

УТВЕРЖДАЮ



Проректор
по научной работе ИГЭУ
д.т.н., профессор
В.В. Тютиков
02 октября 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Басалаева Александра Анатольевича

**«РАСПРЕДЕЛЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ
НА ОСНОВЕ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими про-
цессами и производствами (промышленность)

Актуальность работы

В представленной к защите диссертации решается важная научно-техническая задача – повышение энергетической эффективности работы технологического оборудования автоматизированных систем управления теплоснабжением зданий и сооружений, что соответствует энергосберегающей политике, которая изложена в государственной программе «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», и положениям Федерального закона РФ № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...».

Новый этап в решении данной задачи открылся с переходом на широкое использование сенсорных сетей для организации контроля и управления системами теплоснабжения зданий. В связи с этим в диссертации решается задача обеспечения максимальной комфортности температурных условий за счет использования пространственно-распределенных сенсорных сетей для измерения температуры воздуха помещений в зданиях и многоканального управления подачей тепловой

энергии. Наличие в системах большого количества датчиков и нескольких каналов регулирования делает оправданным обращение автора диссертационного исследования к задаче разработки нового алгоритма оперативного управления отоплением здания на основе сенсорных сетей, обеспечивающего распределенное регулирование подачи тепловой энергии по критерию максимального выполнения взвешенных температурных условий в помещениях здания.

Актуальность темы диссертационной работы Басалаева А.А. определяется недостаточной результативностью оперативного управления в существующих автоматизированных системах теплоснабжения зданий по критериям энергетической эффективности при непрерывном контроле тепловых характеристик здания, что было продемонстрировано в работе автора при анализе температурных режимов помещений с использованием показаний сенсорных сетей. Для этого особое внимание в работе было уделено разработке алгоритмов построения текущих оценок тепловых состояний объектов, получаемых исходя из непосредственных измерений температур воздуха в здании, внешней температуры и температуры теплоносителя и использования этой информации в автоматизированной системе диспетчерского управления теплоэнергетическим комплексом.

Новизна исследования и полученных результатов

Научная новизна исследования связана с разработкой алгоритмов оперативного управления теплоснабжением зданий на базе пространственных сенсорных сетей по критерию выполнения максимального числа противоречивых температурных условий в большом количестве помещений при ограниченном количестве исполнительных устройств. При этом для каждого помещения разработанный алгоритм при решении задачи управления отоплением здания может учитывать различные приоритеты и различные диапазоны поддержания комфортных температур в помещениях. Кроме того, в работе предложен алгоритм распределенного управления для группы зданий, присоединенных к сети централизованного теплоснабжения с ограниченной располагаемой мощностью источников тепловой энергии.

Разработанные алгоритмы управления реализованы в автоматизированной системе диспетчерского управления теплоэнергетическим комплексом (АСДУ ТЭК), которая позволяет непрерывно осуществлять контроль и управление теплопотреблением зданий, производить оперативный анализ теплового состояния здания и энергетической эффективности системы отопления. Распределенная сеть сенсорных датчиков температуры позволила автору дополнить систему управления модулем идентификации тепловых параметров модели здания и протестировать предложенные алгоритмы анализа и управления распределенным объектом на практике. При этом модель теплового состояния здания позволила реализовать управление объектом с использованием модельно-прогнозирующего управления..

Практическая ценность и применимость результатов разработок диссертации

Теоретические и практические результаты диссертации можно использовать при проектировании и разработке систем теплоснабжения жилых и административных зданий. Разработанная автоматизированная система оперативного управления теплоснабжением зданий на основе сенсорных сетей представляет собой готовый к внедрению и использованию программно-технический комплекс, который позволяет оперативно осуществлять контроль, учет и управление теплопотреблением зданий. При этом программный комплекс позволяет выполнять анализ энергоэффективности отопительной системы зданий.

Практическую ценность для разработчиков систем теплоснабжения зданий представляет именно сформированный аппаратный и программный состав и структура программно-технического комплекса АСДУ ТЭК и взаимодействие блоков программного обеспечения. Ценность представляют и подробные схемы моделирования всех структурных составляющих систем теплоснабжения, что дает возможность моделировать любые режимы систем и пробовать различные виды управления.

Практическую ценность имеет также разработанная методика размещения беспроводных датчиков температуры в помещениях здания и приемников радио-

сигнала на основе исследований распространения радиосигнала внутри здания. Методика позволяет равномерно расположить минимальное количество датчиков, достаточное для контроля теплового режима здания при реализации предложенных алгоритмов распределенного управления.

Результаты диссертации практически внедрены в системе теплоснабжения университетского городка ЮУрГУ. Объект внедрения можно считать представительным и в хорошей степени подтверждающим достоверность и работоспособность разработанной методологии и алгоритмов управления.

Обоснованность и достоверность результатов исследования.

Диссертационная работа Басалаева А.А. является результатом решения комплексной задачи управления тепловым режимом здания с целью повышения энергоэффективности системы отопления и достижения максимально возможных комфортных условий в помещениях. В работе проанализировано большое количество трудов ученых в области теплотехники зданий. Автором отмечены достоинства и недостатки научных трудов. Автор разработал свой новый подход к управлению тепловыми режимами зданий на основе распределенных сенсорных сетей и многоканального управления.

Достоверность и обоснованность теоретических и экспериментальных исследований, выводов и заключений в диссертации обеспечивается использованием необходимыми для решения этой задачи математическим аппаратом, методами теории систем теплоснабжения, математического моделирования, нелинейного программирования, математической статистики, оптимизации, автоматизированных информационных систем.

Достоверность и обоснованность научных результатов и практических исследований в работе подтверждается математическим моделированием и экспериментами на реальных объектах. Предложенный метод многоканального управления отоплением зданий на основе пространственных сенсорных сетей опробован на модельных экспериментах с использованием реальных физических данных объектов. Кроме того, метод подтвердил свою работоспособность при натурных

испытаниях системы управления и в ходе проведенного тестирования системы при ее внедрении. Успешное внедрение разработанной системы отопления зданий подтверждено актом внедрения. Система отопления показала свою эффективность и работоспособность.

Таким образом, можно говорить о достоверности и обоснованности основных разработок диссертационного исследования Басалаева А.А. в части научных результатов, теоретических и экспериментальных исследований, авторских новаций и разработок прикладного характера. Считаем, что в работе изложены новые научно обоснованные решения, имеющие теоретическое и практическое значение в технике управления системами теплоснабжения с использованием сетей датчиков и управляющих устройств.

Оценка содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, 2 приложений (акт внедрения и справка о соавторстве) и списка литературы на 197 страницах. Диссертация содержит 72 рисунка и 3 таблицы. Главы имеют подразделы и выводы. Имеются заключительные выводы и анализ результатов диссертационного исследования. Список литературы содержит 126 наименований. В автореферате автор указывает на 16 собственных опубликованных работ и работ в соавторстве. В том числе 7 работ в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК и 5 работ в зарубежных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и ведущие международные системы цитирования.

Во **введении** содержится общая характеристика работы, указаны цели и задачи исследования. Поясняется ее актуальность, научная и практическая значимость, новизна исследования, его основные положения, методы исследования и результаты апробации работы.

В **первой главе** автор анализирует проблемы в современных системах теплоснабжения зданий и рассматривает задачи автоматизированного распределенного контроля и управления централизованными системами теплоснабжения, построенными на базе сенсорных сетей. На основании проведенного обзора литера-

туры автор делает вывод о том, что при оперативном управлении существующие автоматизированные системы теплоснабжения зданий не достаточно эффективны, так как оценки теплового состояния зданий являются усредненными, а регулирование одноканальным.

В связи с этим, во **второй главе** автор предлагает применять для оперативного регулирования теплоснабжения методы распределенного управления на основании оценки теплового состояния зданий с использованием пространственно-распределенной сенсорной сети. Для этого автор соответствующим образом формализует задачу многоканального управления пространственно-распределенным объектом. Задача формализуется с использованием математического аппарата взвешенных неравенств и целевых функций. В качестве критерия распределенного управления автор вводит показатель удовлетворения максимально возможного количества температурных условий в помещениях здания с учетом их значимости.

Для решения сформулированной задачи автор разрабатывает алгоритмы оперативного управления теплоснабжением зданий во множестве противоречивых температурных условий, в основе которых предлагает использовать многоканальную модель управления распределенным объектом теплоснабжения с сетью температурных датчиков, обеспечивающих измерение теплового состояния здания. Для поиска оптимального вектора управления разработан алгоритм поиска такого состояния системы, при котором управляющие воздействия обеспечивают выполнение максимального количества взвешенных температурных условий помещений здания в измеряемых точках с учетом значимости помещений, определяемой весовыми коэффициентами. Комплексное решение задачи поиска оптимального решения производится итерационно с использованием методов уступок и ограничений, ветвей и границ.

В главе рассмотрены вопросы построения моделей систем управления объектами теплоснабжения, управления с использованием тепловых моделей зданий, предложена схема системы модельно-прогнозирующего управления отоплением зданий.

В **третьей главе** разработана общая структура и состав программно-технического комплекса автоматизированной системы оперативного управления теплоснабжением зданий на основе сенсорных сетей. Произведен выбор технических средств и программного обеспечения АСДУ ТЭК. Техническое обеспечение включает в себя клиентское и серверное аппаратное обеспечение АСДУ ТЭК, 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. В главе рассмотрены вопросы оптимального размещения датчиков температуры по объему зданий.

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований эффективности использования разработанной автоматизированной системы управления теплоснабжением зданий на примере теплоэнергетического комплекса ЮУрГУ.

Приведены результаты идентификации тепловых характеристик объектов управления с использованием показаний сенсорных сетей. По результатам этих измерений построена полная имитационная модель теплоэнергетического комплекса университетского городка. На данной модели проведены эксперименты подтверждающие корректность работы алгоритма оперативного управления централизованной системой теплоснабжения зданий в дефицитном режиме.

Приведены результаты активного эксперимента по реализации предложенного алгоритма управления отдельным учебным зданием 2АТ ЮУрГУ. В результате количество помещений в здании с выполненными нормативными диапазонами температур воздуха было повышено с 34% до 56% от общего количества контролируемых помещений.

Результаты анализа энергоэффективности здания 3БВ ЮУрГУ выявили узкие места в системах теплоснабжения здания.

Выявленный потенциал экономии тепловой энергии от внедрения разработанных методов управления в ходе проведенных активных экспериментов на семи зданиях в системе теплоснабжения ЮУрГУ составил 11,3%. Кроме того, опреде-

лены помещения для которых необходимо провести энергосберегающие мероприятия.

Замечания по диссертационной работе:

1. Недостаточно исследован вопрос о взаимовлиянии контуров управления предлагаемой системы регулирования, приведенных в структурной схеме на рисунке 4.19.

2. В диссертации не сформулированы количественные рекомендации по практической реализации предложенного оперативного управления теплоснабжением зданий на базе сенсорных сетей температур воздуха помещений в противоречивых температурных условиях:

– какое количество аппаратных средств минимально необходимо для реализации разработанного управления в зданиях стандартных серий;

– какое количество сенсоров необходимо установить на единицу объема здания;

– какое количество исполнительных механизмов необходимо установить в здании, чтобы выполнить требования по комфортности температуры во всех помещениях.

3. Рассмотрение модели системы теплоснабжения из предложенных блоков среды VisSim (рис. 2.11-2.36) затруднительно из-за мелкого изображения элементов блоков, отсутствия обозначений координат, закрытых функциональных блоков, наличия сложных блоков и отсутствия общей схемы соединения блоков. Построение модели системы следовало бы вынести в приложение и подробно описать.

4. Используются не согласованные обозначения переменных, например w и v на стр. 74, 76. Имеется много переобозначений переменных, например $a_1 = -1/T$ (стр. 73), $a_i = K_i$ (стр. 148).

5. На стр. 80 помещена ссылка на Приложение Б, где, как указано, должна быть макромодель системы теплоснабжения в виде сетевой структуры, однако в приложении находится справка.

6. Из содержания диссертации не понятно решение вопроса регулирования отопительной нагрузки потребителя теплоты в зоне температур наружного возду-

ха от «точки излома» до температуры окончания отопительного сезона для централизованной двухтрубной системы теплоснабжения, как доминирующей в Российской Федерации, что сужает диапазон применения предлагаемых технических и организационных решений.

7. Влияние на количественную составляющую в качественно-количественном регулировании имеет ограничения по условиям эффективной работы теплообменного оборудования в различных элементах системы теплоснабжения (например, теплоприготовительная установка, теплообменное оборудование ЦТП, отопительные приборы и т.п.). Оценка эффективности теплообменного оборудования не нашла отражение в диссертационной работе.

8. В разделах 4.3.6 и 4.3.7 диссертационной работы при анализе энергоэффективности и качества теплоснабжения здания, а также оценке потенциала экономии отсутствует системный подход, предполагающий понимание того, что повышение энергоэффективности одного или нескольких элементов системы, например, потребителей теплоты, не влечет за собой повышение эффективности системы в целом, например, это может привести к снижению КПД источника теплоты, разбалансировке сети теплоснабжения и т.п.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации и в достаточной мере отражает ее содержание.

Апробация и публикация основных положений диссертации

Результаты исследований и разработок диссертационной работы прошли необходимую апробацию и освещение в научной печати, что отмечено в списке опубликованных работ. Главные научные и практические результаты работы были доложены на 11 представительных конференциях. По теме диссертации имеется 16 опубликованных работ, в том числе в изданиях рекомендованных ВАК – 7 публикаций, в зарубежных изданиях рецензируемых Scopus и Web of Science – 5 публикаций, в других изданиях – 4 публикации.

Заключение

Диссертация Басалаева Александра Анатольевича на тему «Распределенное управление теплоснабжением зданий на основе сенсорных сетей» имеет завершённый вид самостоятельного научно-квалификационного исследования. Тема исследования является актуальной с точки зрения науки и инженерной практики. Диссертация содержит вариант решения научно-практической задачи создания энергоэффективной системы управления теплоснабжением зданий с рассмотрением теоретических и технологических аспектов данной задачи.

Результаты исследований, разработок диссертации, предложенные в ней методики и технические решения имеют научное и практическое значение для использования в системах теплоснабжения жилых, офисных и промышленных зданий и для проектирования подобных систем.

Диссертация соответствует специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность).

Диссертационная работа соответствует критериям, установленным в разделе II постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 01.10.2018) "О порядке присуждения ученых степеней" (вместе с "Положением о присуждении ученых степеней") для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Басалаев Александр Анатольевич достоин присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Отзыв на диссертацию Басалаева А.А. обсужден на заседании кафедры «Промышленной теплоэнергетики» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», протокол № 2 от «02» октября 2018 г.

Отзыв составил:



Заведующий кафедрой ПТЭ

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

к.т.н., доцент Банников А.В.,

телефон: +7 (4932)269975,

электронная почта: avbannikov_pte@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

адрес: Российская Федерация, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34.

телефон: +7 (4932) 269-999, 269-696,

сайт университета: www.ispu.ru

электронная почта: office@ispu.ru