on Engineering Technologies. – Heidelberg; New York; London: Springer Dordrecht, 2015. – P. 69–85.	17/4	Шнайдер Д.А. Абдуллин В.В.
11.	Оптимизация температуры теплоносителя системы теплоснабжения университетского городка – Simulation Study on Supply Temperature Optimization of University Campus Heating System	Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 587–594.	8/6	Барбасова Т.А. Шнайдер Д.А.
12.	Оптимизация режимов теплоснабжения с использованием макромоделирования – Heat supply modes optimization based on macromodeling technology	Energy Procedia. – 2017. – Vol. 111. – P. 710–719.	10/4	Филимонова А.А. Барбасова Т.А. Шнайдер Д.А.
13.	Метод оптимизации температуры подаваемого теплоносителя в системе централизованного теплоснабжения зданий на основе имитационного моделирования	Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – Том 17. – № 1. – С.15–22.	8/6	Шнайдер Д.А.

Соискатель:


 (подпись)

Басалаев А.А.
 (фамилия, имя, отчество)

Результаты, включенные в диссертационную работу соискателя «Распределенное управление теплоснабжением зданий на основе сенсорных сетей», не затрагивают интересы авторов совместных научных публикаций:


 (подпись)

Абдуллин В.В.
 (фамилия, имя, отчество)


 (подпись)

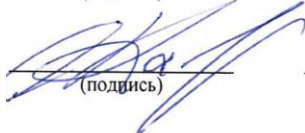
Хасанов А.Р.
 (фамилия, имя, отчество)


 (подпись)

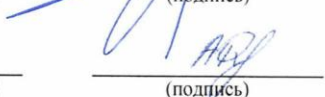
Барбасова Т.А.
 (фамилия, имя, отчество)


 (подпись)

Шнайдер Д.А.
 (фамилия, имя, отчество)


 (подпись)

Казаринов Л.С.
 (фамилия, имя, отчество)


 (подпись)

Филимонова А.А.
 (фамилия, имя, отчество)

15.05.2018 г.
 (дата)