

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Султангузина Ильдара Айдаровича  
на диссертацию Басалаева Александра Анатольевича  
на тему «Распределенное управление теплоснабжением зданий  
на основе сенсорных сетей»  
по специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами (промышленность)»  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

### **Актуальность избранной темы**

В последнее десятилетие повышение энергетической эффективности экономики является центральной задачей Энергетической стратегии России. Анализ энергетического сектора показал, что более четверти потенциала энергосбережения сосредоточено в ЖКХ. При этом основным энергетическим ресурсом в коммунально-бытовом секторе России является тепловая энергия, что обуславливает высокую актуальность исследований и разработок в области повышения энергоэффективности инженерной инфраструктуры в целом и систем отопления зданий в частности. При решении задачи повышения энергоэффективности в России выработана правоприменительная практика, определяемая, в частности, Федеральным законом от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...». Однако в погоне за экономией применение современных технологий энергосбережения в коммунально-бытовом секторе нередко приводит к ухудшению микроклиматических условий помещений зданий. В связи с этим становится актуальной задача объективного контроля качества теплоснабжения. Для этого в последние пять лет в сфере ЖКХ начали активно внедряться технологии «интернета вещей» на базе беспроводных сетей малой мощности. При этом применение большого количества датчиков в инженерной инфраструктуре коммунального хозяйства открыло новый этап развития автоматизированных систем контроля и управления, позволяя за счет глубокого всестороннего анализа большого объема данных создавать сложные модели теплового режима зданий и на их основе проектировать системы распределенного регулирования теплопотребления.

Решению вышеописанных задач посвящена рассматриваемая диссертационная работа Басалаева Александра Анатольевича, в которой предложены новые теоретических и методологических решения, в основу

которых положено применение современных беспроводных технологий передачи данных.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Изучение особенностей управления температурным режимом зданий и нормативно-технической документации по требованиям к микроклимату помещений, а также детальный обзор отечественной (94 источника) и зарубежной (32 источников) литературы по управлению теплоснабжением зданий позволили автору диссертации получить объективное представление о существующих нерешенных задачах по выбранному направлению исследования, сформулировать цель и задачи собственного научного исследования, а также разработать соответствующий математический аппарат для решения поставленных задач.

При выполнении комплексного поэтапного научного исследования были проработаны выносимые на защиту положения: формализовано представление задачи распределенного управления теплоснабжением зданий с использованием сенсорных сетей при противоречивых температурных условиях; разработаны соответствующие алгоритмы оперативного управления теплопотреблением здания, учитывающие возможность работы системы в дефицитном режиме; представлена методика расстановки беспроводных датчиков температуры воздуха в помещениях и приемников радиосигнала для организации представительного контроля теплового режима здания; предложена структурная схема системы модельно-прогнозирующего управления отоплением зданий; результаты внедрения системы оперативного управления теплоснабжением зданий в Южно-Уральском государственном университете.

Формализация задачи распределенного управления теплоснабжением зданий полностью соответствует подходу к постановке требований, предъявляемым к системам управления температурным режимом помещений соответствующей нормативно-технической документацией и санитарными нормами, принятыми в Российской Федерации.

Представленный в работе анализ литературных источников и результаты натурных испытаний наглядно продемонстрировали ключевую проблему использования сенсорных сетей для управления температурным режимом зданий, которая заключается в том, что выполнение температурных условий одновременно во всех помещениях здания существенно затруднено из-за большого количества различных внешних и внутренних факторов, влияющих

на температуру воздуха в помещениях, и ограниченного количества исполнительных устройств, используемых для регулирования теплоснабжения.

Предложенные автором алгоритмы распределенного управления позволяют поэтапно разрешать описанную проблему, включая этапы анализа системы управления на возможность выполнения температурных условий и расчета управляющих воздействий для выполнения максимального количества температурных условий с использованием доступных средств автоматизации. На последнем шаге для выявленных на этапе анализа температурных условий, которые невозможно выполнить для текущего состояния системы, предлагается осуществлять мероприятия по балансировке системы отопления или энергосберегающие мероприятия. Таким образом, автор предлагает комплексный алгоритм для обеспечения выполнения температурных условий всех контролируемых помещений зданий.

Задача распределенного управления отоплением, сформулированная автором, является многокритериальной. Для её решения автор предлагает свертку критериев в виде суммы выполненных взвешенных температурных условий, что позволяет удовлетворить потребности максимально возможного в текущих условиях количества потребителей тепловой энергии. Учет значимости выполнения температурных условий позволяет расставлять приоритеты между потребителями и решать задачу при ограниченном количестве исполнительных механизмов или генерируемой на источниках тепловой энергии. Для решения указанной задачи предложен соответствующий метод глобальной целочисленной оптимизации на базе метода ветвей и границ.

Для реализации предложенных алгоритмов автор предлагает использовать современные информационные технологии в рамках предложенной автором структуры автоматизированной системы диспетчерского управления. В качестве аппаратных средств автоматизированной системы автор применяет беспроводные сенсорные сети, позволяющие организовать сбор данных о температуре помещений с привлечением меньшего количества материальных и трудовых ресурсов по сравнению с проводными сетями. Для повышения объективности собираемой информации, на основании которой оценивается тепловой режим здания, автор разработал методику равномерного расположения по фасаду здания датчиков так, обеспечив минимальное дублирование измерения информации по горизонтали и вертикали по всей площади фасада. При этом модельные и натурные эксперименты показали возможность использования предложенной методики расстановки датчиков для используемых автором аппаратных средств беспроводной передачи данных.

Результаты внедрения предложенных алгоритмов в систему анализа и управления отоплением зданий Южно-Уральского государственного университета обоснованы корректными результатами представленных в работе модельных экспериментов и фактическим достигнутым экономическим эффектом, подтверждённым соответствующим актом внедрения.

Таким образом, результаты диссертационного исследования подкреплены представленными в работе материалами в количестве, достаточном для получения достоверных результатов и выводов. Обоснованность научных положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнения. Основные положения, выносимые на защиту, сформулированы четко и в целом соответствуют содержанию работы. Методически правильный подход и тщательная проверка теоретических выводов математическим моделированием и натурными экспериментами позволяют считать обоснованными выводы, которые полностью соответствуют сформулированной цели и задачам.

### **Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Научную новизну диссертационной работы составляют предложенная автором формализация постановки задачи распределенного управления отоплением зданий на основе сенсорных сетей и алгоритмы её решения, обеспечивающие распределенное регулирование подачи тепловой энергии по критерию максимального выполнения взвешенных температурных условий с учетом возможности возникновения дефицитных режимов теплоснабжения.

В литературе существуют различные постановки решения задач управления отоплением зданий, которые сводятся либо к приведению усредненного или средневзвешанного фактического значения по набору параметров, характеризующих качество микроклимата, к некоторому заданному значению, либо к приведению отдельного представительного параметра, наиболее точно характеризующего данный объект, из множества контролируемых параметров объекта управления к заданному значению. В своей работе автор предлагает новый подход к постановке задачи задач управления отоплением зданий, связанный не с минимизацией отклонения фактической величины некоторого усредненного показателя от заданной величины, а с максимизацией количества выполненных условий вхождения фактических значений температур воздуха каждого контролируемого помещения в заданный диапазон значений, соответствующий этому помещению. При этом постановка задачи вхождения показателей качества микроклимата помещений в заданные диапазоны полностью соответствует

принципам нормирования, используемым в нормативно-технической документации, а максимизация количества выполненных температурных условий является новым подходом в регулировании отоплением.

Учет значимости выполнения температурных условий в постановке задачи распределенного управления в виде весов соответствующих неравенств позволил автору при решении оптимизационной задачи не только выделять приоритетные по выполнению температурных условий помещения, но и одновременно учитывать ограничения, связанные с дефицитными режимами.

В ходе выполнения научной работы автор опирался на достоверные данные приборов коммерческого учета. Приведенные в работе математические уравнения теплового режима помещений, а также уравнения тепло- и гидродинамики, используемые при моделировании, даны со ссылками на авторитетные научные источники, их достоверность не вызывает сомнения. Сделанные в работе теоретические заключения обладают логикой и последовательностью изложения.

### **Значимость для науки и практики полученных автором результатов**

Научно-практические теоретические, методологические, эмпирические и технические результаты, представленные автором в диссертационной работе, направлены на повышение качества управления температурным режимом помещений. Представленные в работе выводы, результаты и предложения могут найти широкое применение не только в области теплоснабжения жилищно-коммунального сектора, но и теплоснабжения производственных помещений промышленных предприятий, а также вносят определенный вклад в развитие подходов к управлению системами теплоснабжения в аварийных режимах, связанных с дефицитом генерируемой тепловой энергии.

С научной точки зрения интерес представляет математическая формализация и алгоритмы решения комплексной задачи управления теплоснабжением в соответствии с требованиями нормативно-технической документации с учетом работы системы в аварийных режимах.

С практической точки зрения интерес представляют несколько аспектов работы:

1) оригинальная логически обоснованная и экспериментально подтвержденная методика расстановки беспроводных датчиков температуры воздуха в помещении и приемников радиосигнала, которая позволяет проектировать схему расстановки датчиков для представительного равномерного контроля теплового режима помещений в зданиях различной



формы и схему расстановки приемников радиосигнала для организации стабильного сбора данных с датчиков по беспроводной сети;

2) предложенные автором алгоритмы и рекомендации позволяют выявлять и устранять нарушения температурных режимов помещений и повышать энергоэффективность систем отопления зданий.

3) представленные в работе алгоритмы управления реализованы в виде программного модуля, интегрированного в известную SCADA-систему, что позволяет использовать предложенное решение для различных существующих и вновь разрабатываемых объектов, где необходимо выполнять оптимизацию управления отоплением по температуре помещений с различными температурными условиями.

В рамках диссертационной работы выполнено практическое внедрение разработанных алгоритмов в автоматизированную систему контроля и управления тепловым режимом зданий группы учебно-лабораторных корпусов Южно-Уральского государственного университета, и получен соответствующий акт внедрения.

### **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Теоретические и практические результаты диссертационного исследования автора могут быть использованы в деятельности специалистов по автоматизации технологических процессов при разработке новых подходов и методов организационно-технического и автоматического регулирования, при проектировании автоматических и автоматизированных систем контроля и распределенного управления тепловым режимом зданий.

Предложенный автором критерий качества в виде количества взвешенных температурных условий, а также предложенный подход к анализу эффективности систем управления отоплением здания на базе указанного критерия с помощью построения областей Парето может способствовать получению корректной качественно-количественной оценки результатов функционирования систем теплоснабжения.

### **Оценка содержания диссертации, её завершенность**

Текст научной работы Басалаева Александра Анатольевича соответствует требованиям, предъявляемым к содержанию диссертационной работы. Работа изложена на 197 страницах машинописного текста и включает введение, четыре главы, заключение, список литературы (126 наименований) и два приложения.

В тексте диссертации приведено 72 рисунка и 3 таблицы. Основные положения и выводы диссертации отражены в 16 печатных работах, включая 7 статей в научных рецензируемых журналах, входящих в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК, 5 статей – в зарубежных изданиях с индексацией в международных системах цитирования Scopus и Web of Science.

**Во введении** приводится общая характеристика диссертации, включая актуальность, цели и задачи исследования, научную новизну и практическую значимость исследования, а также положения, выносимые на защиту, и результаты апробации.

**В первой главе** автор приводит подробнее описание рассматриваемого объекта управления, раскрывая сложность задачи распределённого управления отоплением зданий. Обзор литературы охватывает современные и классические научные исследования и информационные технологии в области контроля и математического моделирования теплового режима здания, а также распределенного управления параметрами микроклимата помещений. Проведенный автором анализ литературы показывает, что современные программно-технические комплексы позволяют создавать системы управления в соответствии с предъявляемым к ним комплексными требованиями, связанными с обработкой большого количества информации, распределенным и многокритериальным характером задачи регулирования микроклимата помещений.

**Во второй главе** система отопления рассмотрена как распределенный объект управления, для которого формализована задача распределённого управления, целью которой является выполнение максимально возможного количества температурных условий. Предложены соответствующие алгоритмы решения сформулированной задачи, в основу которых положен метод ветвей и границ, соответствующий данной многокритериальной задаче. Отличительной особенностью предложенного в работе подхода к управлению отоплением является учет дефицитных режимов теплоснабжения, что в совокупности определяет его преимущество перед традиционными алгоритмами управления, наглядно продемонстрированное с помощью области Парето. Кроме того, приведены подробные математические модели теплового режима помещений, тепловых трубопроводных сетей и описано их применение в рамках предложенных алгоритмов для распределенного управления системой централизованного теплоснабжения группой зданий.

**В третьей главе** рассмотрено построение автоматизированной системы распределенного управления системой теплоснабжения зданий, дано описание её программного и аппаратного обеспечения. Предложена методика установки оборудования, используемого для реализации беспроводной сенсорной сети контроля температуры помещений, учитывающая конструктивные особенности зданий, теплогидравлические характеристики системы отопления и радиотехнические параметры используемого оборудования беспроводной передачи данных. Возможность создания беспроводных сетей мониторинга температур воздуха помещений с использованием предложенной методики подтверждена приведенными модельными и натурными испытаниями по передаче данных с использованием беспроводной сети, развернутой в зданиях Южно-Уральского государственного университета.

**В четвертой главе** приведены различные исследования по применению предложенных алгоритмов распределенного управления отоплением зданий. Исследования включают как модельные эксперименты, так и натурные испытания, которые проводились на базе инженерной инфраструктуры Южно-Уральского государственного университета, которые в полной мере продемонстрировали преимущества использования сенсорных сетей для мониторинга теплового состояния помещений и предложенных автором алгоритмов для распределённого управления отоплением зданий.

Была проведена проверка алгоритма распределенного управления с использованием макромодели системы централизованного отопления при работе системы в дефицитном режиме. На основании температурных показаний, получаемых от развернутой в университете сенсорной сети, проведено сравнение различных традиционных алгоритмов управления и предложенного алгоритма распределенного управления на примере модельного эксперимента в корпусе здания ЗБВ и натурального эксперимента в корпусе здания 2АТ. Кроме того, произведена оценка потенциала энергосбережения от внедрения предложенных алгоритмов управления для группы зданий, в которых была развернута беспроводная сенсорная сеть для измерения температуры воздуха в помещениях. Проведенные эксперименты подтверждают эффективность и перспективность предложенных автором научно-технических и методологических решений.



## **Замечания по работе:**

1. В разработанной автором системе распределенного управления переборный алгоритм (2.8-2.15, 2.18-2.19) выбирает вариант с максимальным количеством выполненных условий из перспективных направлений поиска. При этом решающий алгоритм (2.16-2.17) минимизирует нарушение температурных диапазонов по условиям, выбранным для выполнения в рассматриваемом направлении поиска. Однако в работе не рассматривается задача нахождения оптимального решения для распределённого управления, когда все температурные условия входят в нормативный диапазон.

2. На страницах 161-165 для демонстрации работы алгоритма распределенного управления автор совместно с автоматической оптимизацией управления выполняет балансировку системы отопления. При этом не вполне ясно, на основании чего выбирались помещения или стояки при выполнении балансировки?

3. При оценке фактической экономии автор не приводит данные по потреблению электроэнергии, которая может расходоваться при использовании в помещениях электрических нагревательных приборов.

4. Все натурные эксперименты проводились только в административных зданиях, хотя в кампусе Южно-Уральского государственного университета есть и жилые здания (общежития). Почему автор выбрал именно представленные в работе здания для экспериментов?

5. В цели диссертационной работы автор указал необходимость достижения максимальной степени комфортности микроклиматических условий в помещениях зданий. При этом в работе рассматривается только один показатель комфортности – температура воздуха в помещениях, и не учитывается такой фактор, как, например, влажность воздуха. Возможно ли применение предложенных автором алгоритмов распределенного управления к другим подсистемам и показателям управления микроклиматом помещений?

Приведенные замечания не являются существенными и не снижают общей положительной оценки работы.

### **Заключение по диссертации:**

Таким образом, диссертация Басалаева Александра Анатольевича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научно-практической задачи, изложены новые, научно обоснованные методологические и технические положения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, что соответствует п. 9 положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а её автор заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)».

Официальный оппонент, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры промышленных теплоэнергетических систем»  
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»



Султангузин Ильдар Айдарович

29.10.2018

Подпись Султангузина И.А. заверяю:  
Начальник управления по работе с кадрами  
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»



Савин Никита Георгиевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»

111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 14  
тел./факс: 8 (495) 362-72-17, email: sultanguzinIA@mpei.ru