

На правах рукописи



Абдуллин Вильдан Вильданович

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ЗДАНИЯ
С КОНТУРОМ ОТРАБОТКИ
БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2017

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Шнайдер Дмитрий Александрович**
доктор технических наук, доцент

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

Тютиков Владимир Валентинович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматизации
технологических процессов, проректор по
научной работе ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина», г. Иваново

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский государственный
технический университет», г. Самара

Защита диссертации состоится 28 декабря 2017 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по адресу: 454080, Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», Ученый совет; тел.: +7 (351) 267-91-23, факс: 267-93-69.

Автореферат разослан “____” _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. физ.-мат. наук



Н.М. Япарова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Энергосбережение в сфере отопления многоэтажных зданий является важной задачей, как по критерию объема рынка, так и с точки зрения состояния инженерных систем. В Российской Федерации насчитывается около 2,9 млн. многоквартирных жилых домов, за год производится порядка 800 млн. Гкал тепловой энергии, что исчисляется сотнями миллиардов рублей в год. В этой связи важно обеспечить соответствие систем отопления критериям энергоэффективности, надежности и комфорта.

Энергосбережение в системах отопления с позиции управления характеризуется необходимостью стабильного поддержания температуры воздуха в помещениях здания на заданном комфортом уровне при наличии внешних возмущений, действующих на здание. Энергоэффективность определяется способностью обеспечить минимально возможное теплопотребление, при этом требования комфорта выступают ограничением. Соответственно, колебания, перегулирование, статическая ошибка регулирования ведут к неэффективному потреблению тепловой энергии.

Масштабные исследования процессов теплопотребления зданиями начинаются со второй половины XX века: существенный вклад в вопросы повышения эффективности и качества отопления внесли Соколов Е. Я., Громов Н. К., Туркин В. П., Ливчак В. И., Карпич Е. Е., Богословский В. Н., Сканави А. Н., Зингер Н. М., Андрющенко А. И., Белинский С. Я., Табунщиков Ю. А. и др.

Широкое распространение в России получило регулирование по основному возмущающему воздействию – температуре наружного воздуха. С точки зрения теории управления подобное регулирование реализует разомкнутый цикл управления (без обратной связи по регулируемой координате), его применение в сравнении с замкнутым циклом управления обеспечивает более низкую точность регулирования. Также регулирование по температуре наружного воздуха не учитывает влияния быстродействующих возмущений: ветра, солнца, внутренних теплопоступлений от людей и электроприборов и т.д. Как следствие, снижаются энергоэффективность и комфорт в зданиях. Однако, учитывая использование регулирования подачи тепла на центральных (квартальных) тепловых пунктах и уровень технических решений 1960-х–1980-х гг., регулирование по температуре наружного воздуха обеспечивало приемлемые для того времени показатели качества регулирования и надежности.

Сегодня ввиду развития средств автоматизации и масштабного внедрения индивидуальных тепловых пунктов стала возможной реализация более эффективных алгоритмов управления отоплением. В последние десятилетия были предложены различные способы повышения эффективности управления отоплением зданий, рассмотренные в работах ряда российских и зарубежных исследователей: Табунщикова Ю.А., Глухова В.Н., Казаринова Л.С., Шнайдера Д.А., Панферова В.И., Тверского М.М., Fanger P.O., Mathews E.H., Dounis A.I. и др. Вопросы повышения энергетической эффективности зданий исследовали Бродач М.М., Башмаков И.А., Wollerstrand J. и др.

Методической основой повышения качества регулирования отопления является реализация замкнутых контуров с обратной связью по регулируемой координате – температуре воздуха в помещениях здания. Однако теплогидравлические процессы в здании обладают большой инерционностью, имеют нелинейный и распределенный характер, подвержены большому количеству возмущающих факторов, прямое измерение которых крайне затруднительно на практике. Указанные особенности ограничивают возможности применения в системах автоматического управления отоплением зданий типовых алгоритмов регулирования с обратной связью по температуре воздуха в помещениях и компенсацией действующих возмущений.

Современным подходом к построению систем управления подобными объектами является применение методов модельно-упреждающего управления, рассмотренных в работах Kwon W.H., Bruckstein A.M., Kailath T., Richalet J., Garcia C.E., Morari M., Prett D., Mayne D.Q., Rawlings J.B., Scokaert P.O.M., Qin S.J., Badgwell T.A. и др. Методы модельно-упреждающего управления позволяют с использованием эмпирических моделей оценить действие возмущающих факторов до момента отклонения регулируемой координаты. Известны реализации модельно-упреждающего управления микроклиматом зданий (Mogoșan P.-D., Žáčeková E., Prívara S., Váňa Z. и др.), преимущественно предполагающие оценку каждого возмущения в отдельности путем установки дополнительных датчиков, что затруднительно реализовать при массовом внедрении в системах управления отоплением зданий. Однако не все возмущающие воздействия возможно измерить на практике. Кроме того, большинство возмущений имеют быстропеременный характер, что при большой тепловой инерционности зданий затрудняет их отработку.

В этой связи актуальной задачей является разработка системы энергоэффективного управления отоплением многоэтажных зданий, обеспечивающей поддержание требуемой комфортной температуры воздуха в помещениях на основе оценки и отработки быстропеременных возмущений в условиях массового внедрения. Для решения данной задачи в работе предлагается подход, основанный на компенсации тепловой инерции здания и влияющих на здание возмущений путем формирования упреждающей оценки обобщенного возмущения на температуру воздуха в помещениях, полученной с использованием прямых и обратных моделей динамики (тепловой инерции) здания.

Целью исследований является разработка энергоэффективной системы управления тепловым режимом здания, обеспечивающей поддержание требуемой комфортной температуры воздуха в помещениях путем компенсации тепловой инерции здания и влияющих на здание быстропеременных возмущений. В соответствии с указанной целью сформулированы и решены следующие задачи:

1. Анализ проблемы энергоэффективного управления отоплением зданий с учетом влияния внешних и внутренних быстропеременных возмущающих воздействий на температуру воздуха в помещениях здания.

2. Разработка структуры системы управления отоплением здания с компенсацией влияния внутренних и внешних быстропеременных возмущающих воздействий на температуру воздуха в помещениях на основе формирования упреждающей оценки обобщенного возмущения на тепловой режим здания.

3. Разработка метода получения упреждающей оценки обобщенного возмущения на основе использования прямых и обратных моделей динамики теплового режима здания с применением прогнозирующих экспоненциальных фильтров.

4. Построение на основе фактических данных эксплуатации системы отопления учебного корпуса ЗБВ ЮУрГУ прямой и обратной моделей динамики теплового режима здания для использования в рамках разработанного метода получения упреждающей оценки обобщенного возмущения в реальном времени.

5. Реализация разработанной системы управления отоплением корпуса ЗБВ ЮУрГУ с функциями автоматической идентификации модели и настройки параметров системы управления в условиях реальной эксплуатации, расчет экономического эффекта от внедрения системы управления.

Объектом исследования данной диссертационной работы являются системы отопления многоэтажных жилых или административных зданий.

Предметом исследования являются алгоритмы управления и математические модели теплового режима здания.

Методы исследования. Работа была выполнена с использованием различных методов исследований, объединяемых системным подходом:

– анализ и обобщение ранее проведенных исследований в области управления микроклиматом зданий, в области построения моделей тепловых режимов зданий, в области теплофикации и устройства систем отопления;

– логические оценки и заключения на всех этапах исследования;

– теоретические исследования при разработке методики исследования, разработке метода управления тепловым режимом здания с компенсацией тепловой инерции и возмущений, разработке структуры модели;

– математическое моделирование теплового режима здания в реальном времени с использованием ограниченного набора доступных непосредственному измерению параметров;

– экспериментальные исследования при определении фактических значений параметров модели теплового режима здания, настройке регуляторов.

В работе использованы научные положения: теории дифференциальных уравнений, теории автоматического управления и автоматического регулирования, модельно-прогнозирующего управления, техники компенсации возмущений, теории идентификации математических моделей, теории систем теплоснабжения, математической статистики.

Научная новизна и значимость работы:

1. Разработана новая двухконтурная структура системы управления тепловым режимом здания, включающая базовый канал управления по температуре

наружного воздуха и корректирующий контур, компенсирующий влияние быстропеременных внутренних и внешних возмущающих воздействий на температуру воздуха в помещениях по упреждающей оценке обобщенного возмущения.

2. Предложен метод получения упреждающей оценки обобщенного возмущения в реальном времени на основе моделей прямой и обратной динамики теплового режима здания, отличающийся использованием прогнозирующих экспоненциальных фильтров в полиномиальном базисе.

3. Разработана модель обратной динамики теплового режима здания для формирования упреждающей оценки обобщенного возмущения и величины удельных теплопотерь здания, отличающаяся использованием при широком внедрении на практике доступных для измерения значений параметров теплового режима здания, а также разделением моделируемых процессов по скорости влияния на температуру воздуха в помещении на две группы с использованием для их описания раздельных динамических операторов.

Практическая ценность работы. Результаты работы могут быть применены в энергоэффективном управлении тепловым режимом жилых и административных зданий, обеспечении комфортного микроклимата в зданиях, оценке действия на здания различных возмущающих факторов. Использование разработанного алгоритма позволило снизить энергопотребление здания учебно-лабораторного корпуса ЗБВ в среднем на 9,56% в сравнении с регулированием по температуре наружного воздуха.

Сфера применения результатов работы – жилищно-коммунальный комплекс России и зарубежных стран с холодным и умеренным климатом. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения разработанного алгоритма на учебно-лабораторном корпусе ЗБВ ЮУрГУ составляет 206,34 Гкал (322 тыс. рублей). Потенциальный годовой эффект при внедрении во всем университете – до 2 580 Гкал (до 4,03 млн. рублей). Расчет стоимости выполнен по ценам на январь 2017 года.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Двухконтурная структура системы управления отоплением здания, включающая базовый канал управления по температуре наружного воздуха и корректирующий контур упреждающего управления по температуре воздуха в помещениях здания с учетом влияния внутренних и внешних быстропеременных возмущающих воздействий на температуру воздуха в помещениях.

2. Метод получения упреждающей оценки обобщенного возмущения в реальном времени с использованием моделей прямой и обратной динамики теплового режима здания и прогнозирующих экспоненциальных фильтров.

3. Динамическая модель теплового режима здания и соответствующая ей модель обратной динамики теплового режима здания с разделением моделируемых процессов на две группы по скорости влияния на температуру воздуха в помещении, предназначенные для использования в системе управления тепловым режимом здания.

4. Блочная имитационная модель автоматизированного индивидуального теплового пункта здания в среде моделирования *Vissim*, включающая нелинейные элементы с распределенными параметрами.

5. Результаты реализации предложенных метода, моделей и автоматизированной системы управления тепловым режимом здания в учебно-лабораторном корпусе ЗБВ ЮУрГУ.

Реализация результатов работы. Диссертационное исследование выполнялось в рамках приоритетного направления развития «Энергосбережение в социальной сфере» Программы развития национального исследовательского университета ЮУрГУ. Работа выполнялась при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в соответствии с Соглашением о представлении субсидии №14.577.21.0069 от 05.06.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0069.

Предложенный в работе подход к управлению отоплением реализован в виде готового к установке на объекты и дальнейшему использованию программно-аппаратного комплекса, включающего технические средства серийного производства известных отечественных производителей: контроллеры, датчики, приборы учета. Реализованы графический интерфейс, дистанционный контроль и управление по протоколу Modbus, алгоритм автоматической идентификации параметров модели и настройки регуляторов. Алгоритмическое обеспечение реализовано в виде исполнительной программы для промышленных контроллеров на языке FBD (МЭК 61131-3). Программное обеспечение является переносимым на различные платформы.

Разработанный программно-технический комплекс был в полном объеме внедрен в учебно-лабораторном корпусе ЗБВ ЮУрГУ по адресу: г. Челябинск, пр. Ленина, 87.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертационной работы были доложены на 20 научных и научно-практических конференциях, в том числе на 12 международных конференциях и на 4 всероссийских конференциях:

- IX международная научно-практическая конференция: «Современные проблемы гуманитарных и естественных наук» (г. Волгоград, 2011),
- IV научная конференция аспирантов и докторантов (г. Челябинск, 2012),
- XXXIII международная научно-практическая конференция «Коммерческий учет энергоносителей» (г. Санкт-Петербург, 2013),

- международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов, ученых «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере» (г. Челябинск, 2013),

- VII техническая конференция «Автоматизированный учет энергоресурсов» в рамках XIII всероссийского совещания по энергосбережению (г. Екатеринбург, 2013),

- научно-практическая конференция «Актуальные проблемы автоматизации и управления» (г. Челябинск, 2013),

- международная конференция «36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing» (г. Рим, Италия, 2013),
- международная конференция «The 2013 International Conference of Signal and Image Engineering» в рамках международного конгресса «World Congress on Engineering 2013» (г. Лондон, Великобритания, 2013),
- 5-ый международный конгресс «Энергоэффективность. XXI век» (г. Санкт-Петербург, 2013),
- всероссийский форум «Технологии Энергоэффективности–2014» (г. Екатеринбург, 2014),
- XXXIV международная научно-практическая конференция «Коммерческий учет энергоносителей» (г. Санкт-Петербург, 2014),
- 66-я научная конференция «Наука ЮУрГУ» (г. Челябинск, 2014),
- международная конференция «International Conference on Modeling, Simulation and Control 2014» в рамках международного конгресса «The World Congress on Engineering and Computer Science 2014» (г. Беркли, Калифорния, США, 2014),
- всероссийский форум «Технологии Энергоэффективности–2015» (г. Екатеринбург, 2015),
- научно-практическая конференция «Потенциал вузовской науки Уральского федерального округа и его использование в интересах повышения эффективности государственного управления в новых экономических условиях» (г. Челябинск, 2015),
- международная конференция «21st International Conference on Automation and Computing» (г. Глазго, Великобритания, 2015),
- XXXVI международная научно-практическая конференция «Коммерческий учет энергоносителей» (г. Санкт-Петербург, 2016),
- конференция «Актуальные вопросы приборного учета» в рамках всероссийского форума «Технологии Энергоэффективности–2017» (г. Екатеринбург, 2017),
- международная конференция «The 21st World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics» (г. Орландо, Флорида, США, 2017),
- научно-практическая конференция «Будущее альтернативной энергетики: реалии и перспективы» в рамках Международной специализированной выставки ЭКСПО-2017 (г. Астана, Казахстан, 2017).

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 25 работах, из них: 4 статьи в рецензируемых изданиях из перечня ВАК; 6 статей в зарубежных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и ведущие международные системы цитирования; используемые в работе методы и алгоритмы беспроводного сбора данных с распределенной сети датчиков опубликованы в изданной в соавторстве монографии «Автоматизированные системы управления энергоэффективным освещением» (228 стр.).

Объем и структура работы. Диссертационная работа включает введение, шесть глав, заключение, список использованной литературы, содержащий 148

наименований, 4 приложения. Работа изложена на 184 страницах печатного текста и содержит 86 рисунков, 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цель диссертационной работы и решаемые в ней задачи, изложены научная новизна и практическая значимость результатов работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ опыта решения рассматриваемой проблемы и основных задач данного исследования.

Существует ряд особенностей теплогидравлического режима отопления здания как объекта управления, затрудняющих поиск универсального, энергоэффективного метода, обеспечивающего требуемый уровень комфорта:

- здание подвергается действию различных возмущений, количественная оценка которых затруднительна на практике;
- процессы теплообмена и теплоаккумуляции в здании имеют нелинейный распределенный характер и достаточно высокую инерционность;
- некоторые из действующих на здание процессов имеют более быструю динамику в сравнении с динамикой объекта в целом.

Проведенный анализ показал, что широко применяемый метод регулирования по температуре наружного воздуха учитывает не все возмущающие факторы и имеет статическую ошибку. Регулирование по отклонению регулируемой координаты (температуры воздуха в помещениях) от заданного значения в системе с жесткой отрицательной обратной связью вызывает сложности в применении на практике из-за высокой инерционности объекта и действия ряда неизмеряемых возмущений. Применение известных методов оптимального и модельно-прогнозирующего управления требуют наличия детализированных моделей объектов управления, построение которых при массовом внедрении является крайне затруднительным.

По результатам анализа сделан вывод о том, что, несмотря на наличие в России и за рубежом многочисленных исследований в области автоматического и автоматизированного управления микроклиматом зданий, проблема энергоэффективного управления теплопотреблением зданий на нужды отопления с методологической и практической точек зрения по-прежнему требует решения. Во-первых, искомый подход к управлению должен обеспечивать высокое качество управления: учитывать влияние различных быстропеременных возмущающих факторов на температуру воздуха в здании, обеспечивать потребительский комфорт за счет стабильного поддержания температуры воздуха в здании, иметь высокую энергоэффективность. С другой стороны, разрабатываемая система управления должна быть адаптирована к массовому внедрению, использовать доступные непосредственному измерению данные, обладать легкостью конфигурации и включать алгоритмы автоматической настройки.

Вторая глава посвящена разработке системы управления отоплением здания. В данной главе представлена общая структура системы управления тепло-

вым режимом здания, а также рассматриваются: теоретическая база построения компенсатора тепловой инерции здания и влияющих на здание быстропеременных возмущений, формирование упреждающей оценки обобщенного возмущения, построение обратных динамических операторов. Структура системы управления представлена на рис. 1. На рисунке показаны блоки: Р – регуляторы (ПИ – пропорционально-интегральный, ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный), ТГ – температурный график, ИМ – исполнительный механизм, СО – система отопления, МОД – модель обратной динамики, МУО – модельно-упреждающая оценка. На рисунке также показаны сигналы: T_{out} – температура наружного воздуха, $T_{\text{ind}}^{\text{SP}}$ – уставка по температуре воздуха в помещениях здания, T_{ind}^* – упреждающая оценка температуры воздуха в помещениях здания, $\varepsilon_{T_{\text{ind}}^*}$ – сигнал рассогласования по T_{ind}^* , T_1^{base} – базовая составляющая уставки температуры теплоносителя в подающем трубопроводе (формируется в зависимости от T_{out}), T_1^{corr} – корректирующая составляющая уставки температуры теплоносителя в подающем трубопроводе (формируется в зависимости от T_{ind}^*), T_1^{SP} – уставка температуры теплоносителя в подающем трубопроводе, ε_{T_1} – сигнал рассогласования (ошибка) по температуре теплоносителя в подающем трубопроводе, Y (0...1) – положение клапана, T_1 – температура подаваемого в систему отопления здания теплоносителя, Q_h – тепловая мощность, отдаваемая системой отопления, Q_z^* – упреждающая оценка обобщенного возмущения Q_z .

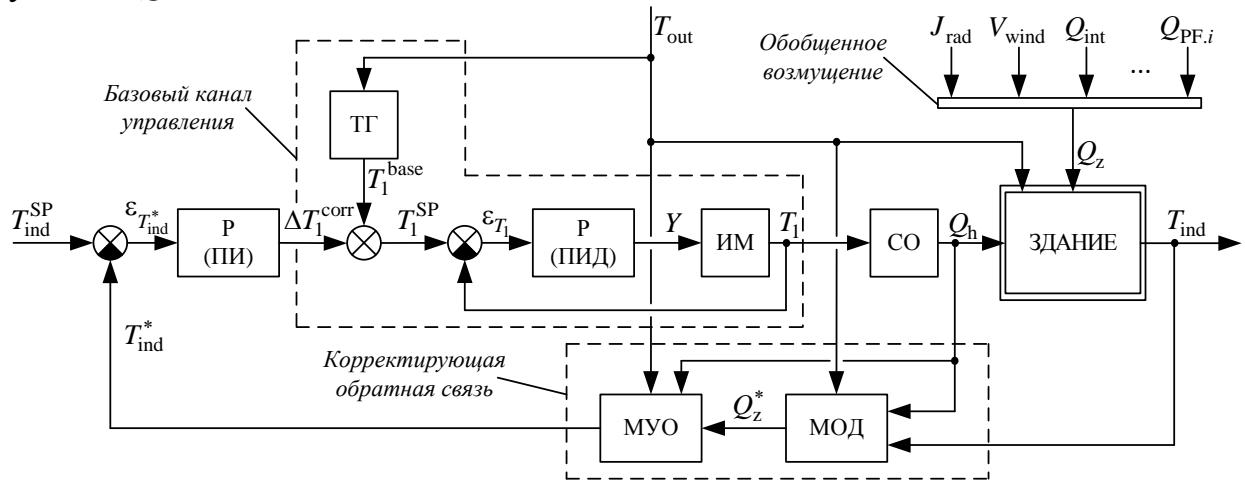


Рис. 1. Структура системы управления тепловым режимом здания

Базовый канал управления осуществляет программное управление подачи тепловой энергии в зависимости от основного возмущающего воздействия T_{out} в соответствии с температурным графиком. Контур компенсации осуществляет коррекцию подачи тепла на отопление здания в зависимости от упреждающей оценки Q_z^* обобщенного возмущения Q_z . Подаваемая в систему отопления здания тепловая мощность формируется как сумма выходов базового канала и корректирующего контура.

Для оценки влияния неизмеряемых факторов: солнечной радиации J_{rad} , ветра V_{wind} , теплопоступлений от внутренних источников Q_{int} , собственной теплоаккумулирующей способности здания Q_{acc} – на температуру воздуха в помещениях T_{ind} (рис. 2) в работе используется определяемый по модели объекта сиг-

нал обобщенного возмущения Q_z , характеризующий совокупное влияние возмущающих факторов на T_{ind} . При этом для повышения быстродействия корректирующего контура в работе предлагается использование упреждающей оценки Q_z^* , которая позволяет компенсировать факторы, действующие в текущий момент времени t , но влияние которых на величину T_{ind} проявится в будущем в момент времени $t+\Delta t$. Тем самым осуществляется компенсация тепловой инерции здания.

Формирование упреждающей оценки Q_z^* осуществляется на основе использования прямых и обратных моделей тепловой инерции здания. Построение обратных моделей динамики выполнено на базе обратных динамических операторов с использованием метода экспоненциальной фильтрации. В данном подходе тепловой режим здания представлен звеном n -го порядка с запаздыванием:

$$F(p) = \frac{1}{a_0 + a_1 p + \dots + a_i p^i + \dots + a_n p^n} \cdot e^{-p\tau_d}. \quad (1)$$

Величины a_i , τ_d определяются по реакции объекта на ступенчатые изменения Q_h известными методами идентификации на этапе настройки системы. Обратный динамический оператор (формальное обращение) для (1):

$$F^{-1}(p) = (a_0 + a_1 p + \dots + a_i p^i + \dots + a_n p^n) \cdot e^{p\tau_d} \quad (2)$$

позволяет получить оценку входного воздействия на динамический оператор по измерительным данным выходной величины.

Построение обратного динамического оператора осуществляется с использованием метода экспоненциальной фильтрации. Для построения прогнозирующего фильтра требуется разложение $T_{\text{ind}}(t)$ в степенной ряд:

$$T_{\text{ind}}(t-\lambda) \approx \sum_{i=0}^n g_i(t) \lambda^i, \quad (3)$$

где λ – интервал ретроспективы, $g_i(t)$ – спектральные составляющие разложения. Тогда выход обратного динамического оператора принимает вид:

$$T_{\text{ind}}^*(t) \approx \sum_{i=0}^n \left[(-1)^i i! g_i(t) \cdot \sum_{k=0}^i \left(a_k \tau_d^{i-k} / ((i-k)!) \right) \right]. \quad (4)$$

где n – требуемый порядок фильтра (количество формируемых спектральных составляющих $g_i(t)$). В общем случае n определяется исходя из модели динамики объекта, требований к точности и располагаемых вычислительных ресурсов. При $\tau_d = 0$ порядок фильтра равен порядку системы.

Спектральные составляющие разложения $g_i(t)$ найдены по критерию минимума экспоненциально-средней ошибки разложения $T_{\text{ind}}(t)$ в степенной ряд (3):

$$E^2(t) = \frac{1}{T_{\text{EF}}} \cdot \int_0^{\infty} \Delta T_{\text{ind}}^2(t-\lambda) e^{-\lambda/T_{\text{EF}}} d\lambda, \quad (5)$$

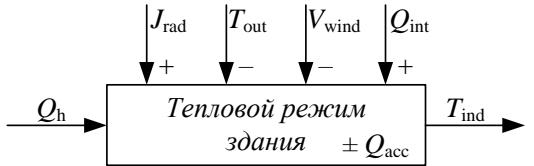


Рис. 2. Факторы, влияющие на температуру воздуха в здании

полученной на основе применения оператора экспоненциального сглаживания к сигналу ошибки $\Delta T_{\text{ind}}(t - \lambda)$, где T_{EF} – постоянная времени сглаживающего экспоненциального фильтра. Исходя из условия:

$$\partial E^2(t)/\partial g_i = 0, \quad i = \overline{0, n}, \quad (6)$$

имеем систему уравнений в векторно-матричной форме:

$$\mathbf{Q}\mathbf{g}(t) = \boldsymbol{\mu}(t), \quad (7)$$

где $\mathbf{g}(t) = (g_1(t), g_2(t), \dots, g_n(t))^T$ – вектор проекций (спектральных составляющих разложения) $g_i(t)$; $\boldsymbol{\mu}(t) = (\mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_n(t))^T$ – вектор моментов исходного сигнала T_{ind} , $\mathbf{Q} = \|q_{ij}\|$ – матрица корреляционных коэффициентов разложения, откуда:

$$\mathbf{g}(t) = \mathbf{P}\boldsymbol{\mu}(t), \quad \text{где } \mathbf{P} = \mathbf{Q}^{-1}, \quad (8) \quad \left| \quad q_{ij} = \frac{1}{T_{\text{EF}}} \int_0^{\infty} \lambda^{i+j} e^{-\lambda/T_{\text{EF}}} d\lambda = (i+j)! T_{\text{EF}}^{(i+j)}. \quad (9) \right.$$

Производные моментов сигнала T_{ind} имеют вид:

$$\mu'_0(t) = (T_{\text{ind}}(t)/T_{\text{ESF}}) - (\mu_0(t)/T_{\text{ESF}}); \quad \mu'_i(t) = i\mu_{i-1}(t) - (\mu_i(t)/T_{\text{ESF}}). \quad (10)$$

Для определения $g_i(t)$ в дискретной системе запишем (7) в виде системы разностных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \mu_{0[k]} &= (\mu_{0[k-1]} + T_{\text{ind}[k]} \cdot \Delta t / T) / (1 + \Delta t / T_{\text{ESF}}); \\ \mu_{i[k]} &= (\mu_{i[k-1]} + i \cdot \Delta t \cdot \mu_{i-1[k]}) / (1 + \Delta t / T_{\text{ESF}}), \quad i = \overline{1, n}; \\ \mathbf{g}_{[k]} &= \mathbf{P}\boldsymbol{\mu}_{[k]}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Полученный обратный оператор имеет структуру, представленную на рис. 3.

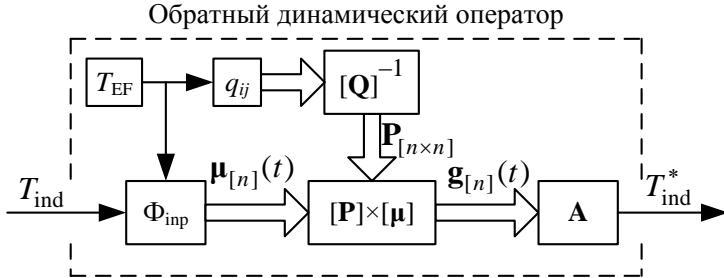


Рис. 3. Структура оператора обратной динамики блок синтеза упреждающей оценки входного сигнала

На рисунке: Φ_{inp} – входной формирующий фильтр (выражения (11)); $[\mathbf{Q}]^{-1}$ – блок формирования обратной матрицы корреляционных коэффициентов разложения, $[\mathbf{P}] \times [\boldsymbol{\mu}]$ – блок умножения матриц, \mathbf{A} –

В работе проведено моделирование процесса построения обратного оператора для динамического звена 2 порядка с запаздыванием. Проведены модельные эксперименты с сигналами различного вида. На рис. 4 в качестве примера показан результат восстановления исходного сигнала, содержащего медленную гармоническую и быстропеременную составляющие, пропущенного последовательно через динамическое звено второго порядка и соответствующий ему обратный динамический оператор. На рисунке показаны: 1 (пунктирная линия) – исходный сигнал, 2 (тонкая сплошная линия) – восстановленный сигнал, 3 – сигнал на выходе динамического звена, 4 – ошибка восстановления исходного сигнала. Полученные значения среднеквадратической ошибки (СКО.)

$\sigma_{\text{RMSE}} = 0,0265^{\circ}\text{C}$ и приведенной СКО. $\sigma_{\text{NRMSE}} = 1,12\%$ позволяют строить системы управления на базе предложенного метода.

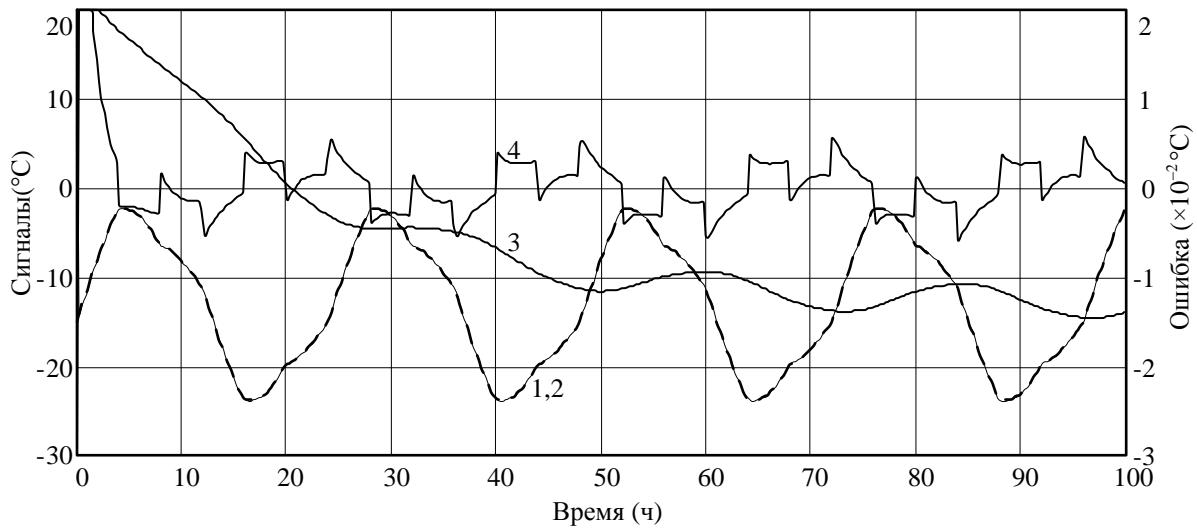


Рис. 4. Результат моделирования для динамического звена 2 порядка при входном сигнале, содержащем медленную гармоническую и быстропеременную составляющие

Третья глава посвящена моделированию тепловых и теплогидравлических процессов в отапливаемом здании.

Рассмотрим модель теплового режима здания. Так как различные возмущающие факторы воздействуют на здание с различной динамикой, то использовано разделение происходящих в системе процессов на две группы в зависимости от скорости влияния этих процессов на температуру воздуха в помещениях. К процессам с медленной динамикой отнесено действие факторов, воздействующих на температуру воздуха в помещениях через ограждающие конструкции здания: T_{out} , V_{wind} и, частично, J_{rad} , а также величины Q_{acc} . Быстродействие указанных факторов характеризуется инерцией конструкций здания. К процессам с быстрой динамикой отнесено воздействие факторов, непосредственно влияющих на температуру воздуха в помещении (J_{rad} , Q_{int}), а также влияние управляемого воздействия Q_h . Разделенная таким образом динамическая модель теплового режима здания примет вид, представленный на рис. 5. Данная модель описывается операторным выражением:

$$T_{\text{ind}}(t) = W_{T_{\text{out}}}\{T_{\text{out}}(t)\} + W_h\{(Q_h(t) + Q_z(t))/(q_h \cdot V)\}, \quad (12)$$

где $W_{T_{\text{out}}}\{\cdot\}$ – динамический оператор «медленных» процессов, $W_h\{\cdot\}$ – динамический оператор быстропеременных процессов. Соответствующая ей модель обратной динамики теплового режима здания, позволяющая получить оценочное значение обобщенного возмущения, примет вид, представленный на рис. 6 и описывается операторным выражением:

$$Q_z^*(t) = Q_h(t) - q_h \cdot V \cdot W_h^{-1}\{T_{\text{ind}}(t) - W_{T_{\text{out}}}\{T_{\text{out}}(t)\}\}, \quad (13)$$

где $W_h^{-1}\{\cdot\}$ – оператор обратной динамики быстропеременных процессов.

В работе проведена идентификация предложенной модели с использованием комплекса инструментальных средств *System Identification Toolbox* из соста-

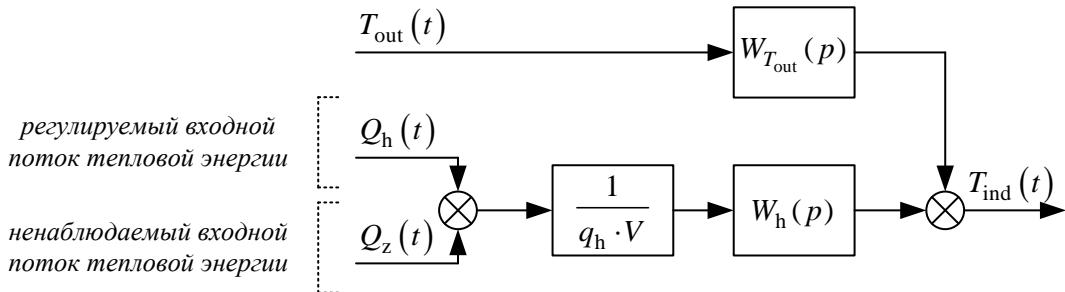


Рис. 5. Исходная динамическая модель теплового режима здания

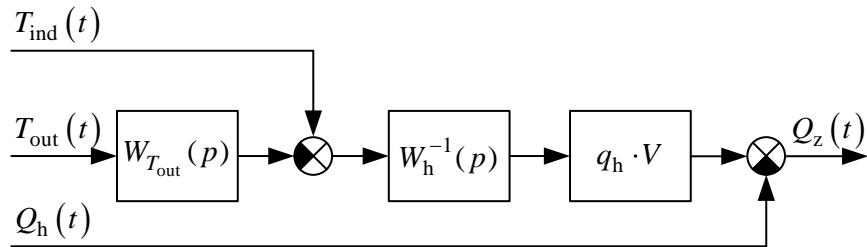


Рис. 6. Модель обратной динамики теплового режима здания

ва прикладного программного пакета *MATLAB*: операторы $W_{T_{out}}\{\bullet\}$ и $W_h\{\bullet\}$ представлены динамическими звенями 2 порядка с запаздыванием:

$$W_{T_{out}} = \left(1/(14p+1)(3,9p+1)\right) \cdot e^{-s}, \quad (14) \quad \left| \quad W_h = \left(1/(2,4p+1)(0,75p+1)\right) \cdot e^{-0,5s}. \quad (15) \right.$$

Полученная модель была верифицирована данными работы АИТП корпуса ЗБВ ЮУрГУ. Среднеквадратичная ошибка моделирования (СКО), рассчитанная с использованием *System Identification Toolbox*, составила: $0,25^\circ\text{C}$ по каналу $F_{LS}\{\bullet\}$, $0,49^\circ\text{C}$ по каналу $F_{HS}\{\bullet\}$. По результатам моделирования в среде *Vissim* для модели в целом фактическая СКО равна $0,26^\circ\text{C}$, абсолютная ошибка моделирования не превышает $\pm 1^\circ\text{C}$ (рис. 7).

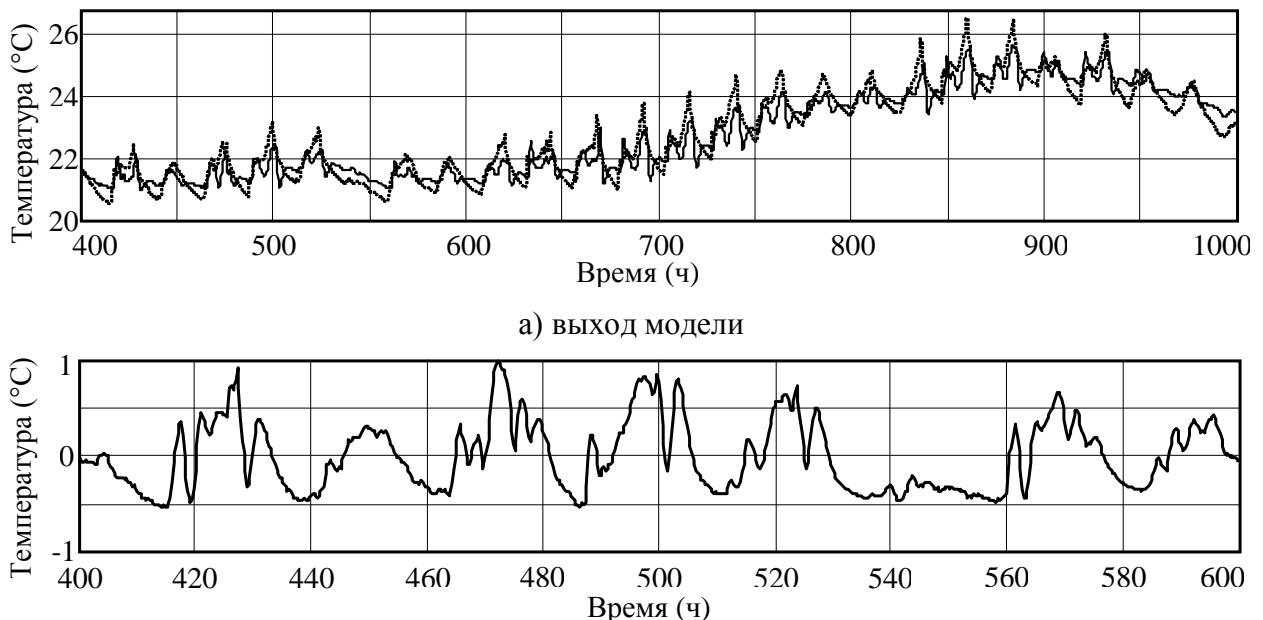


Рис. 7. Результаты моделирования по T_{ind}

Для отработки методов и алгоритмов управления тепловым режимом здания, предложенных в диссертационной работе, была разработана теплогидравлическая модель элементов теплового пункта. С использованием разработанной модели выполнены синтез, предварительная настройка и анализ работы алгоритма компенсации тепловой инерции и влияющих на здание возмущений до его внедрения на объекте. Модель осуществляет численное решение системы алгебраических уравнений, описывающих гидравлические процессы, происходящие с теплоносителем, и передачу тепловой энергии между теплоносителем и тепловой нагрузкой. Модель состоит из функциональных блоков, соответствующих типовым элементам теплового пункта и соединенных односторонними связями из трёх параметров: избыточного давления P (Па), массового расхода G (кг/с) и температуры T (°C). Блоки описывают падение давления, вызванное гидравлическим сопротивлением s соответствующего элемента: (16) для регулирующего клапана, (17) для обратного клапана, (18) для насоса.

$$P_{v.out} = P_{v.in} - G_v^2 \cdot \text{sign} G_v \cdot (f_v(Y) \cdot (s_{open} - s_{close}) + s_{close}); \quad (16)$$

$$P_{cv.out} = P_{cv.in} - G_{cv}^2 \cdot \text{sign} G_{cv} \cdot s_{cv}(G_{cv}); \quad (17)$$

$$P_{p.out} = P_{p.in} + f_p(G_p); \quad (18)$$

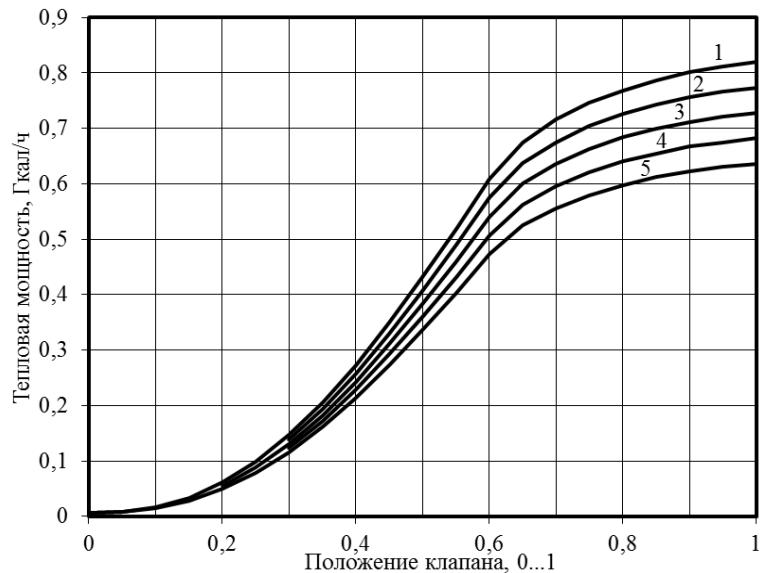
Трубопроводы также характеризуются тепловыми потерями, а система отопления здания представлена эквивалентом отопительного прибора, утилизирующего тепловую энергию:

$$Q_h = c \cdot G_h \cdot (T_{h.in} - T_{h.out}), \quad (19)$$

при этом температура теплоносителя на выходе отопительного прибора определяется температурой воздуха в помещениях:

$$T_{h.out} = T_{ind} + (T_{h.in} - T_{h.out}) e^{-k_h \cdot S_h / (c \cdot G_h)}. \quad (20)$$

Вычисление величины расхода осуществляется в блоке «тепловой ввод» численным методом Ньютона – Рафсона по условию равенства давления, возвращаемого моделируемой ветвью давлению во внешней сети. Аналогично, расходы в отходящих линиях делителя определяются по условию равенства давлений на выходах смесителя. В приведенных уравнениях где $P_{x.in}$, $P_{x.out}$ – давления на входе и выходе элемента «х»; $G_{x.in}$, $G_{x.out}$ – расходы на входе и выходе элемента «х»; $T_{x.in}$, $T_{x.out}$ – температуры на



1 – $T_{ind} = 27^\circ\text{C}$; 2 – $T_{ind} = 24^\circ\text{C}$; 3 – $T_{ind} = 21^\circ\text{C}$;
4 – $T_{ind} = 18^\circ\text{C}$; 5 – $T_{ind} = 15^\circ\text{C}$.

Рис. 8. Статическая характеристика модели АИТП

входе и выходе элемента «х», где вместо «х» указывается обозначение конкретного элемента («v» – управляющего клапана, «cv» – обратного клапана, «р» – насоса, «h» – эквивалента отопительного прибора).

Модель содержит распределенные элементы (трубопроводы, радиаторы отопления). Разбиение пути движения теплоносителя от входа в распределенный элемент (от 0) до выхода из него (до L) на элементарные участки dx позволяет моделировать транспортное запаздывание, вызванное конечной скоростью движения теплоносителя в трубопроводе.

Статическая характеристика модели представлена на рис. 8. Как видно из рисунка, модель носит нелинейный характер.

Общий вид модели АИТП в среде моделирования Vissim представлен на рис. 9. На рис. 10 представлены результаты моделирования (серая линия) в сравнении с реальными данными (черная линия). СКО моделирования по выходу модели Q_h составляет 4,46%.

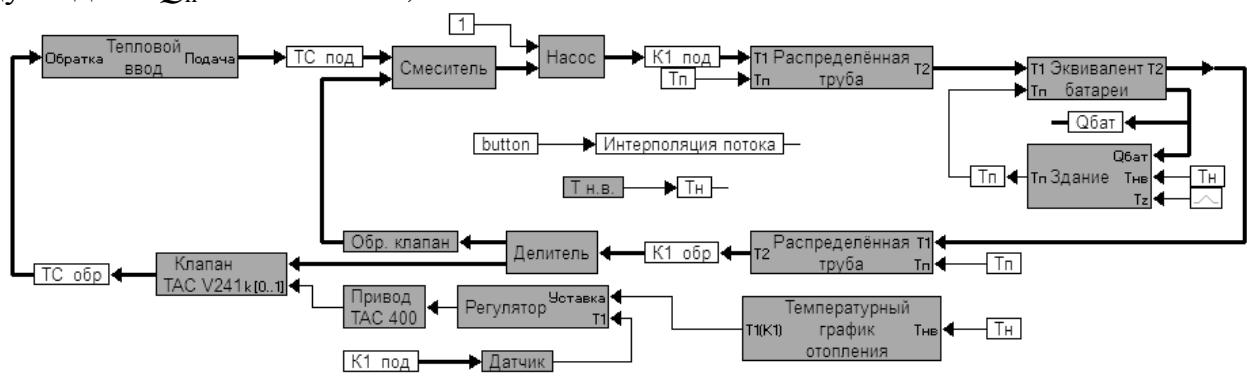


Рис. 9. Модель ИТП и модель теплового режима здания в среде Vissim

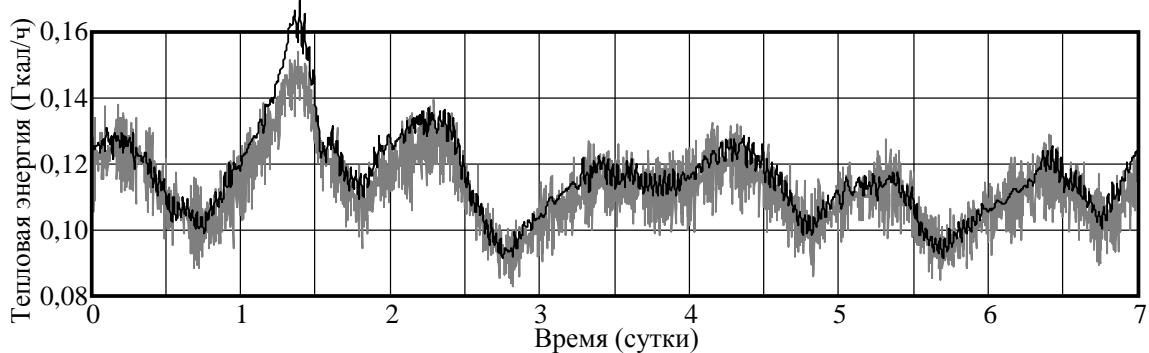


Рис. 10. Сигнал передаваемой в систему отопления тепловой энергии

Четвертая глава посвящена настройке разработанной системы управления тепловым режимом здания. В данной главе показан процесс формирования эффективного температурного графика (рис. 11) системы отопления, учитывающего усиление влияния солнечной радиации на температуру воздуха в помещении в период межсезонья, на примере корпуса ЗБВ ЮУрГУ.

Также в данной главе описан процесс параметрической идентификации регуляторов базового канала и корректирующего контура, приведено описание алгоритма автоматической настройки системы управления тепловым режимом здания в целом.

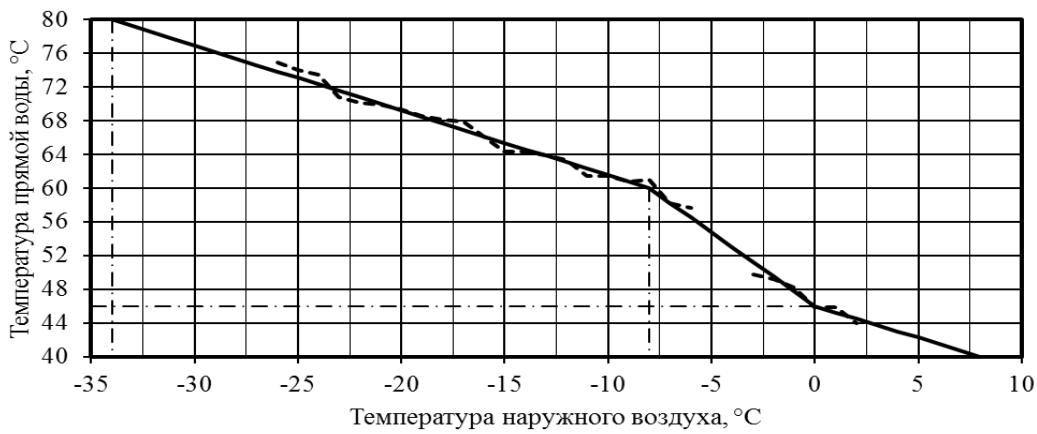


Рис. 11. Мнемосхема текущих параметров теплового пункта

Пятая глава посвящена технической реализации предложенного подхода к управлению тепловым режимом здания. Результаты диссертационного исследования реализованы на практике как система управления тепловым режимом корпуса ЗБВ ЮУрГУ. На рис. 12 представлена структурная схема системы управления. Система является открытой, осуществляет двусторонний обмен данными с Автоматизированным центром мониторинга энергоэффективности и управления потреблением энергоресурсов (АЦМЭ) ЮУрГУ. На рис. 13 показана мнемосхема, отображающая текущие параметры теплового пункта.

Алгоритм упреждающего управления реализован в контроллере теплового пункта здания. Текущее значение T_{out} поступает с датчика, подключенного к контроллеру, текущие значения Q_h и T_{ind} – по интерфейсу Modbus от теплосчетчика и контроллера распределенной сети датчиков, соответственно. В текущей реализации датчики T_{ind} в количестве 25 шт. установлены в помещениях 7 этажа корпуса ЗБВ и объединены сетью Microlan. Также созданы тестовые образцы интеллектуальных сенсоров, объединяемых в беспроводную сенсорную сеть WirelessHART, применение которых экономически оправдано при невозможности использования более дешевых проводных датчиков температуры воздуха в помещениях.

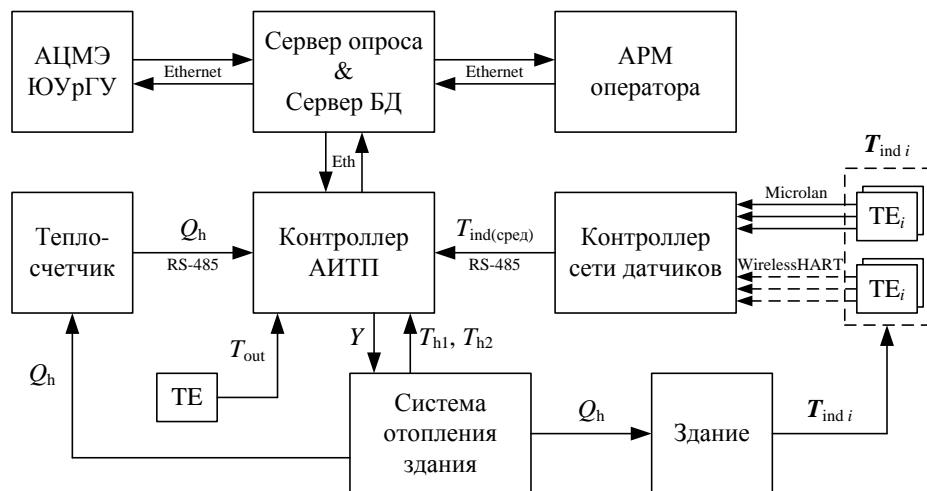


Рис. 12. Структурная схема системы управления тепловым режимом корпуса ЗБВ ЮУрГУ

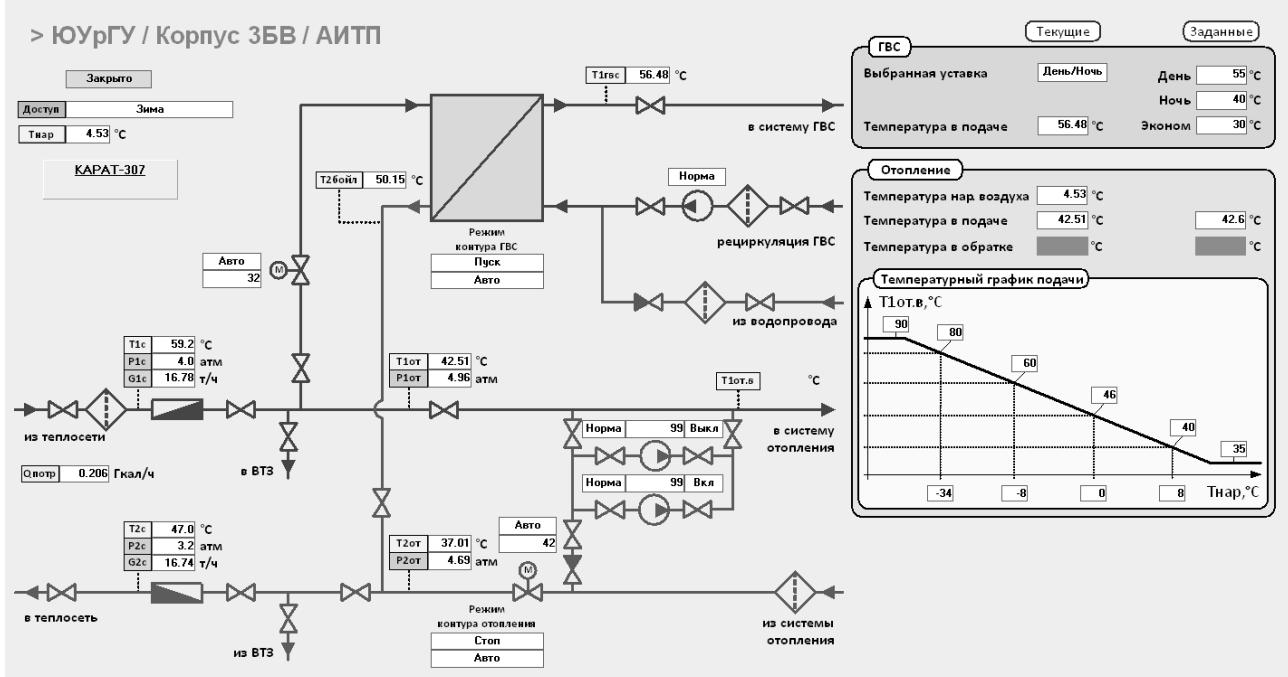


Рис. 13. Мнемосхема текущих параметров теплового пункта

В шестой главе приведены технико-экономические результаты внедрения предложенного подхода на учебно-лабораторном корпусе 3БВ ЮУрГУ. Были достигнуты следующие результаты (рис. 14):

- выполнена компенсация статической ошибки регулирования, характерной для регулирования по температуре наружного воздуха;
- уменьшена амплитуда суточных колебаний температуры воздуха в помещении с $\pm 1^{\circ}\text{C}$ до $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Максимальный энергосберегающий эффект в течение суток наблюдается в дневное время (рис. 15) под воздействием на здание солнечной радиации и активности внутренних бытовых источников теплопоступлений.

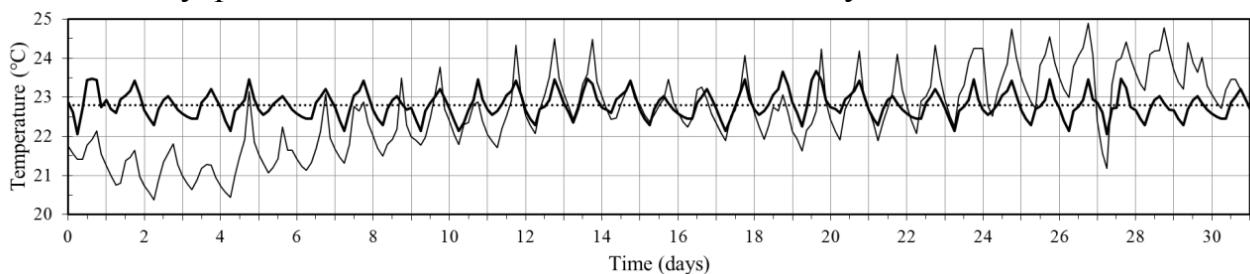


Рис. 14. Суточные колебания T_{ind} : тонкая линия – регулирование по T_{out} , жирная линия – регулирование с компенсацией возмущений

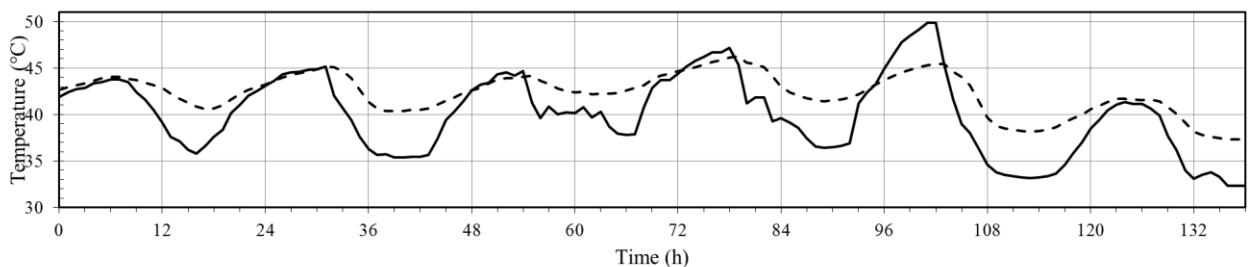


Рис. 15. Температура теплоносителя: пунктирная линия – регулирование по T_{out} , сплошная линия – регулирование с компенсацией возмущений

Внедрение системы произведено в 2 этапа. В ходе внедрения были получены следующие результаты:

– на первом этапе за отопительный период 2013–2014 гг. при использовании алгоритма базового управления по основному возмущающему воздействию получена экономия 10,35% к отопительному периоду 2013–2014 гг.;

– на втором этапе дополнительная экономия от применения контура отработки быстропеременных возмущений по сравнению с отопительным периодом 2013–2014 гг. составила: 12,89% в 2014–2015 гг., 7,43% в 2015–2016 гг., 8,35% в 2016–2017 гг.

Таким образом, средняя экономия за 3 отопительных периода от применения контура отработки быстропеременных возмущений составила 9,6%.

Расчет экономии произведен в соответствии с «Методикой определения тепловой нагрузки объекта теплопотребления по результатам данных приборов учета потребления тепловой энергии» (утв. Приказом Минрегиона РФ от 28.12.2009 г. № 610).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Анализ существующих методов управления отоплением зданий с учетом влияния внешних и внутренних быстропеременных возмущающих воздействий показал их недостаточную эффективность. Так, широко используемый метод регулирования по температуре наружного воздуха не учитывает быстропеременных возмущающих воздействий, а существующие методы модельно-упреждающего управления требуют большого объема детализированных данных об объекте, что необоснованно усложняет задачу при массовом внедрении.

2. Для достижения высокой эффективности поддержания комфортной температуры воздуха в помещениях с учетом влияния быстропеременных возмущающих воздействий предложена структура системы управления отоплением зданий, включающая базовый канал, осуществляющий управление по основному возмущающему воздействию – температуре наружного воздуха, и корректирующий контур, осуществляющий коррекцию управляющего воздействия с учетом температуры воздуха в помещениях здания, тепловой мощности, подаваемой системой отопления, и упреждающей оценки обобщенного возмущения.

3. Разработан метод получения упреждающей оценки обобщенного возмущения в реальном времени на базе прямых и обратных динамических операторов и прогнозирующих экспоненциальных фильтров. Построение прогнозирующих экспоненциальных фильтров осуществляется по критерию минимума экспоненциально-средней ошибки.

4. Для повышения точности моделирования теплового режима здания предложена декомпозиция возмущающих факторов, действующих на температуру воздуха в помещении, на две группы по скорости влияния на температуру воздуха в помещении. В соответствии с этой декомпозицией разработана комплексная динамическая модель теплового режима здания, использующая динамические операторы с разными характеристиками. На базе данной модели построена модель обратной динамики, на выходе которой в реальном времени формируется упреждающая оценка обобщенного возмущения. При этом в каче-

стве входных данных модели обратной динамики используются измеренные значения температуры воздуха в помещениях, температуры наружного воздуха и потребленной тепловой энергии, доступные при широком внедрении на практике.

5. С целью верификации построенной динамической модели теплового режима здания осуществлена идентификация предложенной модели по фактическим данным, полученным в ходе эксплуатации системы отопления учебно-лабораторного корпуса ЗБВ ЮУрГУ. В результате верификации модели определены значения среднеквадратической ошибки моделирования: по каналу быстрых процессов $0,5^{\circ}\text{C}$, по каналу медленных процессов $0,25^{\circ}\text{C}$ – на основании чего сделан вывод о соответствии модели реальному объекту.

6. В целях принципиальной отработки и анализа эффективности разрабатываемых методов и алгоритмов управления тепловым режимом здания разработана блочная имитационная модель автоматизированного индивидуального теплового пункта здания в среде моделирования *Vissim*, включающая нелинейные и распределенные элементы. Выполнена идентификация параметров модели и верификации на фактических данных эксплуатации корпуса ЗБВ ЮУрГУ, которая показала приемлемую для решаемых с помощью данной модели задач погрешность моделирования (среднеквадратичная ошибка моделирования по сигналу тепловой мощности – 4,46%). Применение имитационной модели позволило минимизировать риски возникновения нештатных и аварийных ситуаций при дальнейшем внедрении разрабатываемой системы управления на реальном объекте.

7. Разработана система управления отоплением корпуса ЗБВ ЮУрГУ с функциями автоматической идентификации параметров модели теплового режима здания и настройки коэффициентов регуляторов в процессе эксплуатации. Произведено внедрение разработанной системы и ее сдача в эксплуатацию административно-хозяйственной части ЮУрГУ. Экономия тепловой энергии при использовании базового контура управления по температуре наружного воздуха составила 10,35%. Внедрение контура компенсации по температуре воздуха в помещениях позволило получить дополнительную экономию тепловой энергии в размере 9,56% (в среднем за 2014–2017 г.) при обеспечении температуры воздуха в помещениях на заданном уровне с амплитудой суточных колебаний до $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

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

2. Абдуллин, В. В. Применение сетей стандарта WirelessHART в системах автоматизированного энергоменеджмента зданий / В. В. Абдуллин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника. – 2012. – Вып. 16. – №23 (282). – С. 210–212.

3. Абдуллин, В. В. Экспериментальное исследование сетей стандарта WirelessHART в системах автоматизированного энергоменеджмента / В. В. Абдуллин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника. – 2012. – Вып. 17. – №35 (294). – С. 110–114.

4. Абдуллин, В. В. Модельно-упреждающее управление тепловым режимом здания / В. В. Абдуллин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника. – 2015. – Т. 15. – №3. – С. 33–39.

*Статьи в зарубежных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и ведущие международные системы цитирования
Web of Science, Scopus, Springer*

5. Shnayder, D. A. A WSN-based system for heat allocating in multiflat buildings / D. A. Shnayder, V. V. Abdullin // 2013 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP) Proceedings. July 2–4, 2013. Rome, Italy. – Brno: Faculty of Electrical Engineering and Communication, Brno University of technology, 2013. – pp. 181–185.

6. Abdullin, V. V. Method of Building Thermal Performance Identification Based on Exponential Filtration / V. V. Abdullin, D. A. Shnayder, L. S. Kazarinov // Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings World Congress on Engineering 2013. Volume III. July 3–5, 2013. London, U.K. – Hong Kong: Newswood Limited; International Association of Engineers, 2013. – pp. 2226–2230.

7. Abdullin, V. V. Identification of Multistorey Building's Thermal Performance Based on Exponential Filtering / V. V. Abdullin, D. A. Shnayder, L. S. Kazarinov // Transactions on Engineering Technologies. – Heidelberg; New York; London: Springer Dordrecht, 2014. – pp. 501–512.

8. Shnayder, D. A. Building Heating Feed-forward Control Based on Indoor Air Temperature Inverse Dynamics Model / D. A. Shnayder, V. V. Abdullin, A. A. Basalaev // Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science 2014. Volume II. October 22–24, 2014. San Francisco, USA. – Hong Kong: Newswood Limited; International Association of Engineers, 2014. – pp. 886–892.

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

10. Abdullin, V. V. Implementation of an Advanced Heating Control System at the University Academic Building / V. V. Abdullin, D. A. Shnayder // ICAC 2015 – Proceedings of the 21st International Conference on Automation and Computing: Future Automation, Computing and Manufacturing. September 11–12, 2015. University of Strathclyde, Glasgow, UK. – [S. l.] : CACS UK, 2015. – pp. 151–154.

Монографии

11. Казаринов, Л. С. Автоматизированные системы управления энергоэффективным освещением / Л. С. Казаринов, Д. А. Шнайдер, В. И. Константинов, В. В. Абдуллин и др., под. ред. Л. С. Казаринова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 208 с.

Статьи в других журналах и сборниках трудов, материалах конференций

12. Абдуллин, В. В. Применение беспроводных сенсорных сетей для систем телеуправления и телеметрии инженерных объектов социальной инфраструктуры / В. В. Абдуллин // Информационно-измерительные и управляющие системы и устройства : сборник трудов Приборостроительного факультета. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – С. 6–13.
13. Абдуллин, В. В. Проблемы индивидуального учета потребления тепла в многоквартирном жилом фонде / В. В. Абдуллин // Современные проблемы гуманитарных и естественных наук : материалы IX международной научно-практической конференции 30–31 декабря 2011 г. / Науч.-инф. издат. центр «Институт стратегических исследований». – М.: Изд-во «Спецкнига», 2011. – С. 77–81.
14. Абдуллин, В. В. Автоматизированный учет и управление потреблением энергоресурсов: опыт внедрения на базе ПТК «ПолиТЭР» / В. В. Абдуллин // Коммерческий учет энергоносителей: материалы XXXIII международной научно-практической конференции. – СПб., 2013. – С. 186–199.
15. Басалаев, А. А. и др. Распределённое имитационное моделирование систем теплоснабжения / А. А. Басалаев, Т. А. Барбасова, А. Р. Хасанов, В. В. Абдуллин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых 22–26 апреля 2013 г. / под ред. Е. В. Торопова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С. 55–59.
16. Шнайдер, Д. А. Интеллектуальная автоматизация на базе ПТК «ПолиТЭР» – ключ к энергосбережению в системах городского уличного освещения / Д. А. Шнайдер, В. В. Абдуллин, А. А. Басалаев // 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.
17. Абдуллин, В. В. Алгоритм мониторинга и управления теплопотреблением жилых и административных зданий / В. В. Абдуллин // Актуальные проблемы автоматизации и управления. Труды научно-практической конференции. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2013. – С. 184–187.
18. Абдуллин, В. В. Учет теплопотребления и регулирование отопления в многоквартирном жилом доме: альтернативный подход / В. В. Абдуллин // Энергоэффективность. XXI век. Материалы 5-го международного конгресса. – СПб., 2013. – С. 186–199.
19. Шнайдер, Д. А. ПТК ПолиТЭР – единое решение для диспетчерского управления и коммерческого учета энергоресурсов / Д. А. Шнайдер, В. В. Абдуллин, А. А. Басалаев // Энергонадзор. – 2014. – №4 (56). – С. 127–128.
20. Шнайдер, Д. А. Диспетчерское управление и коммерческий учет энергоресурсов в ЖКХ на базе программно-технического комплекса «ПолиТЭР» / Д. А. Шнайдер, В. В. Абдуллин, А. А. Басалаев // Коммерческий учет энергоносителей: Материалы XXXIV международной научно-практической конференции. – СПб., 2014. – С. 90–100.
21. Абдуллин, В. В. Система управления и контроля качества отопления здания на основе метода идентификации тепловых параметров в реальном времени /

В. В. Абдуллин // Наука ЮУрГУ [Электронный ресурс] : материалы 66-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С. 627–632.

22. Шнайдер, Д. А. Энергоэффективное управление теплоснабжением зданий на основе ПТК «ПолиТЭР»: методы, алгоритмы, опыт внедрения / Д. А. Шнайдер, В. В. Абдуллин // Всероссийский форум Технологии Энергоэффективности-2015, сборник докладов и статей, 15-16 апреля 2015 г. – Екатеринбург: ООО ПК «Артикул», 2015. – С. 84–87.

23. Шнайдер, Д. А. Умные технологии в действии: упреждающее управление отоплением здания с использованием ПТК «ПолиТЭР» / Д. А. Шнайдер, В. В. Абдуллин, А. А. Басалаев // Коммерческий учет энергоносителей: Материалы XXXVI международной научно-практической Конференции. – 29 апреля 2016 г. – СПб., 2016. – С. 187–200.

24. Барбасова, Т. А. Комплексный подход к управлению и оптимизации потребления энергоресурсов на основе ПТК «ПолиТЭР» / Т. А. Барбасова, А. Р. Хасанов, В. В. Абдуллин, А. А. Басалаев // Energoatlas.ru : путеводитель по энергоэффективным решениям. – 2017. – №2. – С. 42–43.

25. Abdullin, V. V. Model predictive control of building heating process using exponential filtration in harmonic basis / V. V. Abdullin, D. A. Shnayder, L. S. Kazarinov // The 21st World-Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Proceedings. Volume II. – Winter Garden: International Institute of Informatics and Systemics, 2017. – pp. 152–157.

В авторской редакции

Подписано в печать _____. Формат 60x84 1/16.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 120 экз. Заказ _____.
