

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

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент
Шнайдер Дмитрий Александрович

Челябинск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Введение.....	4
Глава 1. Анализ проблем энергоэффективного управления Отоплением зданий и сооружений	12
1.1. Сфера применения и технические требования к системам управления температурным режимом здания.....	12
1.2. Обзор научной литературы и современных исследований в области эффективного управления отоплением зданий и помещений.....	17
1.3. Актуальность проблемы энергоэффективного управления температурным режимом зданий и помещений, постановка цели и задач исследования.....	28
Выводы к главе 1	30
Глава 2. Теоретические основы синтеза системы управления тепловым режимом здания с компенсацией возмущений	31
2.1. Структура системы управления тепловым режимом здания	31
2.2. Метод построения модели обратной динамики теплового режима здания с использованием экспоненциальной фильтрации.....	37
2.3. Реализация обратных динамических операторов на базе экспоненциальных фильтров	51
2.4. Исследование ошибки восстановления исходного сигнала с использованием обратных динамических звеньев	72
Выводы к главе 2	81
Глава 3. Моделирование тепловых и теплогидравлических процессов в отапливаемом здании.....	83
3.1. Модель теплового режима здания.....	83
3.2. Идентификация и верификация модели теплового режима здания	87
3.3. Модель теплогидравлических процессов в тепловом пункте здания	95
Выводы к главе 3	113

Глава 4. Алгоритмическое обеспечение системы управления тепловым режимом здания.....	116
4.1. Формирование температурного графика отопления	116
4.2. Алгоритм автоматической параметрической идентификации и оптимизации системы отопления	122
4.3. Порядок настройки системы управления тепловым режимом здания...	126
Выводы к главе 4.....	130
Глава 5. Технические аспекты реализации системы управления тепловым режимом здания.....	132
5.1. Общая структура комплекса технических средств.....	132
5.2. Организация пользовательского интерфейса SCADA-системы и хранение данных	133
5.3. Структура исполнительной программы контроллера АИТП.....	140
5.4. Методы автоматизированного сбора и анализа данных по температуре воздуха в помещениях	141
Выводы к главе 5.....	148
Глава 6. Экспериментальные исследования и практическая апробация.....	150
6.1. Система управления отоплением УЛК ЗБВ ЮУрГУ	150
6.2. Описание проведенных экспериментов и полученных результатов	152
6.3. Расчет экономического эффекта от внедрения разработанной системы управления тепловым режимом здания с компенсацией возмущений	158
Выводы к главе 6.....	163
Основные выводы и результаты	165
Список литературы	168
Приложение 1. Акт внедрения результатов диссертационной работы	185
Приложение 2. Акт об использовании в учебном процессе материалов и результатов кандидатской диссертации.....	187
Приложение 3. Акт внедрения автоматизированной системы регулирования теплопотребления.....	188
Приложение 4 (справочное). Исполнительная микропрограмма контроллера	190

ВВЕДЕНИЕ

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 комфортном уровне при наличии внешних возмущений, действующих на здание. Энергоэффективность определяется способностью обеспечить минимально возможное теплотребление, при этом требования комфорта выступают ограничением. Соответственно, колебания, перерегулирование, статическая ошибка регулирования ведут к неэффективному потреблению тепловой энергии.

Масштабные исследования процессов теплотребления 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., Карпис 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 теплоступлений от людей и электроприборов и т.д. Как следствие, снижаются

энергоэффективность и комфорт в зданиях. Однако, учитывая использование регулирования подачи тепла на центральных (квартирных) 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., Sokaert 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 (Moroşan P.-D., Žáčková E., Prívarová 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 обработку.

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 обработки 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.

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

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

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 теплотерь 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 отдельных 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 предоставлении субсидии №14.577.21.0026 от 05.06.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0026.

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. Орlando, 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОТОПЛЕНИЕМ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

1.1. Сфера применения и технические требования к системам управления температурным режимом здания

Синтез системы управления технологическим объектом или процессом на практике начинается с изучения данных об автоматизируемом объекте: технических характеристик, особенностей эксплуатации, технологических ограничений, нормативных требований. В существенной степени указанные данные зависят от сферы применения данного объекта. Отопление зданий и сооружений – комплексная, технологически сложная задача, имеющая социально значимую функцию. Сформулируем ряд требований, которым должна отвечать современная система отопления:

1. Система должна обладать высокой энергоэффективностью: ее внедрение должно обеспечивать реальную экономию потребленной тепловой энергии в сравнении с энергопотреблением существующих, получивших широкое распространение на практике, подходов к отоплению.

2. Система должна обеспечивать комфортные условия для потребителей тепловой энергии, а именно поддержание стабильной температуры воздуха в помещениях здания на заданном комфортном уровне, климатические показатели в здании должны соответствовать санитарным нормам.

3. Система должна обладать высокой надежностью и отказоустойчивостью, обеспечивать энергетическую безопасность потребителей энергоресурсов.

4. Система должна быть адаптирована под массовое внедрение, что подразумевает:

- высокую степень автономности и автоматизации в процессе эксплуатации;
- быстрое развертывание с высокой степенью автоматизации процессов настройки и пуско-наладки, не требующих высокой квалификации специалистов;
- низкие капитальные и эксплуатационные затраты.

Также при проектировании систем отопления ряд технических требований формируется исходя из особенностей объекта управления – отапливаемого здания или сооружения:

1. Влияние возмущений на здание.

Температура наружного воздуха T_{out} является основным возмущающим воздействием, в наибольшей степени оказывающим влияние на температуру воздуха в помещениях здания T_{ind} . Две важные особенности фактора T_{out} : существенное влияние на T_{ind} и возможность быстрого и технически простого измерения на практике – способствовали широкому распространению семейства методов «погодного» регулирования подаваемой в систему отопления тепловой энергии Q_h по температуре наружного воздуха.

Помимо основного возмущающего воздействия здание подвергается воздействию ряда других возмущений, также оказывающих значимое влияние на T_{ind} : солнечной радиации J_{rad} , ветрового воздействия V_{wind} , внутренних бытовых теплоступлений от находящихся в здании людей и работающего оборудования Q_{int} . (рисунок 1.1). Некоторые из указанных возмущений имеют быстропеременный характер. Кроме того, здание обладает значительной теплоаккумулирующей способностью Q_{acc} [93; 104; 105].

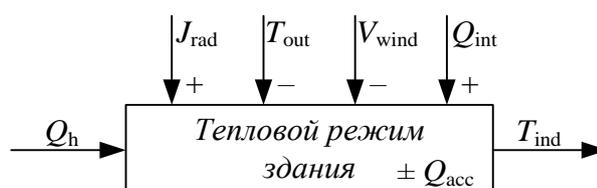


Рисунок 1.1 – Факторы, влияющие на температуру воздуха в здании

Количественная оценка указанных факторов весьма затруднительна при массовом внедрении на практике. Так, J_{rad} и V_{wind} – случайные величины, оценка которых требует использования специальных дорогостоящих датчиков. Для более точной оценки воздействия V_{wind} на здание в условиях города может также потребоваться модель ветрового обтекания здания. Величина Q_{int} для

большинства зданий, функционирующих с характерными суточными, недельными, годовыми циклами (жилые дома, офисные, административные здания, учебные заведения и т.д.), проявляет периодические свойства и достаточно хорошо поддается прогнозированию. Однако это требует либо наличия достаточно детальных данных о режимах пользования зданием, либо требует установки большого количества датчиков и наличия самообучающихся моделей. Оценка величины Q_{acc} может быть определена расчетным способом на этапе проектирования здания, но величина такой оценки будет неизбежно расходиться с фактом с течением времени.

Таким образом, несмотря на то, что указанные выше способы количественной оценки влияющих на здание факторов не представляют значительной сложности с методологической и технологической точек зрения, их применение на практике фактически ограничено единичными дорогостоящими проектами ввиду высоких капитальных затрат, для массового внедрения они малопригодны.

2. Характер и динамика процессов в здании.

Здание как объект управления представляет собой достаточно инертный объект. Процессы по различным каналам показывают разную динамику. Наиболее медленная динамика наблюдается при воздействии через перекрытия по каналам $T_{ind}(T_{out})$ и $T_{ind}(Q_{acc})$. Действующие на здание возмущения также имеют различную динамику, причем некоторые из них – существенно более быструю динамику в сравнении с динамикой объекта в целом. Так, нагревательные приборы воздействуют непосредственно на воздух и внутренние поверхности отапливаемого помещения, обеспечивая достаточно быстрый нагрев с минимальным запаздыванием, т.е. имеют быстропеременный характер, в то время как изменение T_{out} воздействует на T_{ind} через ограждающие конструкции и имеет достаточно медленную динамику. Таким образом, быстропеременный характер имеют процессы, характеризующиеся непосредственным влиянием на температуру воздуха в помещении: прежде всего Q_{int} , а также J_{rad} и Q_h .

3. Распределенный характер процессов.

Процессы теплообмена и теплоаккумуляции в здании имеют нелинейный распределенный характер, причем с ростом отапливаемого объема здания и количества стен и перекрытий наблюдается более существенное проявление свойств распределенного объекта. Одно из очевидных проявлений данного явления – существенное различие температуры воздуха в различных помещениях одного многоэтажного здания; это, в частности, затрудняет определение средней температуры в здании.

Перечисленные особенности здания как объекта управления затрудняют поиск универсального, энергоэффективного метода управления отоплением, обеспечивающего выполнение указанных выше требований.

Управление отоплением по температуре наружного воздуха.

В России базовым принципом регулирования отопления является управление по температуре наружного воздуха, являющееся с точки зрения теории управления регулированием по основному возмущающему воздействию. Данный подход начал широко применяться в 1960-х–1980-х гг. для регулирования подачи тепла на центральных (квартирных) тепловых пунктах, в его работе используются простейшие алгоритмы управления и легко измеряемые данные, при этом обеспечивается приемлемое качество управления, соответствующее техническому уровню и задачам того времени. В результате управление по температуре наружного воздуха получило широкое распространение в нашей стране и стало известно как погодное регулирование

Тем не менее, погодное регулирование не обеспечивает необходимого качества управления и энергоэффективности, соответствующих современному техническому уровню. Так, погодное регулирование и другие методы без обратной связи в процессе формирования управляющего воздействия не учитывают значение регулируемой координаты – температуры воздуха в помещении. Как следствие, снижается точность поддержания температуры воздуха в здании и уменьшается потенциал энергосбережения. Недостатки

погодного регулирования отмечены различными авторами в разные годы во множестве работ [7; 15; 46; 55; 58; 86].

Одним из ранних решений, предложенным в 1980-е годы при переходе от регулирования на ЦТП к индивидуальному регулированию в ИТП зданий, стало пофасадное регулирование. Пофасадное разделение системы отопления с индивидуальным регулированием по каждому из фасадов позволяет учитывать тепло, поступающее от солнечной радиации; это обеспечивает 5–10% дополнительной экономии тепловой энергии. Опыт реализации пофасадного регулирования на ряде зданий в Москве показал, что при температуре наружного воздуха до -7°C возможно полное отключение отопления освещенного солнцем фасада здания, причем не только в течение периода интенсивного освещения фасада солнцем, но и не менее, чем на аналогичный по длительности период времени после прекращения интенсивного освещения фасада солнцем – за счет отдачи теплоты, аккумулированной внутренними ограждениями и конструкциями здания [46; 47].

Управление отоплением по температуре воздуха в помещении.

Другим подходом к управлению отоплением является управление с обратной связью по регулируемой координате – температуре воздуха в помещении. Управление отоплением по температуре воздуха в помещениях описано в литературе и предлагается производителями оборудования, однако с учетом перечисленных выше особенностей здания как объекта управления (большая инерционность объекта, нелинейный, распределенный характер процессов) реализация регулирования подачи тепла с обратной связью по отклонению температуры воздуха в здании затруднительна: возможны перерегулирование, автоколебания, проблемы с устойчивостью. Для больших зданий также актуальна проблема выбора представительного помещения для измерения температуры воздуха в здании.

В результате на практике в большинстве автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов (АИТП) зданий по-прежнему реализуется

погодное регулирование подачи тепла как широко известный, достаточно простой и надежный способ, а управление с обратной связью по температуре воздуха в помещении реализуется в отдельных помещениях или в индивидуальном жилищном строительстве, т.е. на небольших объектах с относительно малой инерцией.

Современное развитие средств автоматизации и масштабное внедрение индивидуальных тепловых пунктов зданий в теории позволяют реализовывать более эффективные и точные алгоритмы управления отоплением. Основным фактором, характеризующим качество функционирования системы отопления, является температура воздуха в помещениях. По этой причине важным является создание систем управления, учитывающих фактические значения температуры воздуха в помещениях здания и обеспечивающих ее точное поддержание на комфортном уровне, но при этом свободных от перечисленных выше недостатков.

1.2. Обзор научной литературы и современных исследований в области эффективного управления отоплением зданий и помещений

Масштабные исследования процессов теплоснабжения зданиями начинаются со второй половины XX века. Отечественные исследователи внесли существенный теоретический и практический вклад в вопросы расчета и проектирования систем отопления зданий, повышения эффективности и качества процесса отопления. Монографии и учебники 1960-х–1980-х гг. являются фундаментальной основой для современных исследований в данной предметной области.

В [33] Зингер Н. М. приводит результаты теоретических и экспериментальных исследований теплогидравлических режимов в системах водяного теплоснабжения, а также предлагает подходы к расчету стационарных теплогидравлических режимов. В данной работе для открытых и закрытых систем теплоснабжения проводится анализ и сопоставление схем присоединения абонентов к теплосети. В работе отмечается существенная зависимость

теплогидравлических режимов систем теплоснабжения от схем присоединения абонентских установок и от способа управления тепловыми нагрузками. Основываясь на теоретических исследованиях автор делает вывод, что управление отоплением здания при централизованном теплоснабжении по температуре наружного воздуха, измеряемой с использованием инерционного датчика температуры, обеспечивает минимальные суточные отклонения температуры в помещениях здания от расчетных значений.

В [34] представлены результаты проведенных Зингером Н. М. исследований автоматизированных тепловых пунктов, в которых осуществляется регулирование подачи тепловой энергии на отопление и ГВС. Автор исследует зависимость температурного режима здания от управляющих воздействий и возмущений, рассматривая различные схемы присоединения здания к тепловым сетям. В данной работе приводится описание математической модели статических и динамических режимов системы отопления, даны характеристики регулирования отопления по различным факторам: по отклонению, по возмущающему воздействию, комбинированного регулирования. В качестве регулируемого параметра используется расход теплоносителя. При этом автор замечает, что температуры теплоносителя на входе и на выходе отапливаемого здания, равно как и их разность, не могут использоваться в качестве регулируемых параметров, поскольку в этом случае становится невозможным использование теплоаккумулирующей способности конструкций отапливаемого объекта для выравнивания суточных колебаний тепловой нагрузки.

В [46] Ливчак В. И. рассматривает вопросы автоматизации тепловых пунктов в сочетании с учетом тепловой энергии в российских системах централизованного теплоснабжения. Оптимальным с точки зрения автора является комбинированное управление: регулирование температуры теплоносителя в системе отопления осуществляется по температурному графику (зависимость температуры подаваемого теплоносителя T_{out}), при этом производится коррекция температурного графика при возникновении существенного отклонения измеряемой датчиками температуры воздуха в

помещении от уставки (таким образом, система получает обратную связь). В качестве эффективного, быстро окупаемого подхода к энергосбережению в системах централизованного теплоснабжения автор предлагает внедрение автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов зданий в сочетании с установкой приборов учета тепловой энергии.

В [75] Соколов Е. Я. рассматривает различные режимы регулирования систем централизованного теплоснабжения. Автором установлено, что для повышения качества теплоснабжения зданий и уменьшения тепловых потерь помимо центрального регулирования на ТЭЦ необходимо осуществлять регулирование тепловой нагрузки на групповых или местных тепловых пунктах (групповое и местное регулирование, соответственно). Автор отмечает, что дополнительное повышение качества теплоснабжения обеспечивается за счет индивидуального регулирования (по фасадам или отдельным помещениям), осуществляемого в дополнение к групповому или местному регулированию.

В [72–74] Сканава А. Н. рассматривает системы отопления зданий различного устройства, исследует вопросы совершенствования систем отопления здания, в том числе с точки зрения экономии тепловой энергии. В [72] приведены методы конструирования, расчета и регулирования современных систем отопления. В [74] изложены основы расчета тепловой мощности, принципы выбора, конструирования и расчета систем отопления зданий.

В [10] Богословский В. Н. исследует практические вопросы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха с позиции теплофизики. В книге приведены инженерные методы расчета воздушного режима здания, а также различных видов теплообмена и тепловлагодобывания через ограждающие конструкции. В [38] Богословский В. Н. совместно со Сканава А. Н. описывает устройство и принцип действия систем отопления различной конструкции.

Различные аспекты энергосбережения в ряде отраслей, в т. ч. в теплоэнергетике, рассмотрены в работе Лисиенко В. Г., Щелокова Я. М., Ладыгичева М. Г. [48; 49]. В книге приводятся рекомендации по повышению энергетической эффективности и качества управления с точки зрения

оптимизации потребления энергетических ресурсов. Весомый вклад в исследования по данной тематике внесен работами: Баскакова А. П. [7; 8], Данилова Н. И. и Щелокова Я. М. [29; 30], Закирова Д. Г. [32], Ширакса З. Э. [90] и др.

Широкое освещение в литературе получили вопросы автоматизации систем теплоснабжения: эффективность внедрения различных методов и подходов к регулированию в различных системах теплоснабжения, управление режимами теплоснабжения, организационные вопросы, связанные с внедрением автоматизации.

В [20–23] Глухов В. Н. предлагает подход к управлению системами потребления тепловой энергии, в основе которого лежит представление режимов функционирования системы теплоснабжения в виде набора областей энергосберегающего управления, образованных различными значениями режимных параметров. Разделение на области осуществляется независимо от текущих значений элементов вектора возмущений. Решение задачи энергосберегающего управления осуществляется для каждого текущего вектора возмущений одновременно с процессом энергопотребления с использованием предложенного автором алгоритма: осуществляется разбиение множества возможных сочетаний возмущающих воздействий на ряд подмножеств, для каждого из них по результатам экспериментов производится построение многофакторных моделей и определение векторов номинальных значений параметров, оптимальных по критерию минимума потребления энергии. В [24] автором предложена блок-схема оптимального управления энергопотребления и решается задача синтеза системы управления в контексте теплоснабжения зданий.

В [25] Громовым Н. К. рассмотрены схемы и принципы рационального построения тепловых сетей, режимы их регулирования, вопросы надежности и управления системами теплоснабжения. В данной работе автор делает вывод о необходимости изменения температурного и гидравлического режимов тепловых сетей с целью оптимизации совместного функционирования и взаимодействия объектов генерации, транспортировки и потребления тепловой энергии, для чего

необходимо осуществлять изменение и коррекцию режимов функционирования тепловой сети, учитывая изменяющиеся условия. Автор замечает, осуществление управления тепловой сетью без обратной связи крайне затруднительно, а в случае больших сетей, обладающих разветвленностью – невозможно. Если в условиях стабильных гидравлических режимов достаточно периодических данных о параметрах теплоносителя, получаемых неавтоматизированным способом, то в случае переменных гидравлических режимов необходимо иметь быстродействующую обратную связь, обеспечивающую передачу данных в реальном времени.

В [78] Табунщиковым Ю. А. и Бродачем М. М. предложена методология синтеза математических моделей теплового режима здания, включающих три энергетически связанные подсистемы:

- внешнюю среду (климат), воздействующую на здание;
- внутренний объем, внутренние конструкции и энергетические источники здания,
- энергоемкие ограждающие конструкции здания, изолирующие внутренний объем здания от внешней среды.

Авторы приводят описание математической модели отапливаемого здания как единой теплоэнергетической системы, исследуют теплоустойчивость зданий в холодный и теплый периоды, приводят аналитические выражения для расчета оптимальных показателей защиты помещения от теплового и солнечного воздействия, осуществляют сравнение лучистой и конвективной систем отопления с точки зрения энергетических затрат для обеспечения требуемого теплового режима. В работе предложен подход к проектированию зданий с высокой энергоэффективностью, использующий оптимизационные методы системного анализа.

В [80; 81] Туркиным В. П. рассматривается динамика процессов нагревания и охлаждения нагревательных приборов и ограждающих конструкций здания, а также работа систем отопления с автоматическим регулированием при использовании централизованного теплоснабжения. В работах автора

рассматриваются вопросы тепловой и гидравлической устойчивости систем водяного отопления. Автором сделан вывод, что оптимальный теплогидравлический режим в системах отопления достигается при использовании количественно-качественного регулирования, основанного на одновременном регулировании расхода и температуры теплоносителя по графикам, соответствующим гравитационной системе отопления.

В [82] Фаликовым В. С. и Витальевым В. П. определены принципы комплексной автоматизации систем централизованного теплоснабжения городов. В данной работе авторы рассматривают вопросы автоматического регулирования отпуска теплоты в тепловых пунктах, приводят схемы управления гидравлическими режимами, исследуют проблемы учета и регулирования отпуска тепловой энергии в тепловых пунктах, приводят рекомендации для проектирования и последующей эксплуатации автоматизированных тепловых пунктов.

В [58–62] Панферов В. И. исследует широкий круг вопросов в области математического моделирования и оптимального управления тепловым режимом зданий. Автор осуществляет экспериментальное исследование, верификацию и уточнение моделей, предложенных ранее Соколовым Е. Я. с учетом современных реалий. В [60] автор рассматривает математическую модель теплового режима здания. В работе сделан вывод, что при использовании для целей управления упрощенные модели имеют преимущество перед моделями, детально учитывающими физику процессов, т.к. требуют менее длительной подготовки и настройки; кроме того, обычно известны лишь приближенные коэффициенты физических моделей, что существенно ухудшает их точность. В [58] производится параметрическая идентификация математической модели отопительного прибора, сделан вывод о неточности получения графиков количественно-качественного регулирования по общепринятым эмпирическим зависимостям. В [5; 59] предложен способ оптимального управления тепловым режимом общественно-административных и производственных зданий в нерабочее время с использованием режима прерывистого отопления. В работе приводятся формулы

расчета периодов отключения отопления и последующего натопа, сделан вывод об эффективности применения режима прерывистого отопления в сравнении с режимом непрерывного отопления. В [61] рассмотрены способы структурного и параметрического синтеза регуляторов типовых объектов теплоснабжения. В [62] приведены математические модели нестационарного теплообмена теплопроводов, используемые для определения предельно допустимого времени отключения участков тепловых сетей в зимний период с целью предотвращения заморозки теплотрасс.

В [14; 18] Голяк С. А. и Гавей О. Ф. исследуют вопросы оптимальной температуры теплоносителя в системах отопления с точки зрения сокращения затрат на потребляемые энергоресурсы. Исследуются положительные и отрицательные последствия снижения температуры теплоносителя. В [56; 57] Голяк С. А. и Гавей О. Ф. совместно с Панферовым В. И. рассматривают вопросы применения низкотемпературных систем теплоснабжения и низкотемпературного отопления в России. Кроме того, Голяком С. А. также исследован ряд вопросов совершенствования систем теплоснабжения и повышения их эффективности [16; 17].

В [63; 64] Панферовым С. В. исследуются вопросы количественно-качественного управления тепловым режимом здания по отопительной и совмещенной (отопление и ГВС) нагрузкам. В [63] сделан вывод о низкой эффективности управления отоплением здания по температуре внутреннего воздуха в отдельном контрольном помещении. В [64] предложена структура системы адаптивного управления тепловым режимом здания. В работе также отмечено изменение характеристик здания в ходе эксплуатации и сделан вывод о необходимости уточнения теплотехнических параметров здания в ходе его жизненного цикла с использованием данных эксплуатации.

В [67–69] Ротов, П. В. и Шарапов В. И. исследуют температурные графики систем центрального теплоснабжения и предлагают подходы к энергоэффективному регулированию тепловой нагрузки. В работах представлен критический анализ ряда положений отечественного теплоснабжения, а также

предложены подходы к определению параметров температурного графика при качественном регулировании.

В [86; 87] Шарапов В. И. осуществляет сравнение различных способов регулирования тепловой нагрузки. В [86] рассматриваются подходы к количественному и качественно-количественному регулированию тепловой нагрузки в системах теплоснабжения, способы автоматического регулирования и гидравлической защиты местных систем отопления. В работах автор рассматривает зарубежный опыт энергосбережения в системах теплоснабжения.

В [45] Круглов Г. А. излагает основные положения технической термодинамики и теории тепломассообмена, освещает практические вопросы отопления и вентиляции. В [12; 43; 44] Круглов Г. А. исследует вопросы оптимизации конструкции теплообменных аппаратов: в [12] приводится классификация теплообменных аппаратов, в [43] предложены способы механической турбулизации потока с целью увеличения коэффициента теплоотдачи и повышения эффективности теплообменников, в [44] предложена конструкция кожухотрубного теплообменного аппарата для горячего водоснабжения индивидуальных домов.

В [109; 122; 123] Frederiksen S. и Wollerstrand J. рассматривают вопросы повышения эффективности АИТП зданий с теоретической и практической точек зрения. Автор исследует функционирование тепловых пунктов в статических и динамических режимах, а также вопросы прогнозирования тепловых нагрузок. В [109] отмечается необходимость прогнозирования тепловой нагрузки для обеспечения оптимального управления системой теплоснабжения; на основании прогноза тепловой нагрузки предлагается осуществлять расчет температуры подачи и расхода теплоносителя в нормальных и пиковых режимах функционирования.

В работах Шестакова А. Л. [9; 88; 89; 140] исследуются вопросы динамических измерений и связанных с ними проблем восстановления исходных сигналов, подвергнутых динамическим искажениям. В [9; 140] предлагаются способы восстановления динамически искаженных сигналов. В [89] предлагаются

корректирующие устройства для снижения погрешности измерительных преобразователей, содержащие модель датчика. В [88] рассматриваются вопросы достоверности результатов динамических измерений.

Одной из современных мировых тенденций в управлении является использование аппаратов нечеткой логики (Zadeh L. A., Takagi T., Sugeno M., Decher G., Atanassov K. T. и др.) и теории нейронных сетей, которые, как правило, по причине сложности выбора базисной логики и определения функций принадлежности, используются совместно в виде нейро-нечетких сетей: ANFIS [125], POPFNN [147]. Данный класс систем исследован достаточно широко (Jang J.-S. R., Nayak P. C., Kannathal N., Güler I., Zhou R. W., Quek C., Ang K.), однако отрицательные зимние температуры и риск заморозки системы отопления накладывают существенные ограничения на процесс обучения нейронной сети. В результате нейронная сеть может быть настроена не на объект управления, а на ограниченный набор предоставленных в процессе обучения данных. Таким образом, автоматическая настройка нейро-нечеткого регулятора в условиях практического использования является самостоятельной нетривиальной задачей.

В [135] отмечается ряд общих недостатков различных методов, связанных с машинным обучением (нечеткой логики, нейронных сетей, генетических алгоритмов, метода опорных векторов): непригодность для задач оптимизации, отвлеченность от физической структуры объекта управления, ухудшение качества управления при смене модели поведения пользователей здания и при изменении характеристик здания.

Широко освещены в литературе вопросы упреждающего управления. В разные годы большим количеством авторов проводились научно-аналитические обзоры по данной тематике: De Keyser R. M. C. и др. (1988) [119]; Soeterboek A. R. M. (1990) [144]; Froisy, J. B. (1993) [124]; Sanchez J. M. M., Rodellar J. (1996) [139]; Rawlings J. B. (1999) [138]; Morari M., Lee J. H. (1999) [131]; Qin S. J., Badgwell T. A. (2000) [136]; Bemporad A., Ricker N. L., Owen J. G. (2004) [111]; Corriou J.-P. (2004) [118]; Mayne D. Q. (2003) [127], (2014) [129]. В [108] авторами Allgower F., Badgwell T. A., Qin S. J., Rawlings J. B., Wright S. J. сделан обзор

нелинейных алгоритмов упреждающего управления, рассмотрены различные техники вычислений в данной области. В [128] Maune D. Q. приводит преимущества робастных и стохастических методов упреждающего управления. В [137] авторами Qin S. J. и Badgwell T. A. сделан историко-аналитический обзор промышленных программно-аппаратных решений, реализующих принципы упреждающего управления. В [120] Dounis A. I. дает обзор современных исследований в области управления микроклимата зданий с точки зрения эффективности и комфорта. Следует также указать монографии по упреждающему управлению: Bitmead R. R. (1990) [112]; Clarke D.W. (1994) [117]; Camacho E. F., Bordons C. (1995) [115], (1998) [116] и др.

Ряд авторов предлагает осуществлять управление климатом зданий с использованием получившего широкое распространение за рубежом подхода «Model predictive control» (управление с использованием прогнозирующих моделей). В [133] коллектив авторов под руководством Oldewurtel F. рассматривает использование стохастических прогнозирующих моделей для прогнозирования метеоусловий в целях повышения энергоэффективности при управлении микроклиматом зданий. В [132] Moroşan P.-D. применяет распределенный подход к MPC с разделением переменных по методу Бендерса для монозонального управления микроклимата в здании с несколькими источниками тепла.

Однако получившие развитие в 1980-х–1990-х гг. методы с использованием моделей ставят исследователя перед дилеммой: построение более точной модели объекта повышает качество управления, однако сопряжено с необходимостью использования большего количества формализованных данных об объекте и, в целом, усложняет настройку системы. Вопрос выбора оптимальной модели для целей упреждающего управления инженерными системами зданий рассматривается в [135] (Žáčková E., Prívora S., Váňa Z. и др.). Авторы формулируют требования к структуре, форме представления и частотным характеристикам моделей для различных реализаций MPC и различных методов

идентификации инженерных систем зданий, в том числе статистических. Также в работе рассматриваются результаты работы ряда реализаций MPC.

Заметим, использование точных моделей оправдано при управлении единичными (уникальными) сложными объектами, однако не столь эффективно при массовом внедрении. Таким образом, возникает актуальная задача построения модели, использующей ограниченный набор доступных измерению данных.

В [70; 79] Тверской М. М. и Румянцев Д. В. реализуют подход к упреждающему управлению комбинированными системами отопления с использованием аппарата линейного программирования, физический смысл которого заключается в переборе вершин области допустимых ограничений для нахождения минимального значения целевой функции. Авторы используют симплекс-метод и метод отсечения Гомори. В результате формируются управляющие воздействия для радиаторного и воздушного отопления в пределах заданного горизонта упреждения.

В ряде работ для формирования упреждающих оценок применяют цифровую фильтрацию. В [121; 130] коллектив авторов под руководством Medved S. решает вопрос прогнозирования циклических процессов на примере температуры наружного воздуха с использованием фильтра Калмана. Прогнозное значение, полученное с использованием данного подхода, сравнимо по точности с прогнозом метеослужб, но обеспечивает более высокую частоту дискретизации прогнозной оценки и позволяет строить автономные системы.

Вопросы оптимальной фильтрации также получили освещение в литературе. В [76] приводится обзор методов оптимальной фильтрации для управления стохастическими динамическими системами. В [145] Sorenson H. W. предлагает применение фильтров Калмана в контурах управления динамическими системами. В [126] Jazwinski A. H. рассматривает теорию фильтрации стохастических процессов. В [92] Шмидт Дж. исследует вопросы расходимости фильтров, рассматривает теорию линейной и нелинейной фильтрации, а также предлагает построение субоптимальных фильтров на их основе.

Таким образом, по результатам выполненного обзора литературы можно сделать вывод о наличии в России и за рубежом многочисленных исследований в области автоматического и автоматизированного управления микроклиматом зданий. Однако проблема энергоэффективного управления теплотреблением 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 в зданиях и сооружениях различного вида и назначения, использовать при расчетах и моделировании доступные непосредственному измерению данные, обладать легкостью конфигурации и включать алгоритмы автоматической настройки.

1.3. Актуальность проблемы энергоэффективного управления температурным режимом зданий и помещений, постановка цели и задач исследования

Повышение эффективности систем отопления зданий является одной из важных задач энерго- и ресурсосбережения для жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. В России и ряде других северных стран, где отопительный сезон длится большую часть года, расходы на отопление составляют значительную долю в общих затратах на потребление энергоресурсов жилыми и административными зданиями. По данным Федеральной службы государственной статистики на 2015 г. в России насчитывается около 2,9 млн. многоквартирных жилых домов; суммарная мощность источников теплоснабжения составляет 609,3 тыс. Гкал/ч, в 2015 г. произведено 792,31 млн. Гкал тепловой энергии [103]. Объем рынка производства и распределения

тепловой энергии составляет порядка сотен миллиардов рублей в год. В этой связи системы отопления зданий должны отвечать критериям энергоэффективности, надежности и комфорта.

Например, применительно к комплексу зданий кампуса Южно-Уральского государственного университета доля тепловой энергии в общем энергопотреблении составляет около 36% [96]. Доля тепловой энергии в структуре энергоресурсов, потребляемых многоквартирными домами по данным ряда исследований еще выше – от 60% до 75% [37]. Приведенные данные подчеркивают актуальность разработки методов и алгоритмов энергоэффективного управления температурным режимом зданий и помещений.

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 3БВ ЮУрГУ с функциями автоматической идентификации модели и настройки параметров системы управления в условиях реальной эксплуатации, расчет экономического эффекта от внедрения системы управления.

Выводы к главе 1

1. Проблема повышения энергетической эффективности систем отопления является актуальной с точки зрения ряда факторов: объема рынка, социальной значимости вопроса, невозобновляемости энергоресурсов, экологической безопасности. Данную проблему необходимо рассматривать совместно с проблемой качества регулирования и обеспечения комфортного микроклимата в помещениях потребителей.

2. Получившее широкое распространение в России погодное регулирование отопления зданий обладает рядом преимуществ с точки зрения практического использования, однако, не является эффективным ни с точки зрения энергопотребления, ни с точки зрения качества регулирования и потребительского комфорта.

3. В мире проводится большой объем исследований в области повышения энергетической эффективности систем отопления зданий и существует значительное количество различных подходов к оптимальному, упреждающему, модельно-прогнозирующему управлению, применяются подходы, основанные на использовании аппаратов нейронных сетей, генетических алгоритмов, нечеткой логики, цифровой фильтрации. Каждый из рассмотренных подходов имеет свои достоинства и недостатки. Однако, на сегодняшний день проблему энергоэффективного управления в системах отопления нельзя считать полностью решенной, что подчеркивает актуальность цели и задач диссертационного исследования.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ЗДАНИЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ВОЗМУЩЕНИЙ

2.1. Структура системы управления тепловым режимом здания

Как было рассмотрено выше в п. 1.1, здание подвергается воздействию большого количества возмущающих факторов, динамика которых может быть существенно более быстрой в сравнении с общей динамикой теплового режима здания. Это значительно затрудняет применение классического управления по замкнутому контуру по температуре воздуха в здании.

В качестве возможного решения проблемы может быть применен подход, реализующий принципы упреждающего управления. Однако заметим, что использование упреждающего управления может вызвать «дифференцирующий эффект», заключающийся в существенном усилении высокочастотной составляющей действующих на систему возмущений. Для отработки такого рода быстрых колебаний в системе управления требуются сильные управляющие воздействия, реализация которых с практической точки зрения является труднореализуемой ввиду физических ограничений на амплитуду сигналов управления и состояния системы.

Для преодоления указанной выше проблемы в работе предложена новая двухконтурная структура системы упреждающего управления тепловым режимом здания, включающая базовый канал управления и корректирующий контур. Обобщенная структура предложенного метода управления тепловым режимом здания представлена на рисунке 2.1 [107; 142; 143]. Базовый канал управления осуществляет программное управление подачи тепловой энергии $Q_h^{T_{out}}$ в зависимости от основного возмущающего воздействия – температуры наружного воздуха T_{out} в соответствии с температурным графиком отопления. Дополнительно в систему вводится корректирующий контур, который осуществляет коррекцию подачи тепла на отопление здания по упреждающей

оценке температуры воздуха в помещении с учетом действия на объект регулирования различных возмущающих факторов, т.е. компенсирует эти возмущения. Тепловая мощность Q_h , подаваемая в систему отопления здания, формируется как сумма выходов базового канала и корректирующего контура:

$$Q_h = Q_h^{T_{out}} + \Delta Q_h^{T_{ind}} \quad (2.1)$$

где $\Delta Q_h^{T_{ind}}$ – корректирующее значение тепловой мощности [142].

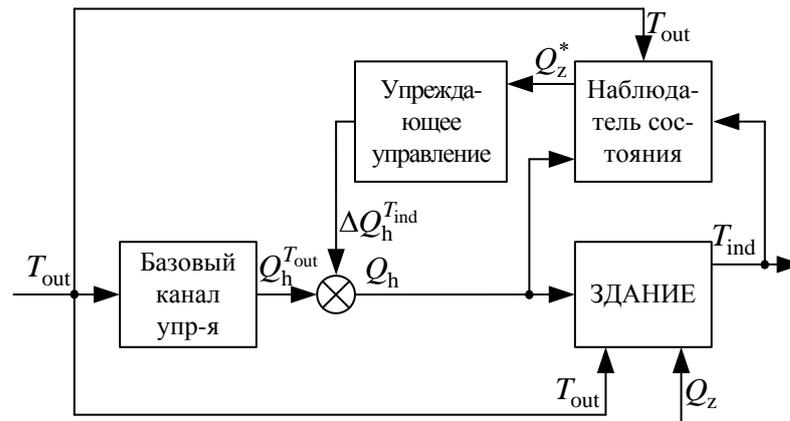


Рисунок 2.1 – Обобщенная концептуальная структура управления тепловым режимом здания

Для учета неизмеряемых на практике факторов (рисунок 1.1), влияющих на температуру воздуха в помещениях здания T_{ind} , применяется подход, основанный на концепции обобщенного возмущения [104; 105]. Обобщенное возмущение Q_z – определяемая по модели величина, характеризующая суммарное влияние возмущающих факторов (солнечной радиации J_{rad} , ветра V_{wind} , теплопоступлений от внутренних источников Q_{int} , собственной теплоаккумулирующей способности здания Q_{acc}) на температуру воздуха в здании T_{ind} . В главе 1.1 было отмечено, что измерение влияния указанных факторов на практике затруднительно. Кроме того, применительно к задаче стабилизации температуры воздуха в помещениях здания необходимость оценивать влияние каждого из этих факторов в отдельности отсутствует – достаточно оценивать их совокупное влияние. Использование концепции обобщенного возмущения позволяет проводить такую оценку в

реальном времени. При этом в отличие от большого количества различных методов оценки влияния отдельных возмущений, основанных на моделировании вызывающих их физических явлений, предлагаемый подход позволяет с достаточной точностью оценить суммарное воздействие возмущающих факторов лишь по доступным непосредственному измерению данным и оценить влияние возмущений на здание сопоставлением потоков подаваемой тепловой мощности, потребляемой тепловой мощности и тепловой мощности возмущений.

С использованием модели процесса из сигналов T_{out} , Q_h , Q_z формируется упреждающая оценка температуры воздуха в помещении T_{ind}^* . Структура синтезированной таким образом системы управления представлена на рисунке 2.2.

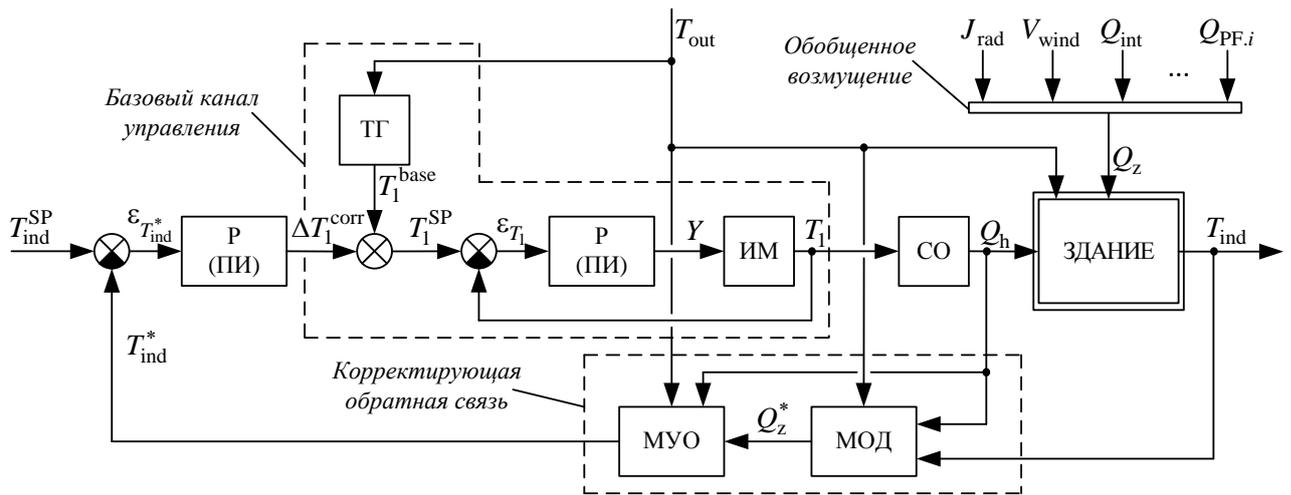


Рисунок 2.2 – Структурная схема системы управления тепловым режимом здания

На рисунке показаны блоки: P (ПИ) – пропорционально-интегральный регулятор, ТГ – температурный график отопления здания, ИМ – исполнительный механизм (регулирующий клапан узла смешения), СО – система отопления здания, МОД – модель обратной динамики, МУО – модельно-упреждающая оценка. На рисунке также показаны сигналы: T_{out} – температура наружного воздуха, T_{ind}^{SP} – уставка по температуре воздуха в помещениях здания, T_{ind}^* – упреждающая оценка температуры воздуха в помещениях здания, $\epsilon_{T_{ind}^*}$ – 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 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 .

Система управления тепловым режимом здания, изображенная на рисунке 2.2, состоит из базового канала управления, в котором осуществляется программное управление подачей тепла посредством изменения T_1 в соответствии с температурным графиком $T_1(T_{\text{out}})$. При этом имеется подчиненный контур стабилизации T_1 , уставкой для которого является выход температурного графика $T_1(T_{\text{out}})$. Также система содержит корректирующий контур, осуществляющий коррекцию уставки для подчиненного контура стабилизации. Таким образом, желаемое значение температуры подаваемого в систему отопления теплоносителя формируется как сумма выходов базового канала управления и корректирующего контура. Коррекция уставки производится по упреждающей оценке T_{ind}^* температуры воздуха в помещениях, формируемой посредством корректирующей обратной связи с учетом T_{out} , Q_h и упреждающей оценки Q_z^* обобщенного возмущения Q_z .

Поясним физический смысл величины Q_z^* . Модель теплового режима здания условно может быть разделена на 2 составляющие (рисунок 2.3):

– нелинейную статическую часть модели, отражающую статическую зависимость $T_{\text{ind}}^*(Q_h, Q_z, T_{\text{out}})$, где под величиной T_{ind}^* на данном шаге исследования понимается установившаяся при текущих значениях Q_h , Q_z , T_{out} температура воздуха в здании без учета динамики процессов;

– характеризующий инерционные свойства объекта управления линейный динамический оператор $F(p)$, описывающий динамику изменения T_{ind} при изменении одного из параметров Q_h, Q_z, T_{out} . Таким образом,

$$T_{\text{ind}}(t) = T_{\text{ind}}(T_{\text{ind}}^*(t - \Delta t)) = T_{\text{ind}}(Q_h(t - \Delta t), T_{\text{out}}(t - \Delta t), Q_z(t - \Delta t)), \quad (2.2)$$

т.е. значение T_{ind} в текущий момент времени t зависит не от текущих значений параметров Q_h, Q_z, T_{out} , а от их значений в некоторый момент в прошлом, сдвинутый относительно текущего на время Δt . С учетом того, что сигналы T_{ind} и T_{ind}^* имеют одинаковую размерность, а также с учетом допущения (3.11) (см. параграф 3.1) оператор $F(p)$ будет иметь единичный коэффициент передачи.

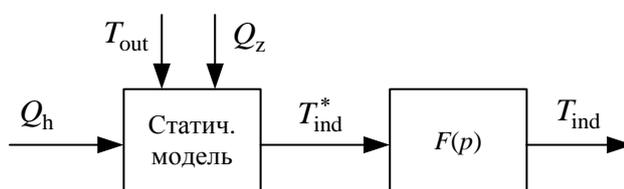


Рисунок 2.3 – Обобщенная структура блока «Тепловой режим здания»

При оценке величины Q_z по модели необходимо учитывать динамику процессов теплообмена в здании. Для этих целей составляется обратная динамическая модель объекта (рисунок 2.4). В качестве входных данных используются значения величин $T_{\text{ind}}(t), Q_h(t), T_{\text{out}}(t)$ в текущий момент времени t . При этом из рисунка 2.3 и выражения (2.2) следует, что искомое значение обобщенного возмущения $Q_z(t)$ и входные параметры обратной динамической модели $Q_h(t), T_{\text{out}}(t)$ определяют значение T_{ind} в некоторый момент в будущем, сдвинутый по времени на Δt :

$$T_{\text{ind}}(t + \Delta t) = T_{\text{ind}}(Q_h(t), T_{\text{out}}(t), Q_z(t)) = T_{\text{ind}}^*(t). \quad (2.3)$$

Таким образом, величина T_{ind}^* является упреждающей оценкой температуры воздуха в здании, т.е. оценкой значения температуры в здании, которая наступит в будущем в момент времени $t + \Delta t$.

Для получения упреждающей оценки T_{ind}^* составим обратный динамический оператор $F^{-1}(p)$ (рисунок 2.4), который является формальным обращением динамического оператора $F(p)$ и компенсирует вызванный динамикой объекта временной сдвиг Δt . Статическая часть модели обращается соответствующими алгебраическими уравнениями. На вход статической части обратной модели подается не текущее (измеряемое) значение T_{ind} , а ее упреждающая оценка T_{ind}^* . Вследствие этого на выходе модели обратной динамики формируется упреждающая оценка Q_z^* , характеризующая совокупное действие возмущающих факторов в текущий момент времени t , однако его влияние на величину T_{ind} проявится в будущем в момент времени $t+\Delta t$.

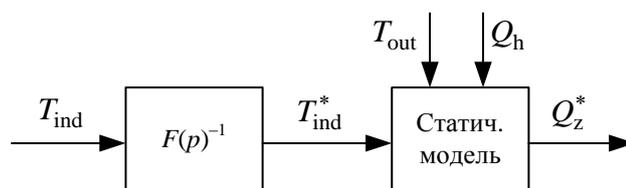


Рисунок 2.4 – Обобщенная структура блока «Модель обратной динамики»

Для наглядности заметим, что в случае подачи на вход статической части обратной модели текущего значения $T_{\text{ind}}(t)$ на выходе обратной модели формировалась бы величина $Q_z(t-\Delta t)$, характеризующая действие возмущающих факторов в прошлом в момент времени $t-\Delta t$. При попытке его использования для компенсации действия возмущений в текущий момент времени t наблюдалось бы отставание в компенсации, результатом которого является возникновение ошибки регулирования. Этим объясняется необходимость использования упреждающей оценки Q_z^* .

На практике структура модели обратной динамики может иметь более сложный характер. Более подробно моделирование теплового режима здания рассмотрено в параграфе 3.1.

2.2. Метод построения модели обратной динамики теплового режима здания с использованием экспоненциальной фильтрации

Формирование упреждающей оценки Q_z^* осуществляется на основе использования прямых и обратных моделей динамики (тепловой инерции) здания. Поскольку в составе модели динамики теплового режима здания имеется динамический оператор (см. рисунок 2.3), то для построения обратной модели динамики необходимо обращение указанного динамического оператора. В данной работе предлагается построение обратных динамических операторов с использованием метода экспоненциальной фильтрации в полиномиальном базисе. В данном подходе используется типовое представление оператора динамики объекта управления (системы отопления здания) в виде инерционного звена с запаздыванием, имеющего единичный коэффициент передачи (см. параграф 2.1):

$$F(p) = \frac{1}{a_0 + a_1 p + \dots + a_i p^i + \dots + a_n p^n} \cdot e^{-p\tau_d}. \quad (2.4)$$

Данный подход к представлению технологических процессов в линейном виде является типовым и имеет широкое практическое применение. 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 (2.4) имеет вид:

$$F^{-1}(p) = (a_0 + a_1 p + \dots + a_i p^i + \dots + a_n p^n) \cdot e^{p\tau_d}. \quad (2.5)$$

Оператор (2.5) позволяет получить оценку входного сигнала динамического оператора (2.4) по измеренному выходному сигналу. В контексте имеющейся задачи для системы, представленной на рисунке 2.2, формальное обращение (2.5) позволяет формировать упреждающую оценку выходного сигнала блока «МОД» (величина Q_z^*) по текущему измеряемому значению T_{ind} . Для этого блок «Здание» примет вид, представленный на рисунке 2.3, а блок «МОД» – вид, представленный на рисунке 2.4.

Построение обратного динамического оператора осуществляется с использованием метода экспоненциальной фильтрации, рассмотренного в статьях [104; 105], ранее исследованного в работах Шнайдера Д. А. [94], Казаринова Л. С. [19; 35; 36], использующего прогнозирующие свойства экспоненциального сглаживания (работы Лукашина Ю. П. [51], Четыркина Е.М. [83], Чуева Ю.П. [84], Brown R. G. [113; 114] и др.). Для построения обратного оператора на базе экспоненциального фильтра осуществим разложение $T_{\text{ind}}(t)$ в степенной ряд:

$$T_{\text{ind}}(t - \lambda) \approx \sum_{i=0}^n g_i(t) \lambda^i, \quad (2.6)$$

где λ – интервал ретроспективы, $g_i(t)$ – спектральные составляющие разложения.

Внесем временной сдвиг на величину запаздывания τ_d и запишем выражение (2.6) в виде:

$$T_{\text{ind}}(t - (\lambda - \tau_d)) \approx \sum_{i=0}^n g_i(t) (\lambda - \tau_d)^i \quad (2.7)$$

В соответствии с биномом Ньютона

$$(\lambda - \tau_d)^i = \sum_{k=0}^i C_k^i \cdot \lambda^k \cdot \tau_d^{i-k} \cdot (-1)^{i-k}, \quad (2.8)$$

где

$$C_k^i = \frac{i!}{k!(i-k)!}. \quad (2.9)$$

Произведем подстановку (2.8), (2.9) в (2.7), тогда выражение для T_{ind} с учетом τ_d примет вид:

$$\begin{aligned} T_{\text{ind}}(t - (\lambda - \tau_d)) &\approx \sum_{i=0}^n \left[g_i(t) \cdot \sum_{k=0}^i \left[C_k^i \cdot \lambda^k \cdot \tau_d^{i-k} \cdot (-1)^{i-k} \right] \right] = \\ &= \sum_{i=0}^n \left[i! \cdot g_i(t) \cdot \sum_{k=0}^i \frac{\lambda^k \cdot \tau_d^{i-k} \cdot (-1)^{i-k}}{k!(i-k)!} \right]. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Разложим T_{ind} без учета τ_d в ряд Тейлора:

$$T_{\text{ind}}(t - \lambda) \approx \sum_{i=0}^n (-1)^i \cdot \frac{T_{\text{ind}}^{(i)}(t)}{i!} \cdot \lambda^i \quad (2.11)$$

Сравнив (2.6) с (2.11), получим

$$T_{\text{ind}}^{(i)}(t) = (-1)^i i! g_i(t) \quad (2.12)$$

Из (2.5), с учетом (2.12), для случая представления объекта без запаздывания τ_d выход обратного динамического оператора будет иметь вид:

$$T_{\text{ind}}^*(t) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot T_{\text{ind}}^{(i)}(t) = \sum_{i=0}^n (-1)^i \cdot i! \cdot a_i \cdot g_i(t) \quad (2.13)$$

Сравнив (2.6) с (2.13), получим:

$$\lambda^i = (-1)^i \cdot i! \cdot a_i \quad (2.14)$$

Подставим (2.14) в (2.10) и определим выход обратного динамического оператора для случая представления объекта с запаздыванием τ_d :

$$\begin{aligned} T_{\text{ind}}^*(t) &\approx \sum_{i=0}^n \left[g_i(t) \cdot \sum_{k=0}^i \left[C_k^i \cdot \tau_d^{i-k} \cdot (-1)^{i-k} \cdot (-1)^k \cdot k! \cdot a_k \right] \right] = \\ &= \sum_{i=0}^n \left[(-1)^i \cdot g_i(t) \cdot \sum_{k=0}^i \left[k! \cdot \frac{i!}{k! \cdot (i-k)!} \cdot a_k \cdot \tau_d^{i-k} \right] \right] = \\ &= \sum_{i=0}^n \left[(-1)^i i! \cdot g_i(t) \cdot \sum_{k=0}^i \frac{a_k \cdot \tau_d^{i-k}}{(i-k)!} \right]. \end{aligned} \quad (2.15)$$

На практике обычно ограничиваются описанием динамических систем дифференциальными уравнениями второго или третьего порядка. Однако при использовании в моделях звеньев чистого запаздывания может потребоваться их разложение с использованием полиномов более высокого порядка. В качестве примера рассмотрим ход разложения обратного оператора (2.5) в степенной ряд (2.15) до пятого порядка ($n = 5$) и получим для $T_{\text{ind}}(t)$:

при $i=0$:

$$\begin{aligned} T_{\text{ind}[0]}(t) &= (-1)^0 \cdot g_0(t) \cdot \sum_{k=0}^0 \left[k! \cdot C_k^0 \cdot a_k \cdot \tau_d^{0-k} \right] = \\ &= g_0(t) \cdot 0! \cdot C_0^0 \cdot \tau_d^{0-0} = g_0(t) \cdot 1 \cdot a_0 \cdot 1 = g_0(t) a_0; \end{aligned}$$

при $i=1$:

$$\begin{aligned}
T_{\text{ind}[1]}(t) &= (-1)^1 \cdot g_1(t) \cdot \sum_{k=0}^1 \left[k! \cdot C|_k^1 \cdot a_k \cdot \tau_d^{1-k} \right] = \\
&= -g_1(t) \cdot \left(0! \cdot C|_0^1 \cdot a_0 \cdot \tau_d^{1-0} + 1! \cdot C|_1^1 \cdot a_1 \cdot \tau_d^{1-1} \right) = \\
&= -g_1(t) \cdot (1 \cdot 1 \cdot a_0 \cdot \tau_d + 1 \cdot 1 \cdot a_1 \cdot 1) = -g_1(t) \cdot (a_0 \tau_d + a_1);
\end{aligned}$$

при $i=2$:

$$\begin{aligned}
T_{\text{ind}[2]}(t) &= (-1)^2 \cdot g_2(t) \cdot \sum_{k=0}^2 \left[k! \cdot C|_k^2 \cdot a_k \cdot \tau_d^{2-k} \right] = \\
&= g_2(t) \cdot \left(0! \cdot C|_0^2 \cdot a_0 \cdot \tau_d^{2-0} + 1! \cdot C|_1^2 \cdot a_1 \cdot \tau_d^{2-1} + 2! \cdot C|_2^2 \cdot a_2 \cdot \tau_d^{2-2} \right) = \\
&= g_2(t) \cdot (1 \cdot 1 \cdot a_0 \cdot \tau_d^2 + 1 \cdot 2 \cdot a_1 \cdot \tau_d + 2 \cdot 1 \cdot a_2 \cdot 1) = g_2(t) \cdot (a_0 \tau_d^2 + 2a_1 \tau_d + 2a_2).
\end{aligned}$$

при $i=3$:

$$\begin{aligned}
T_{\text{ind}[3]}(t) &= (-1)^3 \cdot g_3(t) \cdot \sum_{k=0}^3 \left[k! \cdot C|_k^3 \cdot a_k \cdot \tau_d^{3-k} \right] = \\
&= -g_3(t) \cdot \left(0! \cdot C|_0^3 \cdot a_0 \cdot \tau_d^{3-0} + 1! \cdot C|_1^3 \cdot a_1 \cdot \tau_d^{3-1} + 2! \cdot C|_2^3 \cdot a_2 \cdot \tau_d^{3-2} + \right. \\
&\quad \left. + 3! \cdot C|_3^3 \cdot a_3 \cdot \tau_d^{3-3} \right) = -g_3(t) \cdot (1 \cdot 1 \cdot a_0 \cdot \tau_d^3 + 1 \cdot 3 \cdot a_1 \cdot \tau_d^2 + 2 \cdot 3 \cdot a_2 \cdot \tau_d + 6 \cdot 1 \cdot a_3 \cdot 1) = \\
&= -g_3(t) \cdot (a_0 \tau_d^3 + 3a_1 \tau_d^2 + 6a_2 \tau_d + 6a_3).
\end{aligned}$$

при $i=4$:

$$\begin{aligned}
T_{\text{ind}[4]}(t) &= (-1)^4 \cdot g_4(t) \cdot \sum_{k=0}^4 \left[k! \cdot C|_k^4 \cdot a_k \cdot \tau_d^{4-k} \right] = \\
&= g_4(t) \cdot \left(0! \cdot C|_0^4 \cdot a_0 \cdot \tau_d^{4-0} + 1! \cdot C|_1^4 \cdot a_1 \cdot \tau_d^{4-1} + 2! \cdot C|_2^4 \cdot a_2 \cdot \tau_d^{4-2} + \right. \\
&\quad \left. + 3! \cdot C|_3^4 \cdot a_3 \cdot \tau_d^{4-3} + 4! \cdot C|_4^4 \cdot a_4 \cdot \tau_d^{4-4} \right) = g_4(t) \cdot (1 \cdot 1 \cdot a_0 \cdot \tau_d^4 + \\
&\quad + 1 \cdot 4 \cdot a_1 \cdot \tau_d^3 + 2 \cdot 5 \cdot a_2 \cdot \tau_d^2 + 6 \cdot 4 \cdot a_3 \cdot \tau_d + 24 \cdot 1 \cdot a_4 \cdot 1) = \\
&= g_4(t) \cdot (a_0 \tau_d^4 + 4a_1 \tau_d^3 + 12a_2 \tau_d^2 + 24a_3 \tau_d + 24a_4).
\end{aligned}$$

при $i=5$:

$$\begin{aligned}
T_{\text{ind}[5]}(t) &= (-1)^5 \cdot g_5(t) \cdot \sum_{k=0}^5 \left[k! \cdot C_k^5 \cdot a_k \cdot \tau_d^{5-k} \right] = \\
&= -g_5(t) \cdot \left(0! \cdot C_0^5 \cdot a_0 \cdot \tau_d^{5-0} + 1! \cdot C_1^5 \cdot a_1 \cdot \tau_d^{5-1} + 2! \cdot C_2^5 \cdot a_2 \cdot \tau_d^{5-2} + \right. \\
&\quad \left. + 3! \cdot C_3^5 \cdot a_3 \cdot \tau_d^{5-3} + 4! \cdot C_4^5 \cdot a_4 \cdot \tau_d^{5-4} + 5! \cdot C_5^5 \cdot a_5 \cdot \tau_d^{5-5} \right) = \\
&= -g_5(t) \cdot \left(1 \cdot 1 \cdot a_0 \cdot \tau_d^5 + 1 \cdot 5 \cdot a_1 \cdot \tau_d^4 + 2 \cdot 10 \cdot a_2 \cdot \tau_d^3 + 6 \cdot 10 \cdot a_3 \cdot \tau_d^2 + \right. \\
&\quad \left. + 24 \cdot 5 \cdot a_4 \cdot \tau_d + 120 \cdot 1 \cdot a_5 \cdot 1 \right) = \\
&= -g_5(t) \cdot \left(a_0 \tau_d^5 + 5a_1 \tau_d^4 + 20a_2 \tau_d^3 + 60a_3 \tau_d^2 + 120a_4 \tau_d + 120a_5 \right).
\end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned}
T_{\text{ind}}(t) &\approx T_{\text{ind}[0]}(t) + T_{\text{ind}[1]}(t) + T_{\text{ind}[2]}(t) + T_{\text{ind}[3]}(t) + \quad (2.16) \\
&\quad + T_{\text{ind}[4]}(t) + T_{\text{ind}[5]}(t) + \dots = g_0(t)a_0 - g_1(t) \cdot (a_0 \tau_d + a_1) + \\
&\quad + g_2(t) \cdot (a_0 \tau_d^2 + 2a_1 \tau_d + 2a_2) - g_3(t) \cdot (a_0 \tau_d^3 + 3a_1 \tau_d^2 + 6a_2 \tau_d + 6a_3) + \\
&\quad + g_4(t) \cdot (a_0 \tau_d^4 + 4a_1 \tau_d^3 + 12a_2 \tau_d^2 + 24a_3 \tau_d + 24a_4) - \\
&\quad - g_5(t) \cdot (a_0 \tau_d^5 + 5a_1 \tau_d^4 + 20a_2 \tau_d^3 + 60a_3 \tau_d^2 + 120a_4 \tau_d + 120a_5) + \dots
\end{aligned}$$

Разложение для более высоких порядков проводится аналогично.

При $\tau_d = 0$ ряд (2.16) вырождается в выражение вида (2.13):

$$\begin{aligned}
T_{\text{ind}}(t) &\approx g_0(t)a_0 - g_1(t)a_1 + 2g_2(t)a_2 - 6g_3(t)a_3 + \quad (2.17) \\
&\quad 24g_4(t)a_4 - 120g_5(t)a_5 + \dots
\end{aligned}$$

с конечным количеством составляющих разложения, которое определяется порядком системы.

Порядок фильтра (количество формируемых спектральных составляющих $g_i(t)$) определяется исходя из модели динамики объекта, требований к точности и располагаемых вычислительных ресурсов. Особенности построения обратных динамических операторов для различных представлений динамики здания рассмотрены в главе 2.3.

Далее подробнее рассмотрим процесс нахождения спектральных составляющих разложения – проекций $g_i(t)$. Для этого определим ошибку разложения $T_{\text{ind}}(t)$ в степенной ряд (2.6):

$$\Delta T_{\text{ind}}(t - \lambda) = T_{\text{ind}}(t - \lambda) - \sum_i g_i(t) \lambda^i. \quad (2.18)$$

В [94; 104] предложено использование экспоненциально-средней ошибки на основе применения к (2.18) оператора экспоненциального сглаживания:

$$E^2(t) = \frac{1}{T_{\text{EF}}} \cdot \int_0^{\infty} \Delta T_{\text{ind}}^2(t - \lambda) \cdot e^{-\lambda/T_{\text{EF}}} \cdot d\lambda, \quad (2.19)$$

где T_{EF} – постоянная времени экспоненциального фильтра.

Определение спектральных составляющих разложения $g_i(t)$ предлагается осуществить по критерию $\min(E^2(t))$, необходимым условием которого является равенство нулю частных производных по проекциям g_i :

$$\frac{\partial E^2(t)}{\partial g_i} = 0, \quad i = \overline{0, n}. \quad (2.20)$$

Из (2.19), (2.20):

$$-\frac{2}{T_{\text{EF}}} \int_0^{\infty} \left(T_{\text{ind}}(t - \lambda) - \sum_j g_j(t) \lambda^j \right) \lambda^i e^{-\lambda/T_{\text{EF}}} d\lambda = 0; \quad i = \overline{0, n}. \quad (2.21)$$

Приведем систему уравнений (2.21) к каноническому виду:

$$\sum_j g_j(t) \left(\frac{1}{T_{\text{EF}}} \int_0^{\infty} \lambda^{i+j} e^{-\lambda/T_{\text{EF}}} d\lambda \right) = \frac{1}{T_{\text{EF}}} \int_0^{\infty} T_{\text{ind}}(t - \lambda) \lambda^i e^{-\lambda/T_{\text{EF}}} d\lambda, \quad i = \overline{0, n}. \quad (2.22)$$

Введем обозначения:

$$q_{ij} = \frac{1}{T_{\text{EF}}} \cdot \int_0^{\infty} \lambda^{i+j} \cdot e^{-\lambda/T_{\text{EF}}} \cdot d\lambda = T_{\text{EF}}^{-(i+j)} \cdot (i+j)!; \quad (2.23)$$

$$\mu_i(t) = \frac{1}{T_{\text{EF}}} \cdot \int_0^{\infty} T_{\text{ind}}(t - \lambda) \cdot \lambda^i \cdot e^{-\lambda/T_{\text{EF}}} d\lambda. \quad (2.24)$$

Подставив (2.23) и (2.24) в (2.22), получим систему уравнений:

$$\sum_j q_{ij} g_j(t) = \mu_i(t), \quad i = \overline{0, n}. \quad (2.25)$$

и запишем ее в матрично-векторной форме

$$\mathbf{Q}\mathbf{g}(t) = \boldsymbol{\mu}(t), \quad (2.26)$$

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.

Формальным решением (2.26) является:

$$\mathbf{g}(t) = \mathbf{P}\boldsymbol{\mu}(t), \quad (2.27)$$

где $\mathbf{P} = \mathbf{Q}^{-1}$.

Определим $\tau = t - \lambda$ и запишем формулу определения моментов сигнала (2.24) в виде:

$$\mu_i(t) = \frac{1}{T_{\text{EF}}} \int_{-\infty}^t T_{\text{ind}}(\tau) \cdot (t - \tau)^i \cdot e^{-(t-\tau)/T_{\text{ESF}}} \cdot d\tau. \quad (2.28)$$

Соответственно, производные (2.28) могут быть записаны в виде:

$$\left. \begin{aligned} \mu'_0(t) &= \frac{T_{\text{ind}}(t)}{T_{\text{EF}}} - \frac{\mu_0(t)}{T_{\text{EF}}}; \\ \mu'_i(t) &= i\mu_{i-1}(t) - \frac{\mu_i(t)}{T_{\text{EF}}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

С целью программной реализации экспоненциального фильтра рассмотрим численное решение уравнений (2.29). Существенное значение имеет проблема устойчивости методов численного интегрирования. Данная проблема особенно важна для систем, реакция которых представима суммой экспонент с существенно различающимися постоянными времени. Это характерно, в частности, для рассматриваемого случая интегрирования «медленного» основного процесса на фоне «быстрых» возмущений и шумов. Известно, что только неявные методы интегрирования обладают свойством абсолютной устойчивости, т.е. позволяют получить ограниченное решение при любом шаге интегрирования [31]. Оптимальным по совокупности трех факторов: точности, устойчивости и

простоте реализации – является метод конечных разностей в виде неявной схемы Эйлера [39; 85]:

$$\left. \frac{d\mu}{dt} \right|_{t=t_{[k]}} = \frac{\mu_{[k]} - \mu_{[k-1]}}{\Delta t}. \quad (2.30)$$

Применим преобразование (2.30) к системе (2.29) и получим систему рекуррентных разностных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \mu_{0[k]} &= \frac{1}{1 + \Delta t/T_{\text{EF}}} \cdot \mu_{0[k-1]} + \frac{1}{T} \cdot \frac{\Delta t}{1 + \Delta t/T_{\text{EF}}} \cdot T_{\text{ind}[k]}; \\ \mu_{i[k]} &= \frac{1}{1 + \Delta t/T_{\text{EF}}} \cdot \mu_{i[k-1]} + i \cdot \frac{\Delta t}{1 + \Delta t/T_{\text{EF}}} \cdot \mu_{i-1[k]}. \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

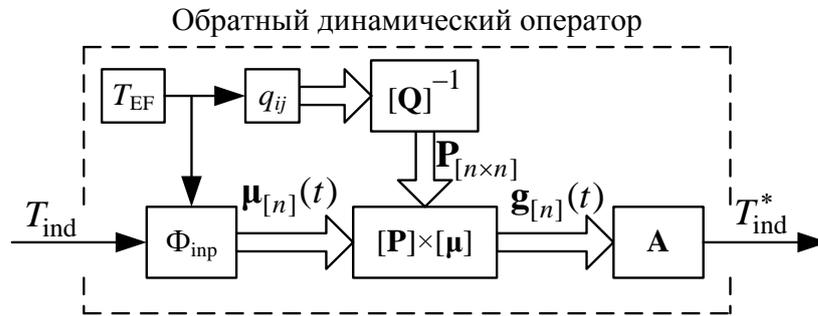
Таким образом, из (2.27), (2.31) получим систему разностных уравнений экспоненциального фильтра:

$$\left. \begin{aligned} \mu_{0[k]} &= \frac{1}{1 + \Delta t/T_{\text{EF}}} \left(\mu_{0[k-1]} + T_{\text{ind}[k]} \cdot \Delta t/T \right); \\ \mu_{i[k]} &= \frac{1}{1 + \Delta t/T_{\text{EF}}} \left(\mu_{i[k-1]} + i \cdot \Delta t \cdot \mu_{i-1[k]} \right), \quad i = \overline{1, n}; \\ \mathbf{g}_{[k]} &= \mathbf{P}\boldsymbol{\mu}_{[k]}, \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

где $\mathbf{g}_{[k]}(t) = (g_{0,k}(t), g_{1,k}(t), \dots, g_{n,k}(t))^T$ – значение вектора проекций (спектральных составляющих разложения) в момент времени $t_{[k]}$; $\boldsymbol{\mu}_{[k]}(t) = (\mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_n(t))^T$ – значение вектора моментов сигнала для момента времени $t_{[k]}$; $T_{\text{ind}[k]}$ – значение исходного сигнала для момента времени $t_{[k]}$; Δt – шаг квантования по времени.

Структура полученного обратного динамического оператора представлена на рисунке 2.5. Блок q_{ij} синтезирует элементы матрицы корреляционных коэффициентов разложения в соответствии с (2.23), из которых затем формируется матрица \mathbf{Q} . В блоке $[\mathbf{Q}]^{-1}$ вычисляется обратная матрица корреляционных коэффициентов разложения \mathbf{P} . Входной формирующий фильтр $\Phi_{\text{инр}}$ осуществляет разложение входного сигнала на моменты $\mu_i(t)$ в соответствии с системой (2.31). В результате перемножения полученного вектора $\boldsymbol{\mu}$ и матрицы \mathbf{P} на выходе блока умножения матриц $[\mathbf{P}] \times [\boldsymbol{\mu}]$ формируются проекции $g_i(t)$ таким образом, что подавляются несущественные составляющие преобразуемого

сигнала. В блоке синтеза \mathbf{A} из полученных проекций $g_i(t)$ в соответствии с (2.15) происходит сборка выходного сигнала.



$[\mathbf{Q}]^{-1}$ – блок формирования обратной матрицы корреляционных коэффициентов разложения,
 Φ_{inp} – входной формирующий фильтр, $[\mathbf{P}] \times [\boldsymbol{\mu}]$ – блок умножения матриц,
 \mathbf{A} – блок синтеза упреждающей оценки входного сигнала.

Рисунок 2.5 – Структура оператора обратной динамики

В [94] предлагается схожий с описанным выше метод, основанный на представлении сигналов, характеризующих параметры теплового режима зданий, в виде полигармонических функций вида:

$$x(t - \lambda) \approx x_0(t) + \sum_{i=1}^n [x_{c,i}(t) \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot \lambda) + x_{s,i}(t) \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot \lambda)], \quad (2.33)$$

где λ – время запаздывания; Ω – базовая частота колебаний (выбрана соответствующей периоду 24 ч); i – порядковый номер гармоники; n – количество гармоник. Для нахождения неизвестных коэффициентов $x_0(t)$, $x_{c,i}(t)$, $x_{s,i}(t)$ введено запаздывание τ_d в выражение (2.33):

$$\begin{aligned} x(t - \tau_d - \lambda) &= x_0(t) + \\ &+ \sum_{i=1}^n [x_{c,i}(t) \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot (\lambda + \tau_d)) + x_{s,i}(t) \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot (\lambda + \tau_d))] = \\ &= x_0(t) + \sum_{i=1}^n [x_{c,i}(t) \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot \tau_d) + x_{s,i}(t) \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot \tau_d)] \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot \lambda) + \\ &+ \sum_{i=1}^n [-x_{c,i}(t) \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot \tau_d) + x_{s,i}(t) \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot \tau_d)] \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot \lambda). \end{aligned} \quad (2.34)$$

Динамика сигнала $T_{\text{ind}}(t)$ описывается последовательным соединением инерционного звена первого порядка и звена чистого запаздывания, что соответствует уравнению:

$$T_{\text{ind}}(t) - T_{\text{bld}} \cdot \frac{dT_{\text{ind}}(t)}{d\lambda} = T_{\text{ind}}^*(t - \tau_d), \quad (2.35)$$

где T_{bld} – постоянная времени процесса. Введение запаздывания λ преобразует (2.35) к виду:

$$T_{\text{ind}}(t - \lambda) - T_{\text{bld}} \cdot \frac{d}{d\lambda} T_{\text{ind}}(t - \lambda) = T_{\text{ind}}^*(t - \tau_d - \lambda). \quad (2.36)$$

В результате выполнения для сигнала $T_{\text{ind}}^*(t)$ преобразования (2.34) и разложения сигнала $T_{\text{ind}}(t)$ в ряд (2.33) с последующей подстановкой полученных выражений в (2.36) составлено уравнение:

$$\begin{aligned} & T_{\text{ind}.0}(t) + \sum_{i=1}^n [T_{\text{ind}.c.i}(t) \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot \lambda) + T_{\text{ind}.s.i}(t) \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot \lambda)] - \quad (2.37) \\ & - T_{\text{bld}} \cdot \sum_{i=1}^n [-T_{\text{ind}.c.i}(t) \cdot i \cdot \Omega \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot \lambda) + T_{\text{ind}.s.i}(t) \cdot i \cdot \Omega \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot \lambda)] = \\ & = T_{y.0}(t) + \sum_{i=1}^n [T_{y.c.i}(t) \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot \tau_d) + T_{y.s.i}(t) \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot \tau_d)] \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot \lambda) + \\ & + \sum_{i=1}^n [-T_{y.c.i}(t) \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot \tau_d) + T_{y.s.i}(t) \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot \tau_d)] \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot \lambda), \end{aligned}$$

где $T_{\text{ind}.0}(t)$, $T_{\text{ind}.c.i}(t)$, $T_{\text{ind}.s.i}(t)$ – коэффициенты $x_0(t)$, $x_{c.i}(t)$, $x_{s.i}(t)$ для сигнала $T_{\text{ind}}(t)$, $T_{y.0}(t)$, $T_{y.c.i}(t)$, $T_{y.s.i}(t)$ – коэффициенты $x_0(t)$, $x_{c.i}(t)$, $x_{s.i}(t)$ для сигнала $T_{\text{ind}}^*(t)$. Из (2.37) получены выражения:

$$T_{\text{ind}.0}^*(t) = T_{\text{ind}.0}(t); \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} & T_{y.c.i}(t) \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot \tau_d) + T_{y.s.i}(t) \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot \tau_d) = \quad (2.39) \\ & = T_{\text{ind}.c.i}(t) - T_{\text{bld}} \cdot i \cdot \Omega \cdot T_{\text{ind}.s.i}(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -T_{y.c.i}(t) \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot \tau_d) + T_{y.s.i}(t) \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot \tau_d) = \quad (2.40) \\ & = T_{\text{ind}.s.i}(t) + T_{\text{bld}} \cdot i \cdot \Omega \cdot T_{\text{ind}.c.i}(t). \end{aligned}$$

В системе уравнений (2.38)–(2.40) сигналы $T_{\text{ind}.0}(t)$, $T_{\text{ind}.c.i}(t)$, $T_{\text{ind}.s.i}(t)$ известны, т.к. являются составляющими разложения известного сигнала $T_{\text{ind}}(t)$ в гармонический базис. В результате решения системы уравнений (2.38)–(2.40) относительно неизвестных $T_{y.c.i}(t)$, $T_{y.s.i}(t)$, получены выражения:

$$T_{y.c.i}(t) = \left[T_{\text{ind}.c.i}(t) - T_{\text{bld}} \cdot i \cdot \Omega \cdot T_{\text{ind}.s.i}(t) \right] \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot \tau_d) - \left[T_{\text{ind}.s.i}(t) + T_{\text{bld}} \cdot i \cdot \Omega \cdot T_{\text{ind}.c.i}(t) \right] \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot \tau_d); \quad (2.41)$$

$$T_{y.s.i}(t) = \left[T_{\text{ind}.s.i}(t) + T_{\text{bld}} \cdot i \cdot \Omega \cdot T_{\text{ind}.c.i}(t) \right] \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot \tau_d) + \left[T_{\text{ind}.c.i}(t) - T_{\text{bld}} \cdot i \cdot \Omega \cdot T_{\text{ind}.s.i}(t) \right] \cdot \sin(i \cdot \Omega \cdot \tau_d). \quad (2.42)$$

Разложение сигнала $T_{\text{ind}}(t)$ в гармонический базис в [94] предлагается с использованием метода, описанного в [19]. Для сигналов вида (2.33) среднеквадратическая ошибка σ определяется соотношением:

$$\sigma = \int_0^{\infty} \left(x(t - \lambda) - \sum_{i=1}^n \left[x_{c,i}(t) \cos(i\Omega\lambda) + x_{s,i}(t) \sin(i\Omega\lambda) \right] \right)^2 \cdot e^{-T_{\text{EF}}\lambda} d\lambda, \quad (2.43)$$

Минимум σ достигается при равенстве нулю частных производных σ :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x_{c,j}} = 0; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial x_{s,j}} = 0. \quad (2.44)$$

Решение условий (2.44) для выражения (2.43) в виде системы уравнений относительно искомым гармоник:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_c \\ \mathbf{X}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{cc} & \mathbf{A}_{cs} \\ \mathbf{A}_{sc} & \mathbf{A}_{ss} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_c \\ \mathbf{Y}_s \end{bmatrix}, \quad (2.45)$$

где:

$$\mathbf{X}_c = \left[x_{0[k]} \quad \dots \quad x_{c,i[k]} \quad \dots \quad x_{c,m[k]} \right]^T; \quad (2.46)$$

$$\mathbf{X}_s = \left[x_{0[k]} \quad \dots \quad x_{s,i[k]} \quad \dots \quad x_{s,m[k]} \right]^T; \quad (2.47)$$

$$y_{0[k]} = \frac{1}{1 + T_{\text{EF}} \cdot \Omega \cdot \Delta t} y_{0[k-1]} + \frac{\Omega \cdot \Delta t}{1 + T_{\text{EF}} \cdot \Omega \cdot \Delta t} \cdot x_{[k]}; \quad (2.48)$$

$$y_{c,i[k]} = \frac{1 + T_{\text{EF}} \cdot \Omega \cdot \Delta t}{D_i} \cdot \left(y_{c,i[k-1]} + \Omega \cdot \Delta t \cdot x_{[k]} \right) - \frac{i \cdot \Omega \cdot \Delta t}{D_i} \cdot y_{s,i[k-1]}; \quad (2.49)$$

$$y_{s.i[k]} = \frac{1 + T_{EF} \cdot \Omega \cdot \Delta t}{D_i} \cdot y_{s.i[k-1]} + \frac{i \cdot \Omega \cdot \Delta t}{D_i} \cdot (y_{c.i[k-1]} + \Omega \cdot \Delta t \cdot x_{[k]}) ; \quad (2.50)$$

$$D_i = (1 + T_{EF} \cdot \Omega \cdot \Delta t)^2 + (i \cdot \Omega \cdot \Delta t)^2 ; \quad (2.51)$$

Элементы матриц \mathbf{A}_{cc} , \mathbf{A}_{cs} , \mathbf{A}_{sc} , \mathbf{A}_{ss} определяются выражениями:

$$a_{cc.ij} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{T_{EF}}{T_{EF}^2 + (i-j)^2} + \frac{T_{EF}}{T_{EF}^2 + (i+j)^2} \right] ; \quad i = \overline{0, m} ; \quad j = \overline{0, m} ; \quad (2.52)$$

$$a_{cs.ij} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{(j-i)}{T_{EF}^2 + (i-j)^2} + \frac{(i+j)}{T_{EF}^2 + (i+j)^2} \right] ; \quad i = \overline{0, m} ; \quad j = \overline{1, m} ; \quad (2.53)$$

$$a_{sc.ij} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{(i-j)}{T_{EF}^2 + (i-j)^2} + \frac{(i+j)}{T_{EF}^2 + (i+j)^2} \right] ; \quad i = \overline{0, m} ; \quad j = \overline{1, m} ; \quad (2.54)$$

$$a_{ss.ij} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{T_{EF}}{T_{EF}^2 + (i-j)^2} - \frac{T_{EF}}{T_{EF}^2 + (i+j)^2} \right] ; \quad i = \overline{1, m} ; \quad j = \overline{1, m} . \quad (2.55)$$

В (2.46)–(2.55) m – количество гармоник, k – номер отсчета, T_{EF} – постоянная времени экспоненциального фильтра; Δt – шаг времени отсчетов.

Данный подход хорошо зарекомендовал себя при прогнозировании процессов и сигналов с выраженным полигармоническим характером и относительно небольшим частотным диапазоном, что подтверждается в [94] моделированием с использованием методического примера. Однако тепловой режим здания, несмотря на циклический характер, подвержен влиянию быстропеременных возмущений, которые при обработке фильтром в полигармоническом базисе, обеспечивают более низкие показатели точности, что подтверждается нижеследующим методическим примером.

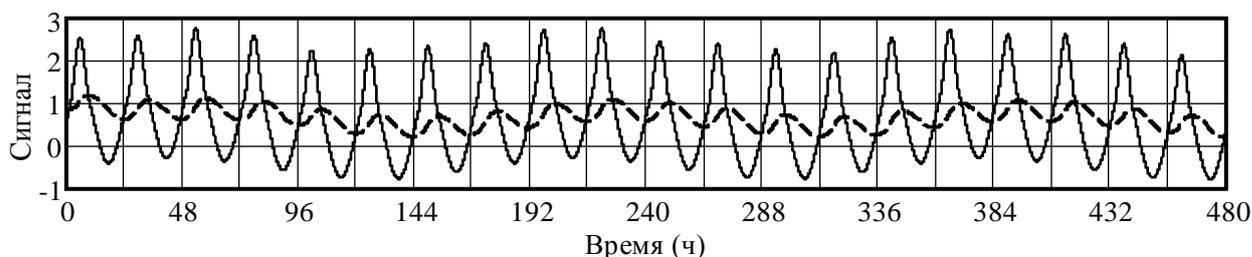
В качестве исходного использован синтетический полигармонический сигнал (рисунок 2.6), содержащий следующие составляющие:

- синусоиду с периодом 24 ч, отражающую действие суточных колебаний температуры наружного воздуха;

- всплески синусоидального вида переменной амплитуды длительностью 8 ч и частотой следования 24 ч, отражающие действие солнечной радиации в

дневное время, при этом переменная амплитуда всплесков отражает изменение воздействия солнечной радиации вследствие изменения облачности;

– синусоиду с периодом 7 суток, отражающую изменение погодных условий.

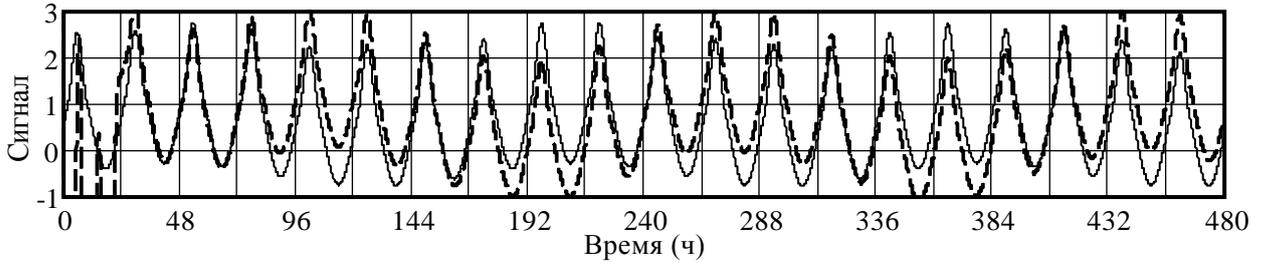


Сплошная линия – исходный сигнал (на входе инерционного динамического звена),

Пунктирная линия – сигнал на выходе инерционного динамического звена.

Рисунок 2.6 – Синтетический полигармонический сигнал для сравнения работы фильтров в полиномиальном и гармоническом базисах

Данный сигнал пропущен через инерционное звено первого порядка с постоянной времени $T_{\text{bid}} = 20$ ч, отражающее в первом приближении динамику процессов теплового режима здания. Сигнал с выхода инерционного звена затем восстановлен с использованием экспоненциальных фильтров, построенных в гармоническом и полиномиальном базисах. Результат и ошибка восстановления сигнала для фильтра в гармоническом базисе представлены на рисунках 2.7 и 2.8, соответственно. Результат и ошибка восстановления сигнала для фильтра в полиномиальном базисе представлены на рисунках 2.9 и 2.10, соответственно. Приведенная среднеквадратическая ошибка моделирования, рассчитываемая в соответствии с (2.62), составила: для экспоненциального фильтра в гармоническом базисе – 13,79%, для экспоненциального фильтра в полиномиальном базисе – 0,83%. Для амплитуды исходного сигнала не определена размерность, а значения ошибок приводятся в относительных величинах, т.к. рассматривается обращение линейного динамического звена.



Сплошная линия – исходный сигнал (на входе инерционного динамического звена),
 Пунктирная линия – восстановленный сигнал (выходной сигнал экспоненциального фильтра).
 Рисунок 2.7 – Результат восстановления полигармонического сигнала обратным оператором на базе фильтра в гармоническом базисе

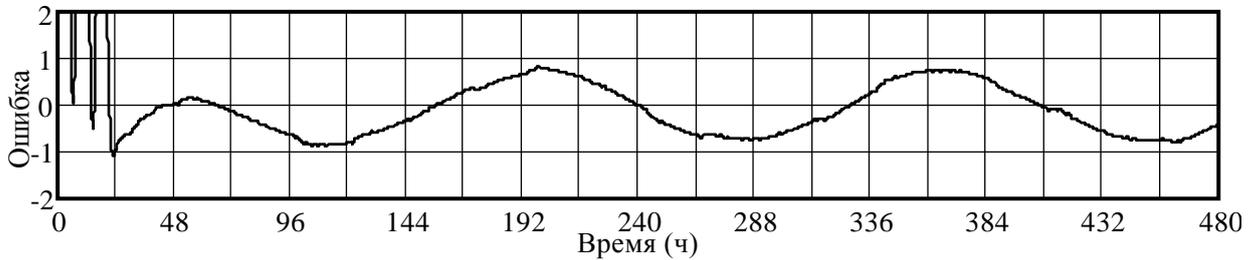
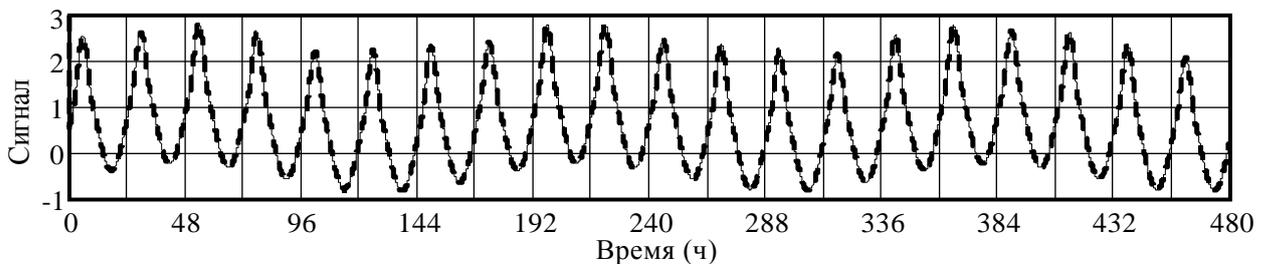


Рисунок 2.8 – Ошибка восстановления полигармонического сигнала обратным оператором на базе фильтра в гармоническом базисе



Сплошная линия – исходный сигнал (на входе инерционного динамического звена),
 Пунктирная линия – восстановленный сигнал (выходной сигнал экспоненциального фильтра).
 Рисунок 2.9 – Результат восстановления полигармонического сигнала обратным оператором на базе фильтра в полиномиальном базисе

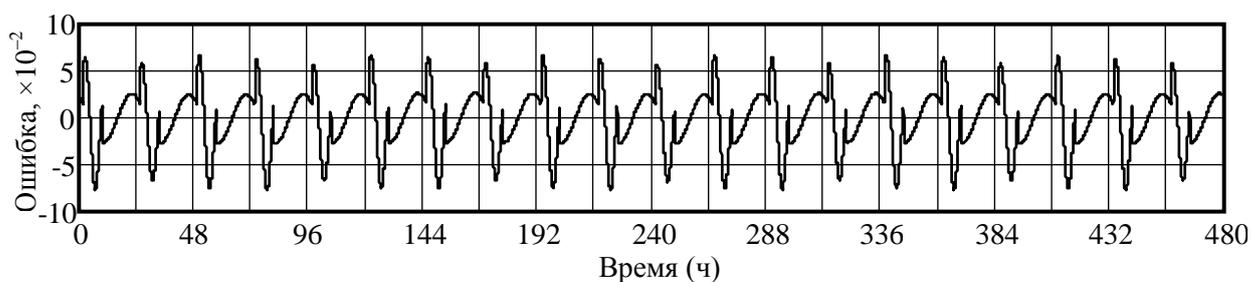


Рисунок 2.10 – Ошибка восстановления полигармонического сигнала обратным оператором на базе фильтра в полиномиальном базисе

Реальные сигналы быстропеременных возмущений содержат не только гармонические составляющие, а также не являются гладкими функциями и зашумлены. Очевидно, обработка таких сигналов фильтром в гармоническом базисе достаточно затруднительна и требует детальной проработки вопросов предварительной фильтрации и сужения спектра сигнала, что будет вносить дополнительную задержку, фазовые сдвиги и существенно затруднит задачу идентификации в реальном времени.

Приведенный пример подтверждает, что обработка быстропеременных возмущений в системах отопления зданий существенно эффективнее происходит при использовании экспоненциального фильтра в полиномиальном базисе, чем и объясняется выбор полиномиального базиса в ходе синтеза экспоненциального фильтра в данной диссертационной работе.

2.3. Реализация обратных динамических операторов на базе экспоненциальных фильтров

Широкое практическое внедрение предложенного метода компенсации тепловой инерции здания и влияющих на здание возмущений подразумевает возможность настройки его параметров и идентификации характеристик модели здания с использованием известных инженерных методов. Существуют

различные типовые варианты модельного представления динамики здания [11; 26; 75]. Рассмотрим подробнее следующие из них:

- в виде апериодического звена (первого порядка);
- в виде последовательного соединения апериодического звена и звена чистого запаздывания;
- в виде последовательного соединения двух апериодических звеньев;
- в виде последовательного соединения двух апериодических звеньев и звена чистого запаздывания.

Построение обратного оператора для апериодического звена.

Рассмотрим пример «ex1»: дана система вида

$$F_{\text{ex1}}(p) = \frac{1}{1 + T_{\text{ex1}}p} \cdot e^{-p\tau_{\text{ex1d}}}. \quad (2.56)$$

Обратный динамический оператор для (2.63) имеет вид:

$$F_{\text{ex1}}^{-1}(p) = (1 + T_{\text{ex1}}p) \cdot e^{p\tau_{\text{ex1d}}}. \quad (2.57)$$

Коэффициентами a_i для данной системы, в соответствии с (2.5), являются:

$$a_0 = 1, \quad a_1 = T_{\text{ex1}}, \quad a_m = 0, \quad m = \overline{2, n} \quad (2.58)$$

Получим, подставив (2.58) в (2.16):

$$\begin{aligned} T_{\text{ind.ex1}}(t) \approx & g_0(t) - g_1(t) \cdot (\tau_{\text{ex1d}} + T_{\text{ex1}}) + g_2(t) \cdot (\tau_{\text{ex1d}}^2 + 2\tau_{\text{ex1d}}T_{\text{ex1}}) - \\ & - g_3(t) \cdot (\tau_{\text{ex1d}}^3 + 3\tau_{\text{ex1d}}^2T_{\text{ex1}}) + g_4(t) \cdot (\tau_{\text{ex1d}}^4 + 4\tau_{\text{ex1d}}^3T_{\text{ex1}}) - \\ & - g_5(t) \cdot (\tau_{\text{ex1d}}^5 + 5\tau_{\text{ex1d}}^4T_{\text{ex1}}) + \dots \end{aligned} \quad (2.59)$$

При $\tau_{\text{ex1d}} = 0$ бесконечный ряд (2.59) вырождается в конечное выражение:

$$\tau_{\text{ex1d}} = 0 \Rightarrow T_{\text{ind.ex}}(t) \approx g_0(t) - g_1(t)T_{\text{ex1}}. \quad (2.60)$$

Осуществим моделирование рассматриваемой системы и ее обратного оператора в среде *Vissim* (рисунок 2.11). Положим, $T_{\text{ex1}} = 20$ ч, $\tau_{\text{ex1d}} = 1$ ч, порядок приведенных значений соответствует характеристикам многоэтажного административного здания (см. параграф 3.2). В качестве входного сигнала примем синусоиду с периодом 24 ч и амплитудой 10°C .

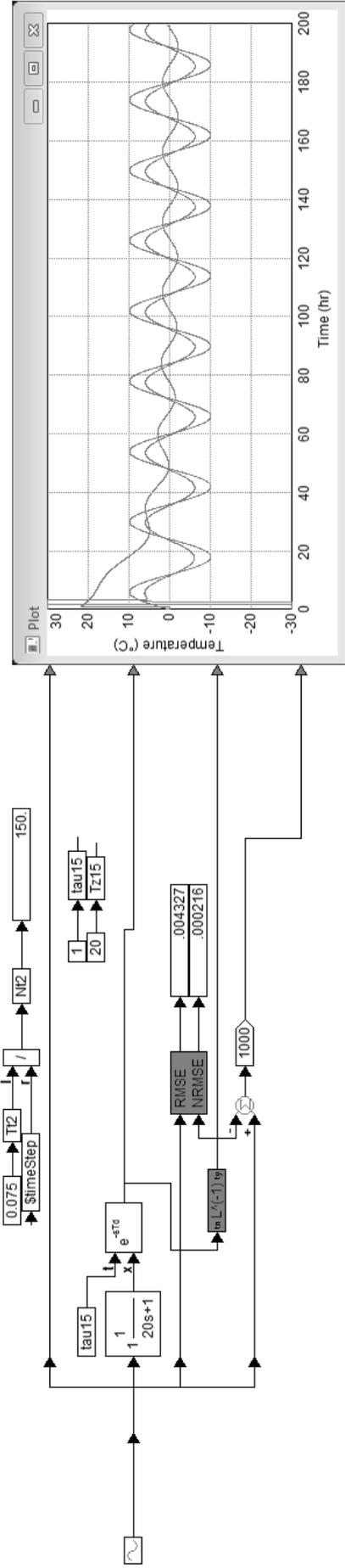


Рисунок 2.11 – Модель обращения аperiodического звена и звена чистого запаздывания на примере восстановления синусоидального сигнала

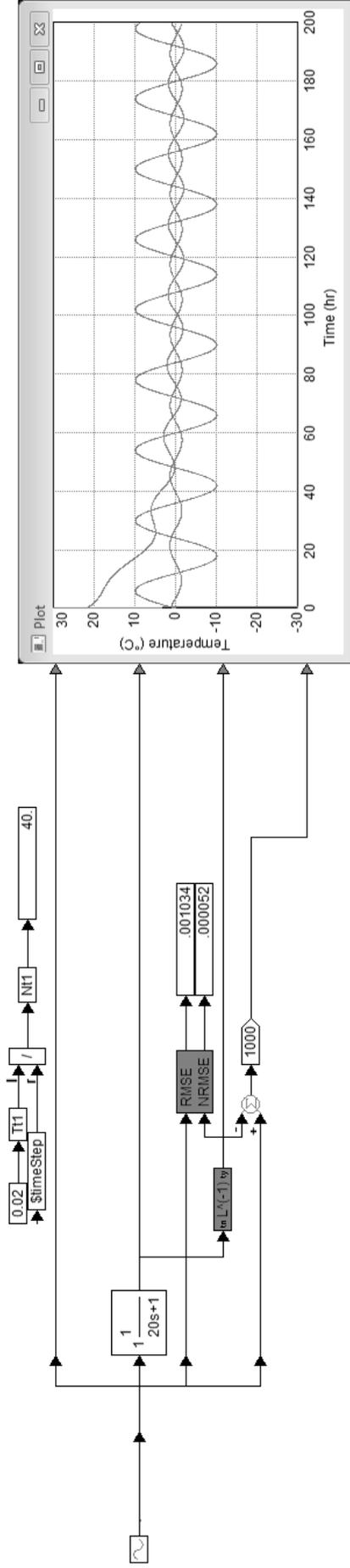


Рисунок 2.12 – Модель обращения аperiodического звена на примере восстановления синусоидального сигнала

На рисунке 2.13 представлен результат восстановления исходного сигнала, пропущенного через апериодическое звено первого порядка и звено запаздывания. На рисунке 2.14 показана ошибка восстановления исходного сигнала обратным оператором: амплитуда ошибки в установившемся режиме составляет $0,006^\circ\text{C}$. Среднеквадратическая ошибка (root-mean-square error) σ_{RMSE} и приведенная среднеквадратическая ошибка (normalized root-mean-square error) σ_{NRMSE} , вычисляемые по формулам:

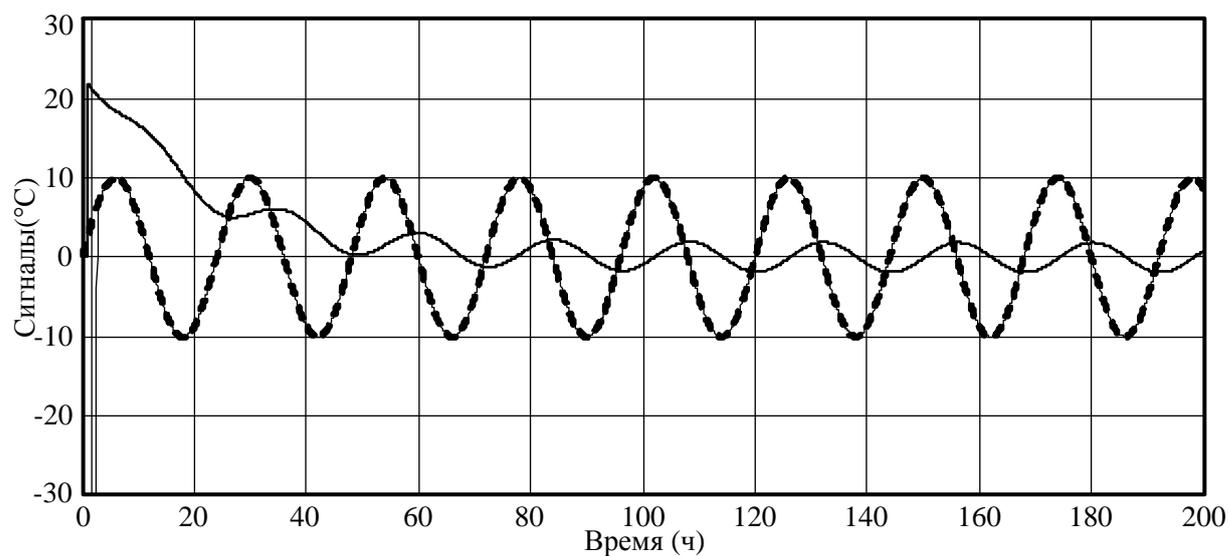
$$\sigma_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_i^n (T_i^* - T_i)^2}; \quad (2.61)$$

$$\sigma_{\text{NRMSE}} = \frac{\sigma_{\text{RMSE}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} \times 100\%, \quad (2.62)$$

где T_i^* – i -й отсчет восстановленного сигнала, T_i – i -й отсчет исходного сигнала, n – количество отсчетов, T_{max} – максимальное значение, принимаемое исходным сигналом, T_{min} – минимальное значение, принимаемое исходным сигналом, равны: $\sigma_{\text{RMSE}} = 0,0043^\circ\text{C}$, $\sigma_{\text{NRMSE}} = 0,02\%$. Величина ошибок здесь и далее для группы экспериментов на апериодическом звене рассчитана на основе $n = 2 \times 10^6$ измерений с интервалом $0,0005$ ч от начала моделирования. Заметим, здесь и далее до конца параграфа рассматривается идеализированный случай, целью которого является проверка работы метода на синтетических данных. Этим объясняется столь небольшая величина ошибок.

Структура обратного оператора, реализованная в среде *Vissim* в виде экспоненциального фильтра 5 порядка, показана на рисунке 2.15 и соответствует общей структуре, представленной на рисунке 2.5. Обозначения на рисунке 2.15 соответствуют обозначениям на рисунке 2.5.

Моменты исходного сигнала (вектор сигналов на выходе формирующего входного фильтра Φ_{inp}) $\mu_i(t)$ представлены на рисунке 2.16, проекции сигнала $g_i(t)$ (после перемножения с обратной матрицей коэффициентов разложения \mathbf{P}) представлены на рисунке 2.17.



Пунктирная линия – исходный сигнал (на входе объекта), жирная сплошная линия – сигнал на выходе объекта (входной сигнал экспоненциального фильтра), тонкая сплошная линия – восстановленный сигнал (выходной сигнал экспоненциального фильтра).

Рисунок 2.13 – Результат восстановления исходного сигнала обратным оператором для апериодического звена с запаздыванием

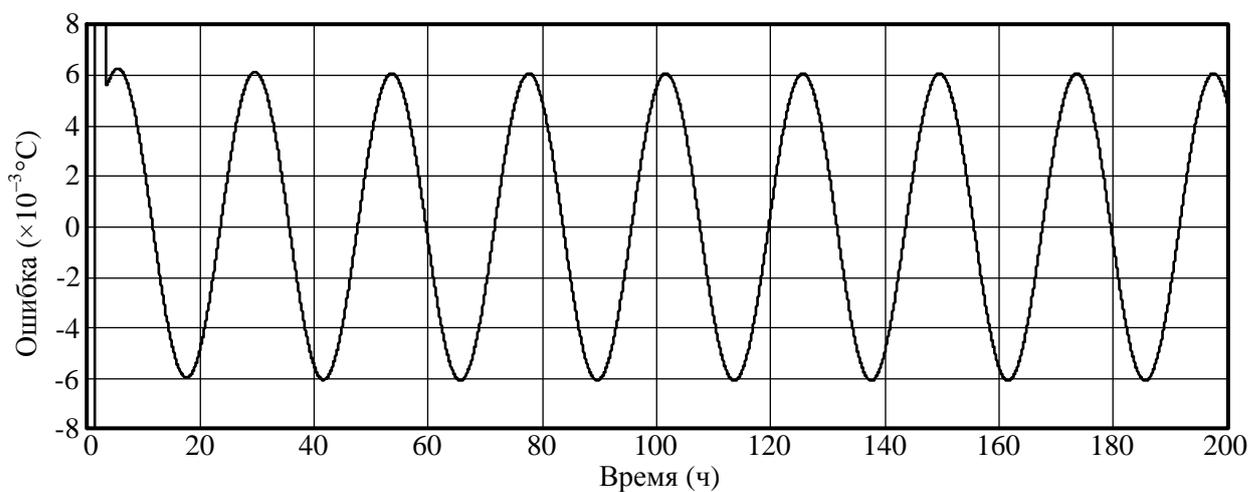


Рисунок 2.14 – Ошибка восстановления исходного сигнала обратным оператором для апериодического звена с запаздыванием

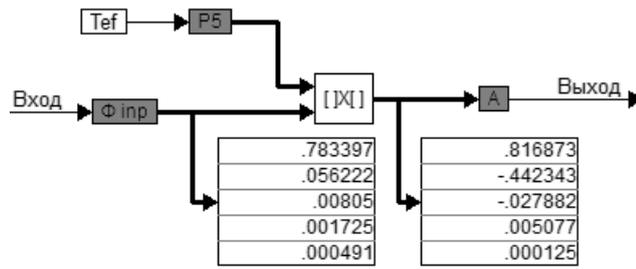
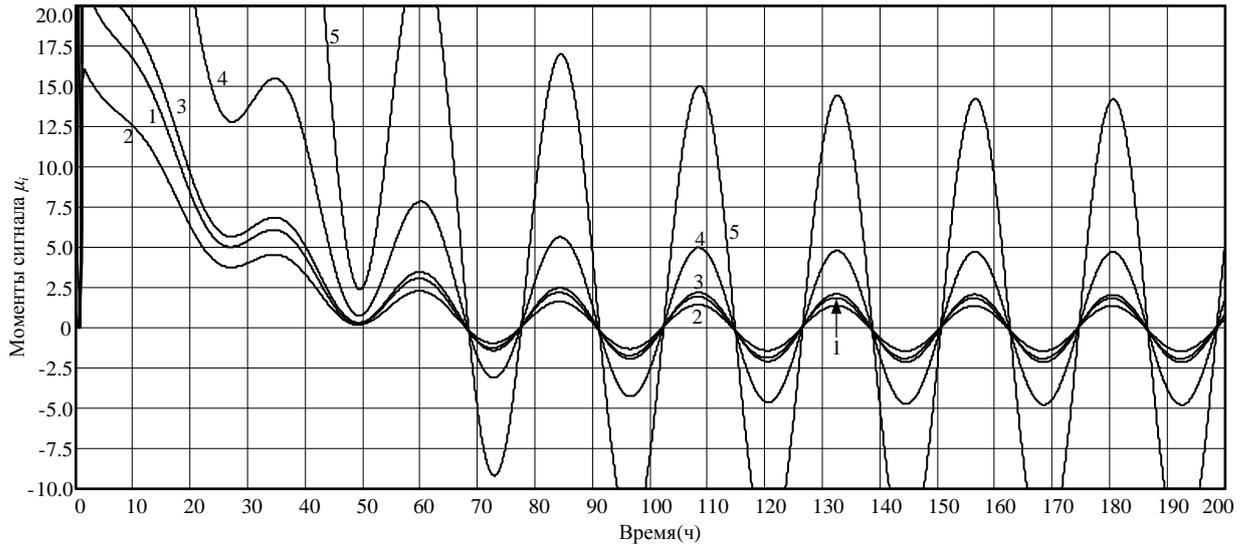
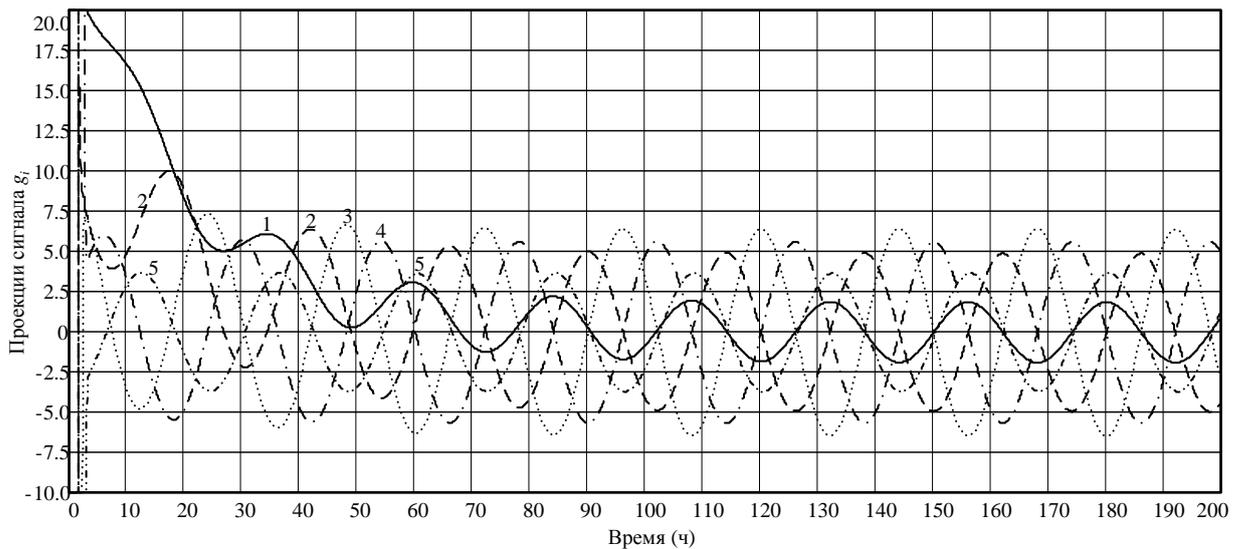


Рисунок 2.15 – Структура экспоненциального фильтра 5 порядка



1 – $\mu_0(t)$, 2 – $\mu_1(t) [\times 10^{-1}]$, 3 – $\mu_2(t) [\times 10^{-2}]$, 4 – $\mu_3(t) [\times 10^{-3}]$, 5 – $\mu_4(t) [\times 10^{-4}]$.

Рисунок 2.16 – Вектор моментов исходного сигнала



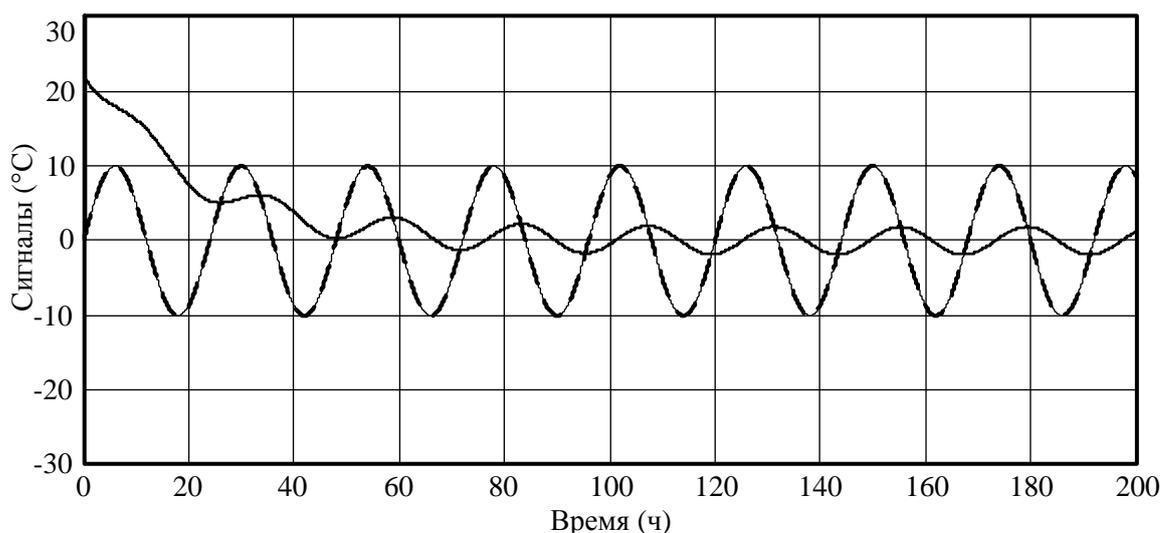
1 – $g_0(t)$, 2 – $g_1(t) [\times 10^{-1}]$, 3 – $g_2(t) [\times 10^{-2}]$, 4 – $g_3(t) [\times 10^{-3}]$, 5 – $g_4(t) [\times 10^{-4}]$.

Рисунок 2.17 – Вектор проекций

Модель в среде *Vissim* для случая $\tau_{\text{exld}}=0$ (звено чистого запаздывания отсутствует) представлена на рисунке 2.12: положим, T_{exl} и параметры входного сигнала не изменились.

Исходный сигнал, сигнал на выходе аperiodического звена первого порядка и восстановленный сигнал показаны на рисунке 2.18. Ошибка восстановления исходного сигнала обратным оператором показана на рисунке 2.19: амплитуда ошибки в установившемся режиме составляет $0,0016^{\circ}\text{C}$, среднеквадратическая ошибка $\sigma_{\text{RMSE}} = 0,0001^{\circ}\text{C}$, нормированная среднеквадратическая ошибка $\sigma_{\text{NRMSE}} = 0,005\%$.

Структура обратного оператора, реализованная в среде *Vissim*, показана на рисунке 2.20: в соответствии с (2.60) обратный оператор принимает вид экспоненциального фильтра 2 порядка.



Пунктирная линия – исходный сигнал (на входе объекта), жирная сплошная линия – сигнал на выходе объекта (входной сигнал экспоненциального фильтра), тонкая сплошная линия – восстановленный сигнал (выходной сигнал экспоненциального фильтра).

Рисунок 2.18 – Результат восстановления исходного сигнала обратным оператором для аperiodического звена (без запаздывания)

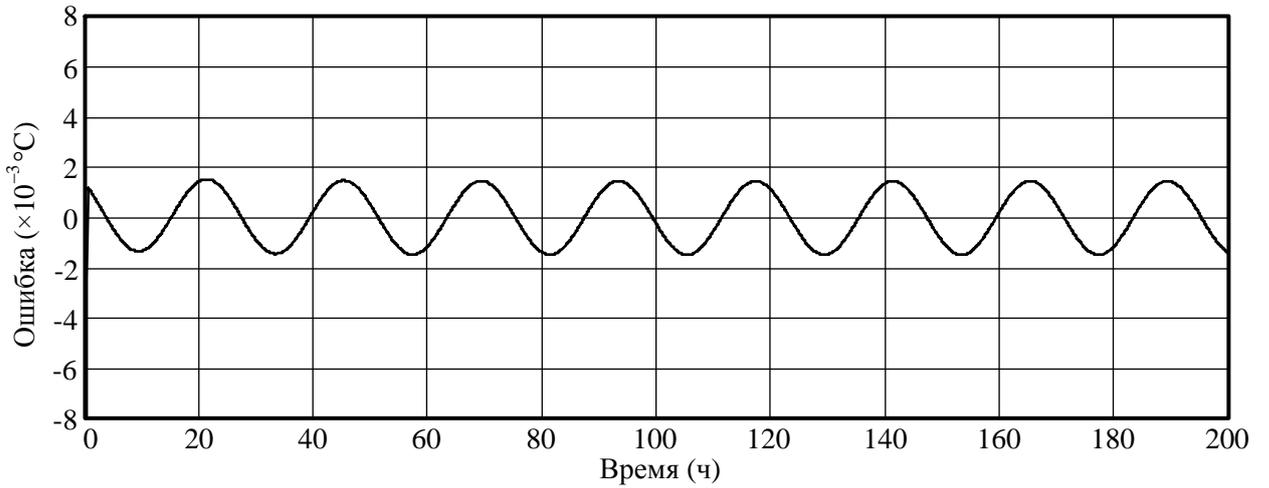


Рисунок 2.19 – Ошибка восстановления исходного сигнала обратным оператором для апериодического звена (без запаздывания)

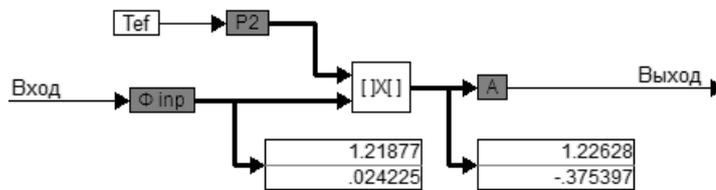
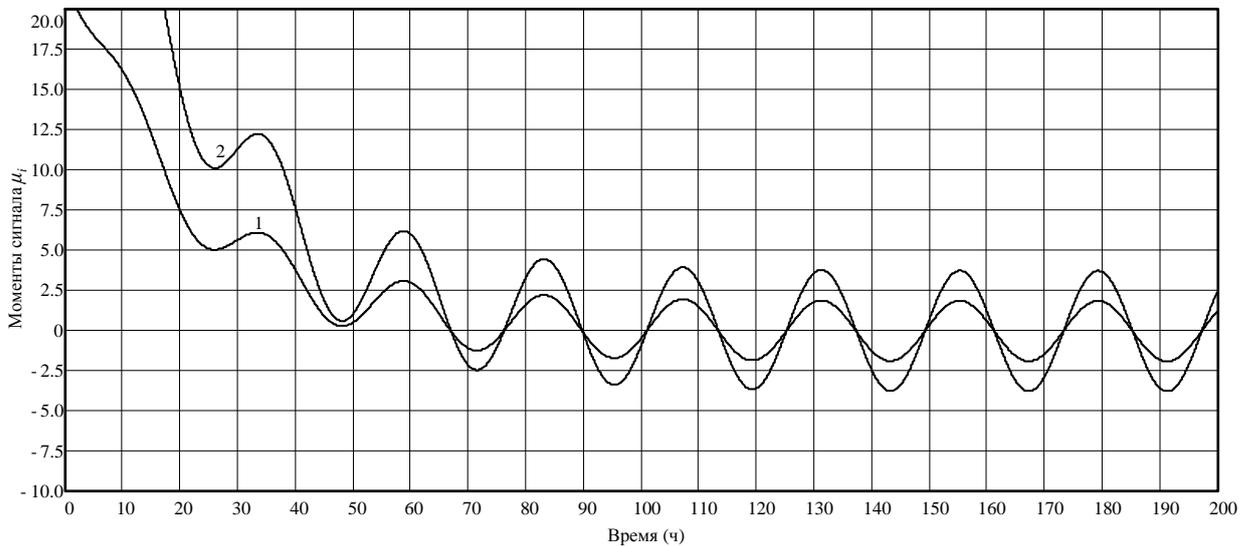
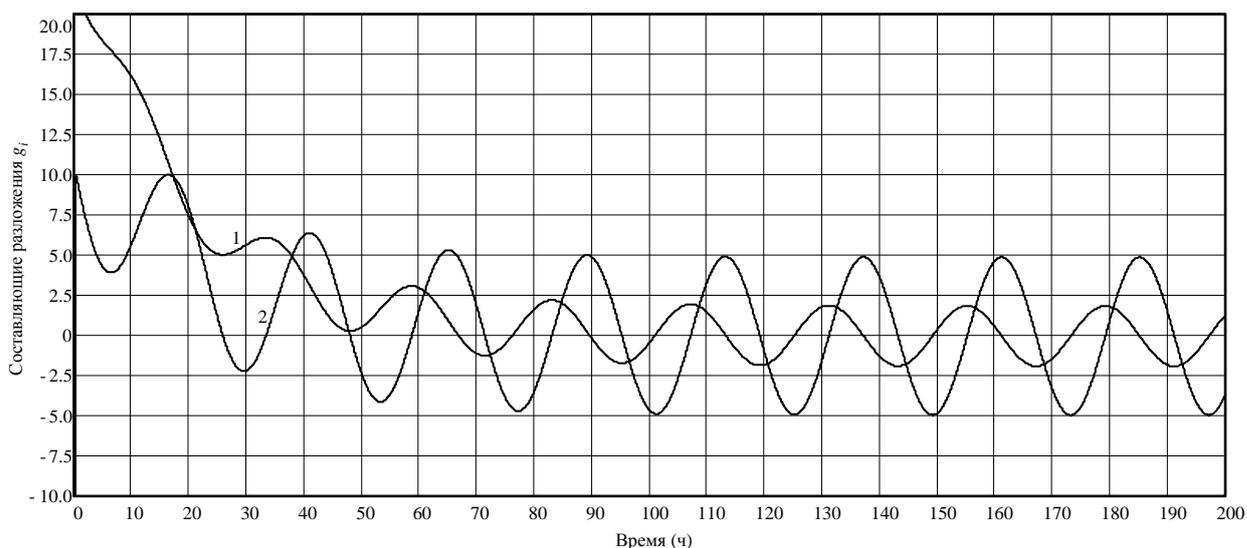


Рисунок 2.20 – Структура экспоненциального фильтра 2 порядка



$1 - \mu_0(t), 2 - \mu_1(t) [\times 10^{-1}]$.

Рисунок 2.21 – Вектор моментов исходного сигнала



$$1 - g_0(t), 2 - g_1(t) [\times 10^{-1}].$$

Рисунок 2.22 – Вектор проекций

По результатам моделирования сделаны следующие выводы:

1) Предложенный подход обеспечивает высокое качество восстановления исходного сигнала в идеальных условиях (апериодическое звено, синусоидальный исходный сигнал, влияние шумов исключено), т.е. на базе предложенного подхода принципиально возможна реализация обратного оператора с высокой точностью.

Заметим, выбранные идеальные условия подобраны в соответствии с объектами реальной жизни: постоянная времени объекта управления соответствует зданию с высокой тепловой инерцией, частота синусоидального сигнала соответствуют суточным колебаниям температуры, амплитуда синусоидального сигнала соответствует достаточно высокому суточному перепаду температуры. Отсутствие шумов и высокочастотных гармоник позволяет оценить точность и качество работы предложенного подхода без паразитного влияния внешних и внутренних факторов; на практике возможно снижение уровня шумов и высокочастотных гармоник усреднением исходного сигнала посредством измерения несколькими датчиками или фильтрацией его высокочастотных составляющих.

2) Предложенный подход показывает высокое качество восстановления исходного сигнала, как при наличии, так и при отсутствии звена чистого запаздывания, т.е. на базе предложенного подхода возможна реализация обратных операторов как для линейных, так и для нелинейных динамических операторов. При этом более высокое качество восстановления исходного сигнала обеспечивается при отсутствии звена чистого запаздывания. Таким образом, на базе предложенного подхода реализация обратных операторов для линейных динамических систем возможна с большей точностью, чем для нелинейных.

3) При построении обратного оператора для линейной системы порядок экспоненциального фильтра определяется порядком системы. При построении обратного оператора для нелинейной системы, в частности, для системы с чистым запаздыванием, порядок экспоненциального фильтра определяется требованиями к желаемой точности восстановленного сигнала на выходе обратного оператора и возможными ограничениями на вычислительную сложность. Время после запуска, необходимое для формирования с приемлемой точностью восстановленного сигнала на выходе обратного оператора, определяется динамическими свойствами (переходным процессом) исходного (подлежащего восстановлению) сигнала, а не сигнала на входе обратного оператора.

Построение обратного оператора для последовательного соединения двух апериодических звеньев.

Далее рассмотрим процедуру построения обратного оператора для более сложного объекта и используем входные сигналы, приближенные к действию реальных возмущающих факторов.

Рассмотрим пример «ex2»: дана система вида

$$F_{\text{ex2}}(p) = \frac{1}{1 + T_{\text{ex2.1}}p} \cdot \frac{1}{1 + T_{\text{ex2.2}}p} \cdot e^{-p\tau_{\text{ex2d}}}. \quad (2.63)$$

Обратный динамический оператор для (2.63) имеет вид:

$$F_{\text{ex2}}^{-1}(p) = (1 + T_{\text{ex2.1}}p) \cdot (1 + T_{\text{ex2.2}}p) \cdot e^{p\tau_{\text{ex2d}}}. \quad (2.64)$$

Коэффициентами a_i для данной системы, в соответствии с (2.5), являются:

$$a_0 = 1, \quad a_1 = T_{\text{ex}2.1} + T_{\text{ex}2.2}, \quad a_2 = T_{\text{ex}2.1}T_{\text{ex}2.2}, \quad a_m = 0, \quad m = \overline{3, n} \quad (2.65)$$

Получим, подставив (2.65) в (2.16):

$$\begin{aligned} T_{\text{ind.ex}2}(t) \approx & g_0(t) - g_1(t) \cdot (\tau_{\text{ex}2d} + T_{\text{ex}2.1} + T_{\text{ex}2.2}) + \\ & + g_2(t) \cdot (\tau_{\text{ex}2d}^2 + 2\tau_{\text{ex}2d}(T_{\text{ex}2.1} + T_{\text{ex}2.2}) + 2T_{\text{ex}2.1}T_{\text{ex}2.2}) - \\ & - g_3(t) \cdot (\tau_{\text{ex}2d}^3 + 3\tau_{\text{ex}2d}^2(T_{\text{ex}2.1} + T_{\text{ex}2.2}) + 6\tau_{\text{ex}2d}T_{\text{ex}2.1}T_{\text{ex}2.2}) + \\ & + g_4(t) \cdot (\tau_{\text{ex}2d}^4 + 4\tau_{\text{ex}2d}^3(T_{\text{ex}2.1} + T_{\text{ex}2.2}) + 12\tau_{\text{ex}2d}^2T_{\text{ex}2.1}T_{\text{ex}2.2}) - \\ & - g_5(t) \cdot (\tau_{\text{ex}2d}^5 + 5\tau_{\text{ex}2d}^4(T_{\text{ex}2.1} + T_{\text{ex}2.2}) + 20\tau_{\text{ex}2d}^3T_{\text{ex}2.1}T_{\text{ex}2.2}) + \dots \end{aligned} \quad (2.66)$$

При $\tau_{\text{ex}2d} = 0$ бесконечный ряд (2.66) вырождается в конечное выражение:

$$\tau_{\text{ex}2d} = 0 \Rightarrow T_{\text{ind.ex}}(t) \approx g_0(t) - g_1(t) \cdot (T_{\text{ex}2.1} + T_{\text{ex}2.2}) + 2g_2(t)T_{\text{ex}2.1}T_{\text{ex}2.2}. \quad (2.67)$$

Осуществим моделирование рассматриваемой системы и ее обратного оператора в среде *Vissim* для различных входных сигналов. Параметры объекта: $T_{\text{ex}21} = 20$ ч, $T_{\text{ex}22} = 1,2$ ч, $\tau_{\text{ex}2d} = 1$ ч; моделирование осуществлено для случаев без звена запаздывания ($\tau_{\text{ex}2d} = 0$) и со звеном запаздывания. Величина ошибок здесь и далее до конца главы 2.3 рассчитана на основе $n = 2 \times 10^5$ измерений с интервалом 0,005 ч от начала моделирования.

В качестве исходных сигналов использованы:

1) синусоидальный сигнал с периодом 24 ч и амплитудой 10°C , как и в случае с апериодическим звеном;

2) произвольный сигнал, имеющий следующие составляющие:

– постоянная составляющая « -15°C » – определяет средний уровень температуры наружного воздуха;

– синусоида с периодом 24 ч и амплитудой 10°C – характеризует суточные колебания температуры наружного воздуха;

– пилообразный сигнал с периодом 8 ч и амплитудой 4°C – характеризует действие быстрых возмущающих факторов (J_{rad} , Q_{int} и т.д., см. параграф 1.1) и дополнительно вносит высокочастотные гармоники в точках излома;

3) полигармонический сигнал, содержащий следующие гармоники:

- постоянная составляющая « -15°C »;
- синусоида с периодом 24 ч и амплитудой 10°C ;
- синусоида с периодом 2 ч (для системы без чистого запаздывания) или 4 ч (для системы с чистым запаздыванием) и амплитудой 10°C – характеризует действие быстрых возмущающих факторов без внесения дополнительных высокочастотных гармоник;

4) ступенчатое изменение постоянного сигнала с исходного уровня « -15°C » на величину прироста « $+20^{\circ}\text{C}$ » – для наглядного представления динамических свойств обрабатываемого оператора.

В качестве примера на рисунках ниже представлены модели в среде *Vissim* для систем без запаздывания и с запаздыванием для следующих входных сигналов: на рисунках 2.23 и 2.25 – на примере восстановления синусоидального исходного сигнала, на рисунках 2.24 и 2.26 – на примере восстановления произвольного исходного сигнала. Модели в среде *Vissim* для полигармонического сигнала и для ступенчатого изменения постоянного сигнала имеют аналогичный вид.

Основные результаты моделирования (исходный сигнал, восстановленный сигнал, ошибка) представлены на рисунках 2.27–2.34:

- для синусоидального сигнала – рисунки 2.27 и 2.28;
- для произвольного сигнала – рисунки 2.29 и 2.30;
- для полигармонического сигнала – рисунки Рисунок 2.32;
- для ступенчатого изменения постоянного сигнала – рисунки 2.33 и 2.34.

Для эксперимента с произвольным сигналом, результаты которого приведены на рисунке 2.29, показаны моменты исходного сигнала (рисунок 2.35) и проекции (рисунок 2.36).

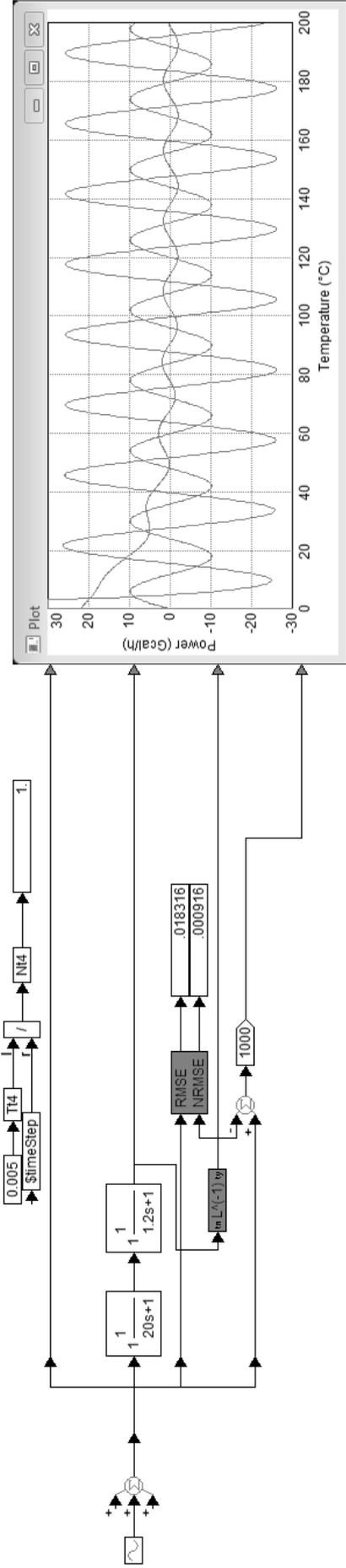


Рисунок 2.23 – Модель обращения двух последовательных апериодических звеньев на примере восстановления синусоидального сигнала

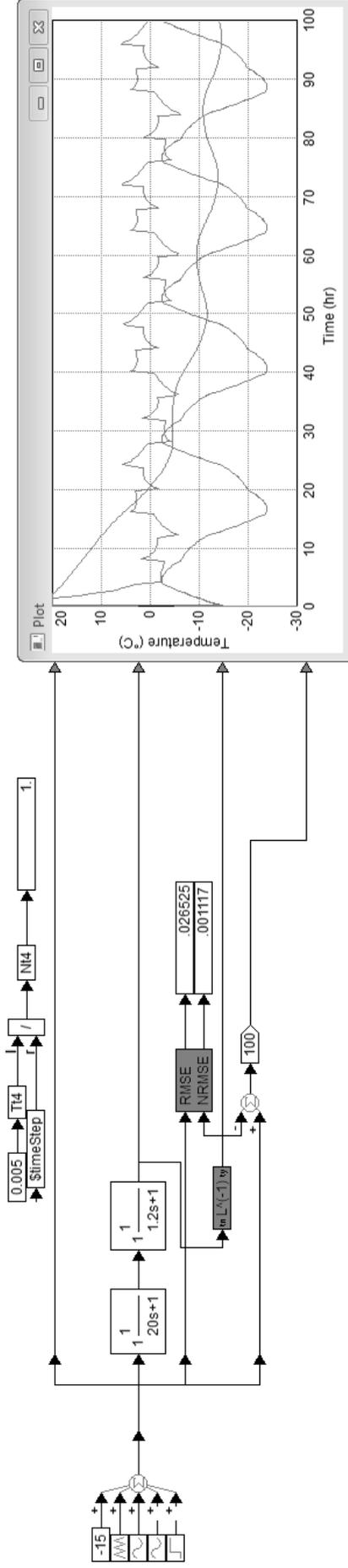
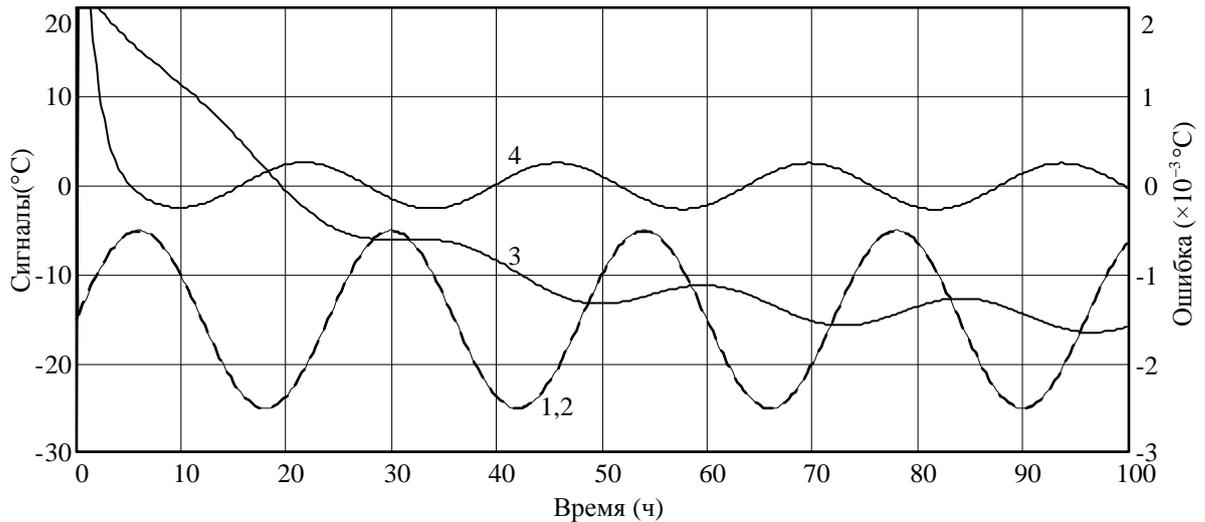


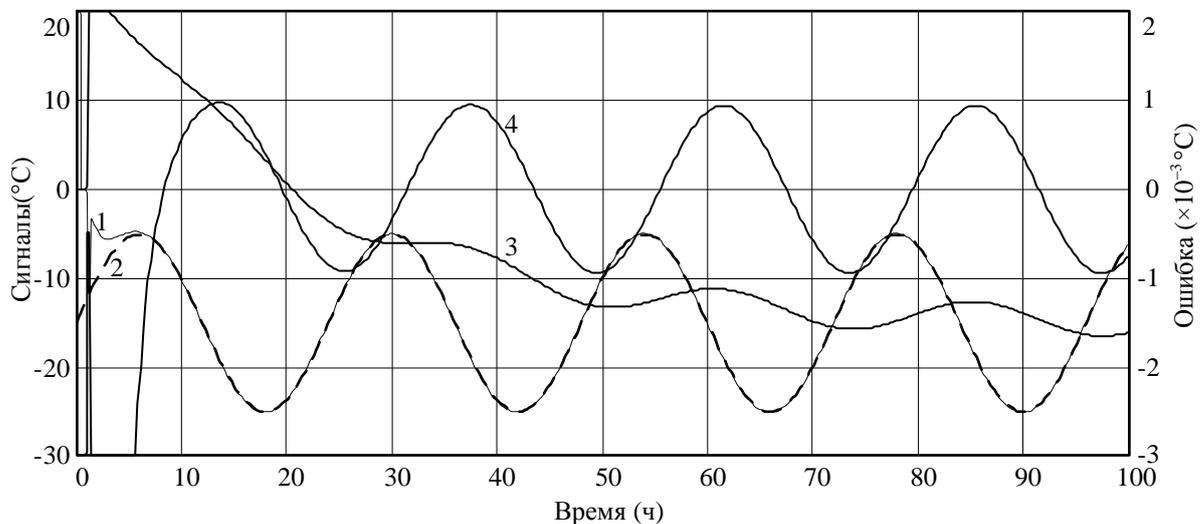
Рисунок 2.24 – Модель обращения двух последовательных апериодических звеньев на примере восстановления произвольного сигнала с бесконечным спектром



1(пунктирная линия) – исходный сигнал, 2(тонкая сплошная линия) – восстановленный сигнал, 3 – сигнал на выходе обрабатываемого звена, 4 – ошибка восстановления исходного сигнала.

$$\sigma_{\text{RMSE}} = 0,0183^{\circ}\text{C}, \sigma_{\text{NRMSE}} = 0,07\%$$

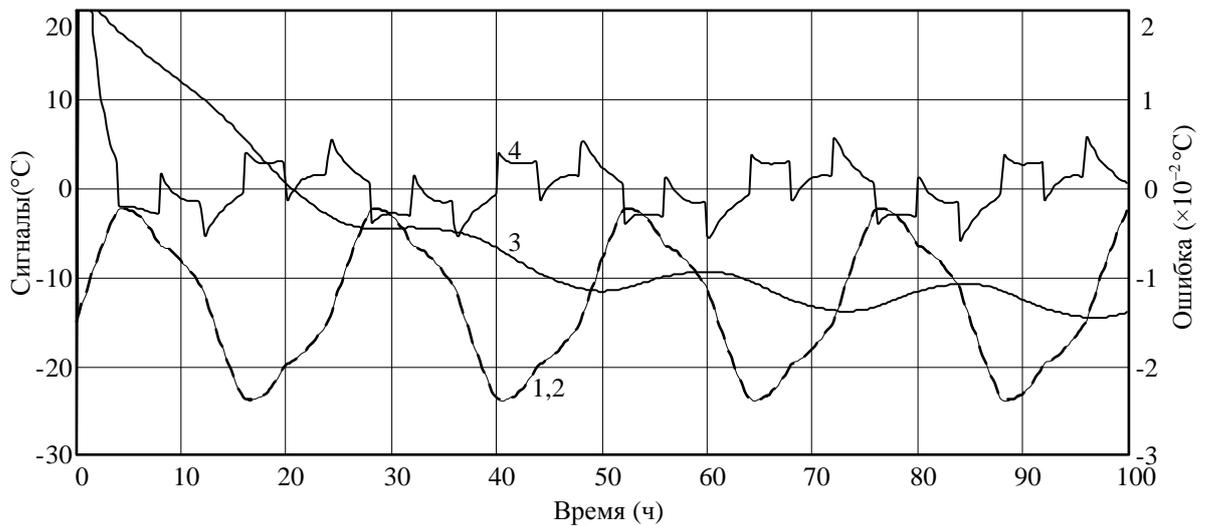
Рисунок 2.27 – Результат моделирования: последовательное соединение двух аperiodических звеньев, синусоидальный исходный сигнал



1(пунктирная линия) – исходный сигнал, 2(тонкая сплошная линия) – восстановленный сигнал, 3 – сигнал на выходе обрабатываемого звена, 4 – ошибка восстановления исходного сигнала.

$$\sigma_{\text{RMSE}} = 0,0678^{\circ}\text{C}, \sigma_{\text{NRMSE}} = 0,27\%$$

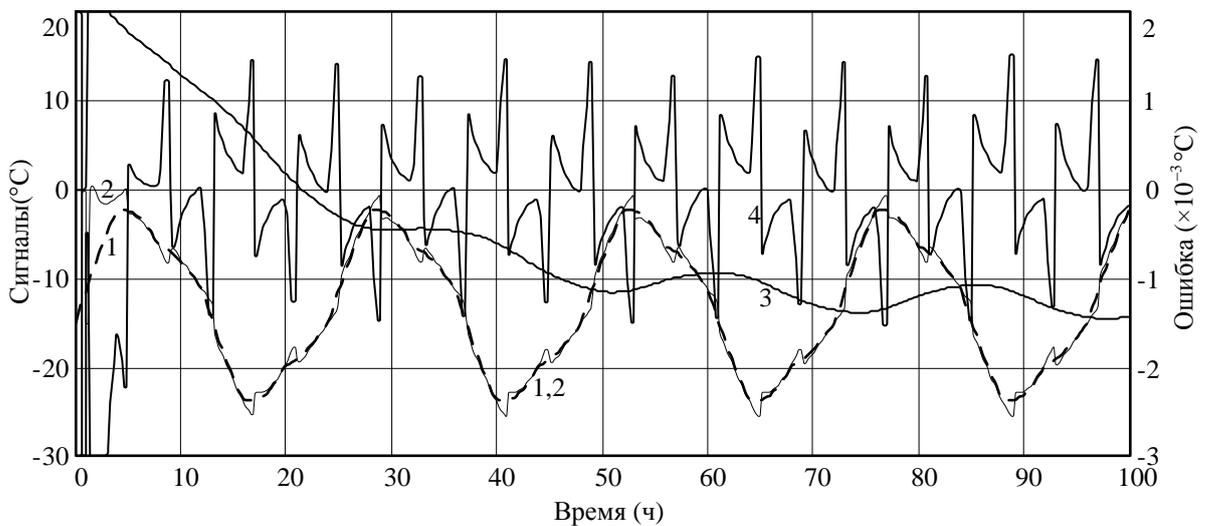
Рисунок 2.28 – Результат моделирования: последовательное соединение двух аperiodических звеньев и звена запаздывания, синусоидальный исходный сигнал



1(пунктирная линия) – исходный сигнал, 2(тонкая сплошная линия) – восстановленный сигнал, 3 – сигнал на выходе обрабатываемого звена, 4 – ошибка восстановления исходного сигнала.

$$\sigma_{\text{RMSE}} = 0,0265^{\circ}\text{C}, \sigma_{\text{NRMSE}} = 1,12\%$$

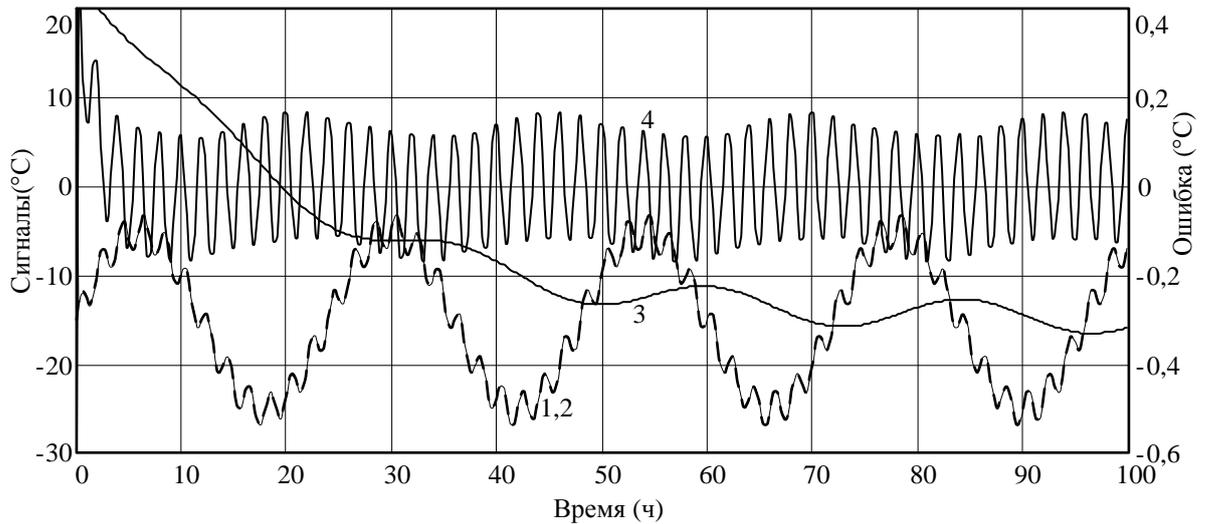
Рисунок 2.29 – Результат моделирования: последовательное соединение двух аperiodических звеньев, произвольный исходный сигнал



1(пунктирная линия) – исходный сигнал, 2 (тонкая сплошная линия) – восстановленный сигнал, 3 – сигнал на выходе обрабатываемого звена, 4 – ошибка восстановления исходного сигнала.

$$\sigma_{\text{RMSE}} = 0,7199^{\circ}\text{C}, \sigma_{\text{NRMSE}} = 3,03\%$$

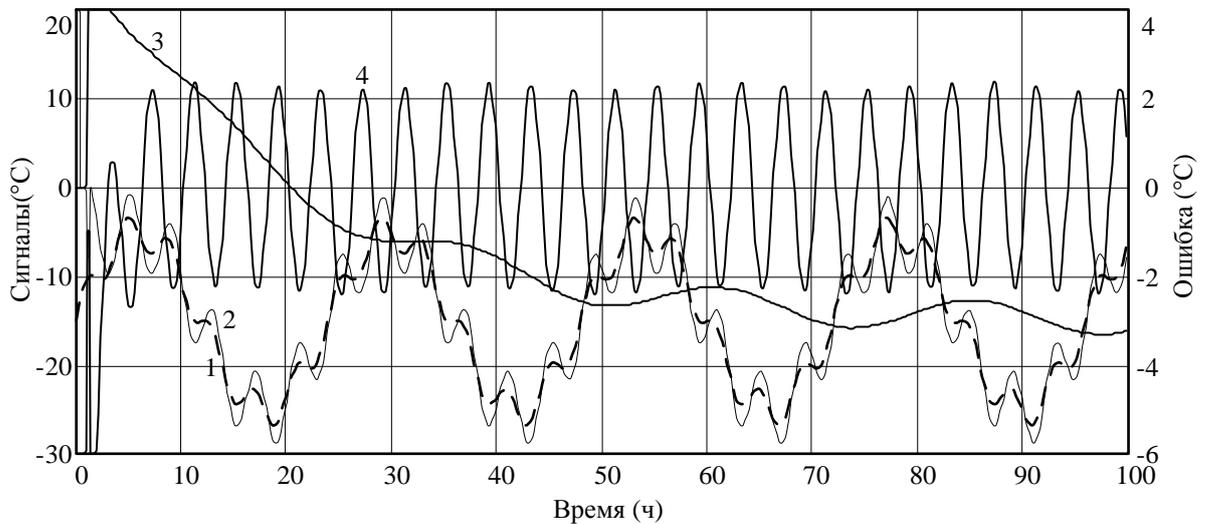
Рисунок 2.30 – Результат моделирования: последовательное соединение двух аperiodических звеньев и звена запаздывания, произвольный исходный сигнал



1(пунктирная линия) – исходный сигнал, 2 (тонкая сплошная линия) – восстановленный сигнал, 3 – сигнал на выходе обрабатываемого звена, 4 – ошибка восстановления исходного сигнала.

$$\sigma_{\text{RMSE}} = 0,1097^{\circ}\text{C}, \sigma_{\text{NRMSE}} = 0,41\%$$

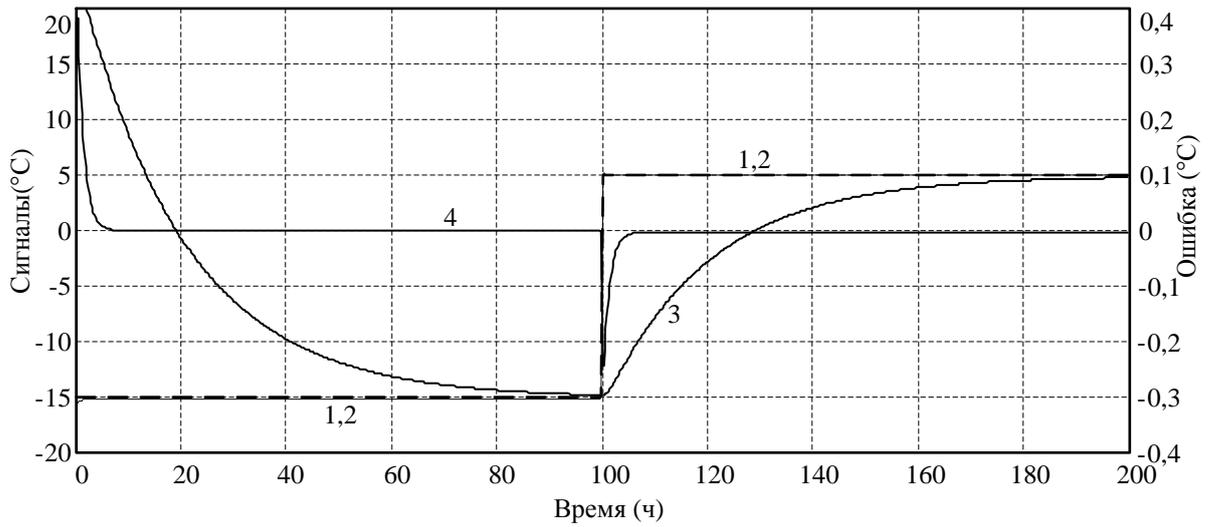
Рисунок 2.31 – Результат моделирования: последовательное соединение двух аperiodических звеньев, полигармонический исходный сигнал



1(пунктирная линия) – исходный сигнал, 2 (тонкая сплошная линия) – восстановленный сигнал, 3 – сигнал на выходе обрабатываемого звена, 4 – ошибка восстановления исходного сигнала.

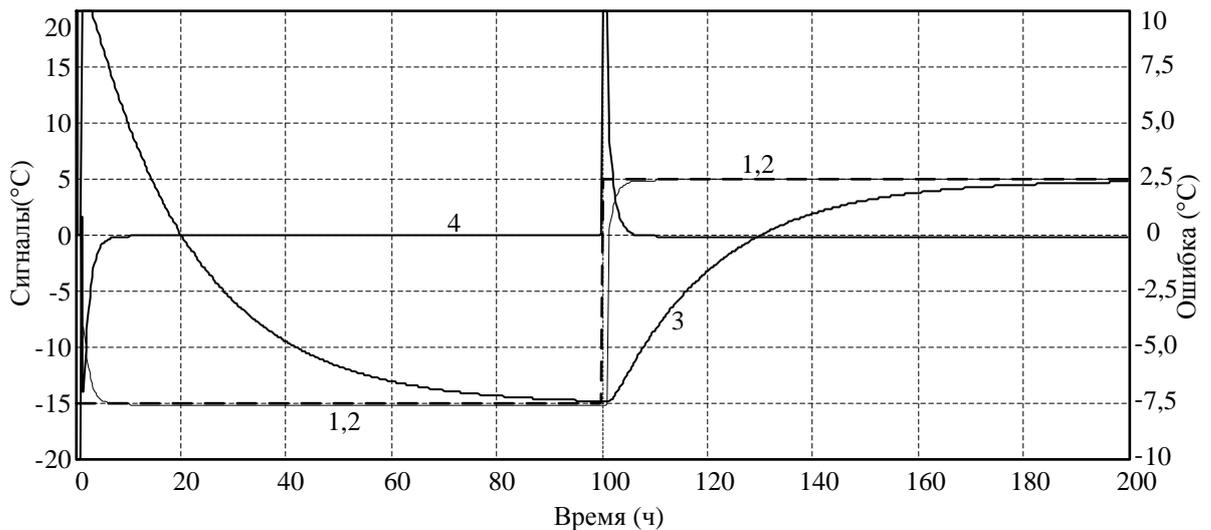
$$\sigma_{\text{RMSE}} = 1,655^{\circ}\text{C}, \sigma_{\text{NRMSE}} = 6,1\%$$

Рисунок 2.32 – Результат моделирования: последовательное соединение двух аperiodических звеньев и звена запаздывания, полигармонический исходный сигнал



1(пунктирная линия) – исходный сигнал, 2 (тонкая сплошная линия) – восстановленный сигнал, 3 – сигнал на выходе обрабатываемого звена, 4 – ошибка восстановления исходного сигнала.

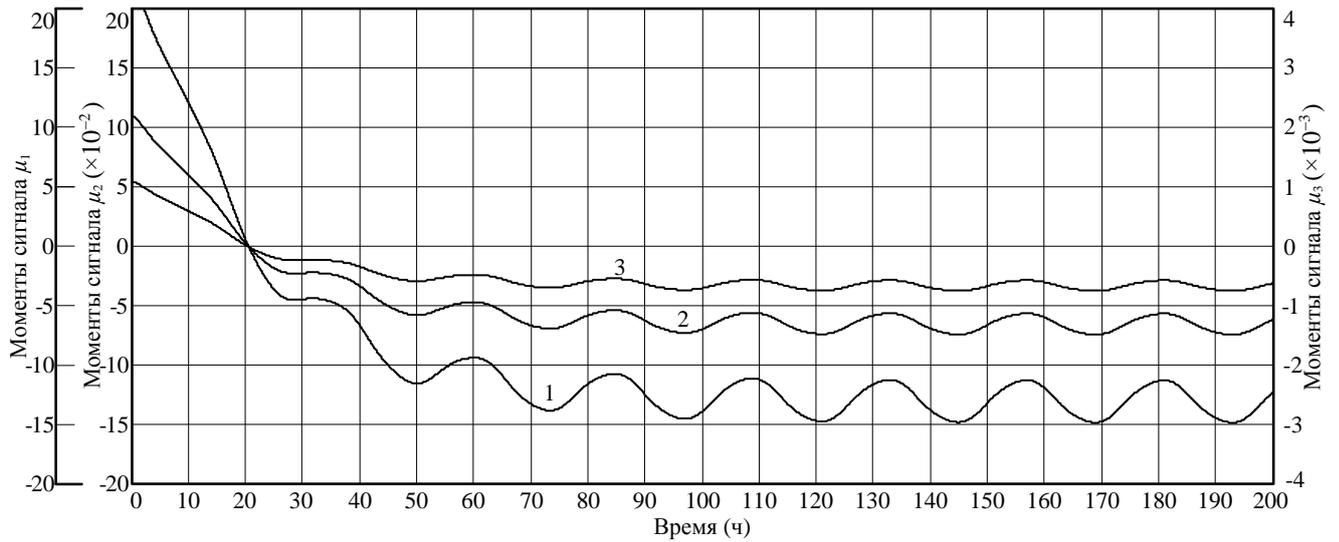
Рисунок 2.33 – Результат моделирования: последовательное соединение двух аperiodических звеньев, ступенчатое изменение исходного сигнала



1(пунктирная линия) – исходный сигнал, 2 (тонкая сплошная линия) – восстановленный сигнал, 3 – сигнал на выходе обрабатываемого звена, 4 – ошибка восстановления исходного сигнала.

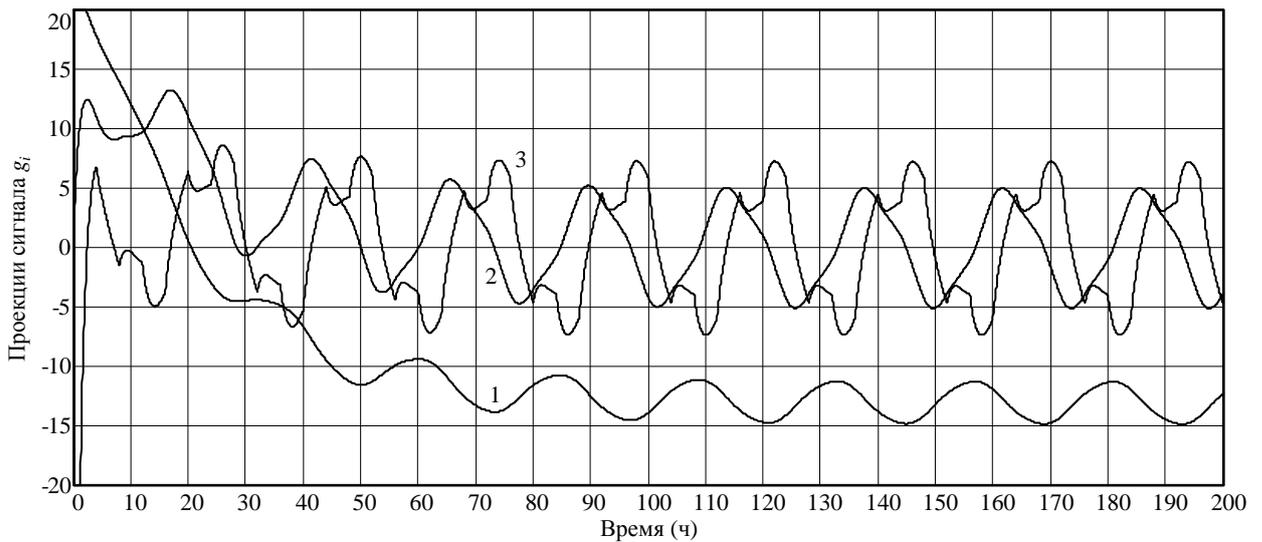
$$\sigma_{\text{RMSE}} = 1,655^{\circ}\text{C}, \sigma_{\text{NRMSE}} = 6,1\%$$

Рисунок 2.34 – Результат моделирования: последовательное соединение двух аperiodических звеньев и звена запаздывания, ступенчатое изменение исходного сигнала



$$1 - \mu_0(t), 2 - \mu_1(t), 3 - \mu_2(t).$$

Рисунок 2.35 – Вектор моментов исходного сигнала



$$1 - g_0(t), 2 - g_1(t), 3 - g_2(t).$$

Рисунок 2.36 – Вектор проекций

По результатам второй группы проведенных экспериментов сделаны следующие выводы:

1) Предложенный подход к синтезу обратных операторов обеспечивает достаточно высокое качество восстановления исходного сигнала на входе операторов вида (2.4) для первого и второго порядков, т.е. для распространенных случаев инженерного описания объектов управления. При этом приемлемое

качество восстановления исходного сигнала сохраняется и при наличии нелинейного звена чистого запаздывания, т.е. для нелинейного оператора, который является объектом (системой) бесконечного порядка.

2) Предложенный подход к синтезу обратных операторов обеспечивает приемлемое качество восстановления исходных сигналов различного вида: гармонических, полигармонических, произвольных, в том числе не являющихся гладкими.

3) При восстановлении кусочно-непрерывного сигнала, пропущенного через нелинейный оператор со звеном запаздывания, восстановленный сигнал сохраняет характеристики предыдущего непрерывного интервала в точке излома и на части следующего за ней интервала, равного по длительности величине запаздывания, вследствие чего в окрестности точек излома кусочно-непрерывного сигнала увеличивается величина ошибки. Для решения данной проблемы необходимо осуществлять сглаживание исходного сигнала.

4) При восстановлении полигармонического сигнала наблюдается увеличение ошибки восстановления гармоник с частотами выше постоянной времени обрабатываемого оператора. Для решения данной проблемы необходимо осуществлять сглаживание исходного сигнала. В этом случае ошибка, вызванная сглаживанием исходного сигнала, несущественна, т.к. обрабатываемый оператор вида (2.4) является фильтром нижних частот.

Построение обратного оператора для звена чистого запаздывания сдвигающими фильтрами высокого порядка.

Как видно из рассмотренных выше примеров разложения, системы со звеном запаздывания относятся к категории систем бесконечного порядка. В отличие от систем без звена задержки, их разложение требует использования фильтров высокого порядка. При этом реализация системы управления с аппроксимированной моделью бесконечного порядка обеспечивает худшие показатели качества регулирования и устойчивости в сравнении с использованием модели конечного порядка. Однако практика представления системы в виде

последовательно соединенных звена чистого запаздывания и одной или двух постоянных времени получила широкое распространение на практике, прежде всего благодаря удобству идентификации параметров такой системы простыми инженерными методами. В качестве решения данной проблемы предлагается раздельное обращение динамического оператора без звена запаздывания и оператора запаздывания.

Обратный оператор для звена чистого запаздывания строится в соответствии с выражением (2.6), при этом принимается $\lambda = \tau_d$. Выходной сигнал полученного обратного оператора временного сдвига определяется выражением:

$$T_{\text{ind}}(t + \tau_d) \approx \sum_{i=0}^n \tau_d^i \cdot g_i(t), \quad (2.68)$$

Нахождение проекций $g_i(t)$ осуществляется в соответствии с системой выражений (2.32), аналогично обратному оператору, изображенному на рисунке 2.5. Порядок экспоненциального фильтра определяется в соответствии с требованиями к точности и возможными ограничениями на вычислительную сложность. Полученный оператор временного сдвига можно представить в виде структуры, изображенной рисунке 2.37.

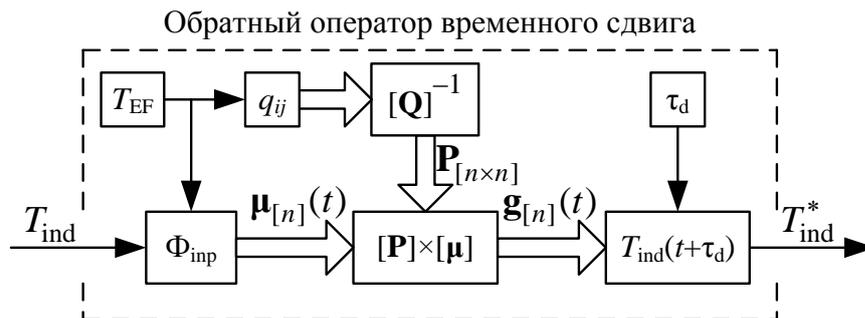


Рисунок 2.37 – Структура оператора временного сдвига

Таким образом, для построения обратного оператора для системы вида (2.4) получим структуру обратного оператора, содержащую последовательное соединение двух обратных операторов: оператора обратной динамики для инерционного звена порядка n и оператора временного сдвига (рисунок 2.5).

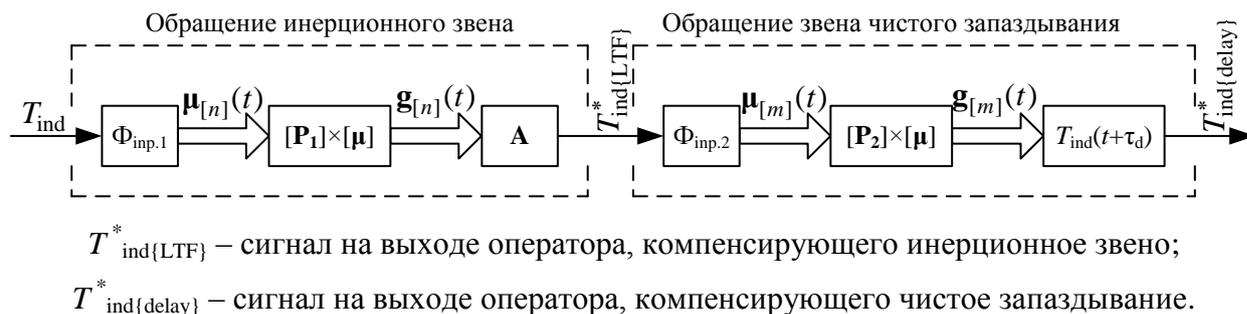


Рисунок 2.38 – Структура обратного динамического оператора для инерционного звена и звена чистого запаздывания

Заметим, экспоненциальные фильтры полученных обратных операторов в общем случае имеют разные порядок и постоянные времени.

2.4. Исследование ошибки восстановления исходного сигнала с использованием обратных динамических звеньев

В продолжение базовых вычислительных экспериментов, рассмотренных в параграфе 2.3, было проведено исследование зависимости ошибки восстановления исходного сигнала посредством построения обратных динамических звеньев на базе экспоненциальных фильтров. В данном параграфе, аналогично параграфу 2.3, вычисляется ошибка восстановления исходного сигнала как сравнение исходного сигнала и сигнала на выходе последовательно соединенных операторов: динамического оператора и соответствующего ему обратного оператора; рассматриваются среднеквадратическая ошибка (СКО / RMSE) и приведенная СКО (NRMSE), определяемые по формулам (2.61) и (2.62), соответственно.

Эксперименты проведены в среде моделирования *Vissim 7.0*, метод численного интегрирования: метод Рунге – Кутты второго порядка точности, время симуляции для расчета ошибки – 1600 ч, шаг моделирования – постоянный, различный по условиям экспериментов.

Ниже рассмотрены некоторые из полученных зависимостей.

Зависимость ошибки восстановления сигнала от порядка линейной системы.

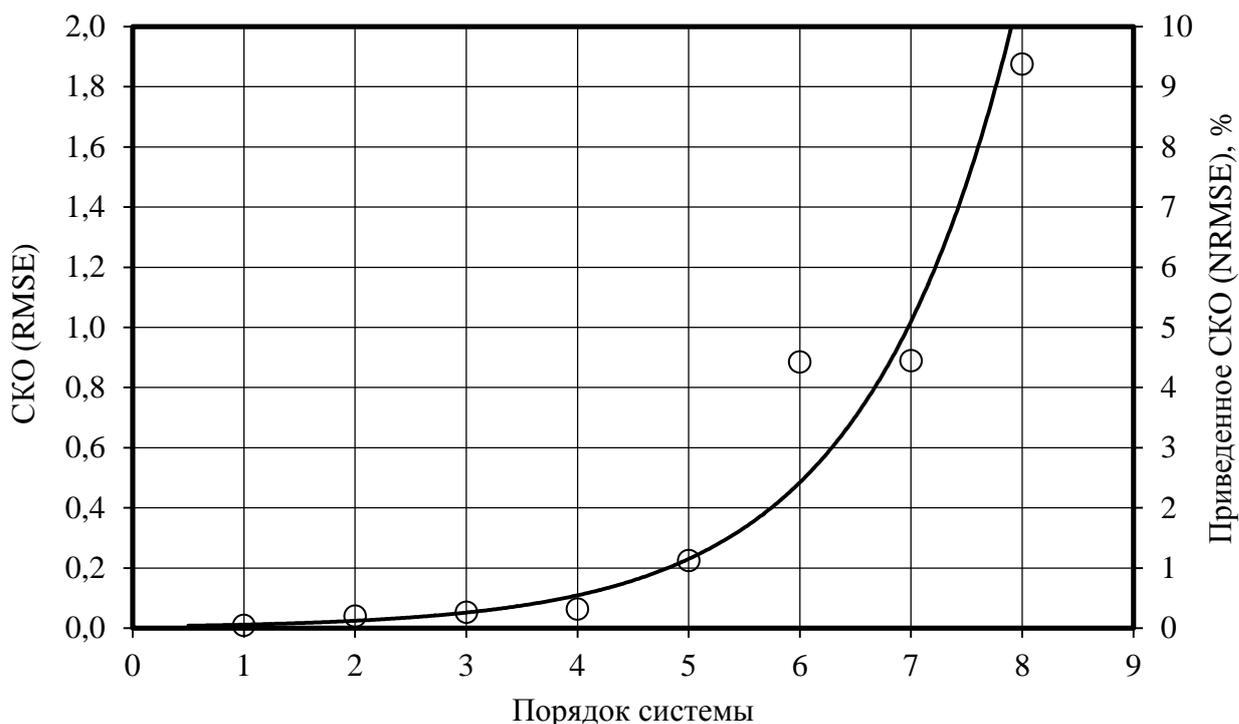
В ходе эксперимента по построению данной зависимости исследовано изменение ошибки восстановления исходного сигнала в зависимости от изменения порядка линейной системы (динамического оператора). Осуществлено моделирование систем конечного порядка n (без звена чистого запаздывания) вида:

$$L = \left(\frac{1}{T \cdot s + 1} \right)^n, \quad T = 20 \text{ ч}, \quad n = \overline{1,8}.$$

Постоянная времени T принята в соответствии с идентифицированными параметрами основного объекта внедрения – учебно-лабораторного корпуса ЗБВ Южно-Уральского государственного университета (см. параграф 3.2). Для каждой системы порядка n был составлен обратный оператор порядка n с использованием метода экспоненциального сглаживания. Исходный сигнал – синусоидальный с периодом 24 ч (соответствует суточным колебаниям температуры наружного воздуха). В рамках эксперимента шаг моделирования выбран константой и составляет 0,005 ч (18 с).

Результаты представлены в графическом виде (рисунок 2.39).

Наблюдается прямая зависимость ошибки восстановления исходного сигнала от порядка линейной системы. Полученные экспериментальные данные были аппроксимированы экспоненциальной зависимостью, что позволяет говорить об экспоненциальном характере роста ошибки с увеличением порядка линейной системы. Приемлемые значения ошибки ($\text{NRMSE} \leq 1\%$) получены для систем ниже 5 порядка. В промышленной практике объекты управления во многих случаях задаются системами первого или второго порядка, что при указанных выше параметрах моделирования позволяет говорить о среднеквадратической ошибке, не превышающей 0,5%.



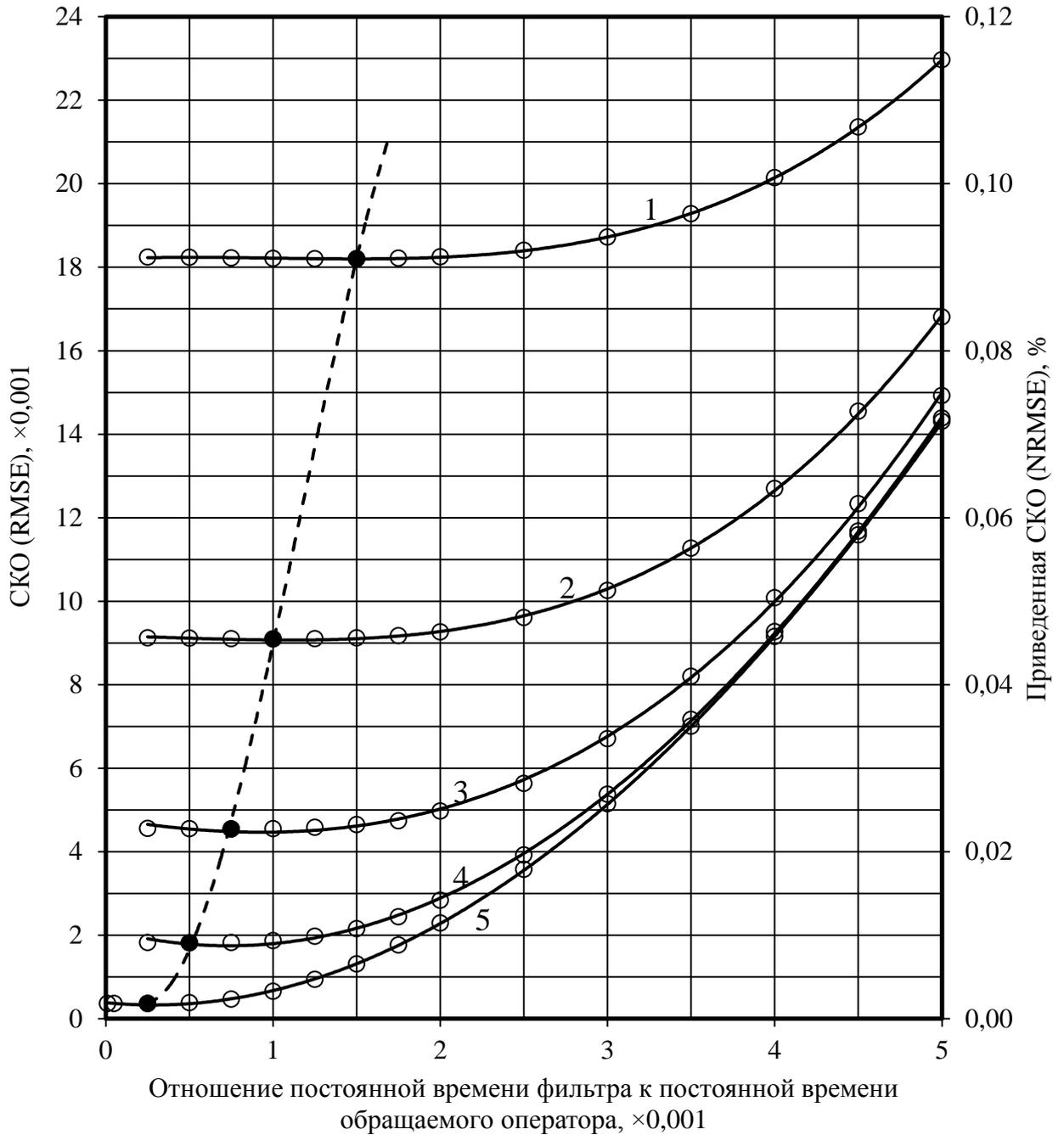
Кружками показаны экспериментальные точки.

Рисунок 2.39 – Зависимость СКО и приведенной СКО от порядка системы

Зависимость ошибки восстановления сигнала от отношения постоянной времени фильтра к постоянной времени обрабатываемого оператора.

В ходе данной серии экспериментов исследовано изменение ошибки восстановления исходного сигнала в зависимости от отношения постоянной времени фильтра к постоянной времени обрабатываемого оператора. Осуществлено моделирование аperiodической системы 1 порядка (без звена чистого запаздывания) с постоянной времени T . Для данной системы с использованием метода экспоненциального сглаживания был составлен ряд обратных операторов, различающихся постоянными времени экспоненциального фильтра T_{EF} (в пределах $(0; 5] \times 10^{-3}T$). Исходный сигнал – синусоидальный с периодом 24 ч (аналогично предыдущему эксперименту). Эксперименты проведены с различным шагом моделирования Δt_m от $10^{-5}T$ до $5 \times 10^{-4}T$.

Результаты моделирования при $T = 20$ ч (выбор T – аналогично предыдущему эксперименту) представлены в графическом виде (рисунок 2.40).



Сплошные линии соответствуют сериям модельных экспериментов с шагом моделирования:

$$1 - 5 \times 10^{-4}T, \quad 2 - 2,5 \times 10^{-4}T, \quad 3 - 1,25 \times 10^{-4}T, \quad 4 - 5 \times 10^{-5}T, \quad 5 - 10^{-5}T.$$

Пустыми кружками показаны экспериментальные точки. Черными кружками обозначены экспериментальные точки с наименьшей ошибкой в данной серии. По черным кружкам построена кривая минимумов ошибок (пунктирная линия).

Рисунок 2.40 – Зависимость СКО и приведенной СКО от отношения постоянной времени фильтра к постоянной времени обрабатываемого оператора

Ввиду линейности обрабатываемого оператора результаты эксперимента не зависят от абсолютной величины T ; поэтому указываются не абсолютные величины T_{EF} и $\Delta t_{\text{м}}$, а их значения относительно величины T .

На серии графиков в целом наблюдается прямая экспоненциальная зависимость ошибок σ_{RMSE} и σ_{NRMSE} восстановления исходного сигнала от отношения T_{EF}/T , что объясняется снижением с ростом T_{EF} частоты среза $f_{\text{EF}} = 1/T_{\text{EF}}$ являющегося фильтром нижних частот экспоненциального фильтра обратного оператора и, как следствие, подавлением большего количества высокочастотных составляющих исходного сигнала.

Однако при уменьшении T_{EF} ниже определенного значения также наблюдается незначительный рост σ_{RMSE} и σ_{NRMSE} , который можно объяснить усилением влияния погрешности от использования численных методов интегрирования программной среды моделирования, а также от ограниченной точности хранения и вычислительной обработки дискретных данных. Кроме того, с уменьшением T_{EF} возрастает влияние погрешности дискретизации по времени в результате уменьшения отношения $T_{\text{EF}}/\Delta t_{\text{м}}$. Т.к. современные системы управления строятся на базе цифровых вычислительных средств (контроллеров), то влияние указанных вычислительных погрешностей также нужно учитывать.

Также на графиках наблюдается рост ошибок σ_{RMSE} и σ_{NRMSE} с ростом $\Delta t_{\text{м}}$, что также преимущественно объясняется влиянием вычислительных погрешностей.

На рисунке пунктирной линией показана серия оптимальных точек по критерию минимума ошибок σ_{RMSE} и σ_{NRMSE} при различных значениях $\Delta t_{\text{м}}$. С увеличением величины $\Delta t_{\text{м}}$ увеличивается оптимальное отношение $T_{\text{EF}}/\Delta t_{\text{м}}$.

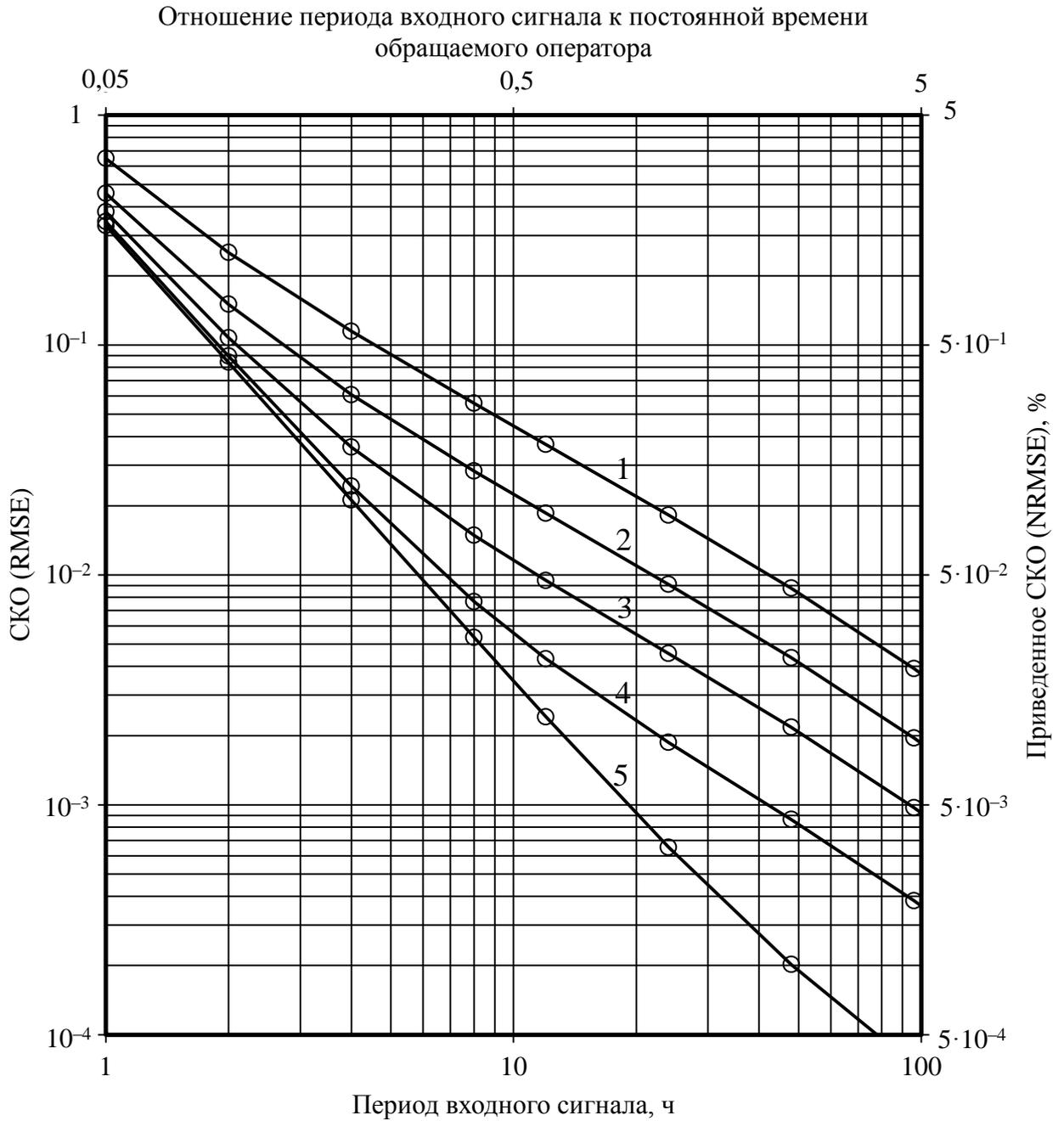
Полученная серия зависимостей имеет практическую ценность и используется при настройке экспоненциального фильтра (см. параграф 4.3).

Зависимость ошибки восстановления сигнала от отношения периода входного сигнала к постоянной времени обрабатываемого оператора.

В ходе данной серии экспериментов исследовано изменение ошибки восстановления исходного сигнала в зависимости от отношения периода входного сигнала к постоянной времени обрабатываемого оператора. Аналогично предыдущей серии экспериментов, осуществлено моделирование апериодической системы 1 порядка (без звена чистого запаздывания) с постоянной времени $T = 20$ ч. Для каждой системы порядка n был составлен обратный оператор порядка n с использованием метода экспоненциального сглаживания. Постоянная времени экспоненциального фильтра $T_{EF} = 0,02$ ч. В серии экспериментов на вход системы подаются синусоидальные исходные сигналы с различным периодом колебаний T_{sin} (от 1 ч и выше). Сигналы с периодом менее 1 ч не рассматривались ввиду их слабого влияния на температуру в здании с постоянной времени $T = 20$ ч. Эксперименты проведены с различным шагом моделирования Δt_m (от $10^{-5}T$ до $5 \times 10^{-4}T$, аналогично предыдущей серии экспериментов). Результаты моделирования при $T_{sin} > 1000$ ч на рисунке не показаны, т.к. воздействия с такой постоянной времени являются очень медленными, не характерными для колебаний температуры воздуха (в основном характеризующихся суточными колебаниями) и существенно выше постоянной времени объекта (здания), однако было установлено, что характер зависимости сохраняется и при $T_{sin} > 100$ ч.

Результаты моделирования для T_{sin} представлены в графическом виде (рисунок 2.41). При $T_{sin} > 2T$ наблюдается обратная линейная зависимость между $\log \sigma_{RMSE}$ и $\log(T_{sin} / T)$, а также между $\log \sigma_{NRMSE}$ и $\log(T_{sin} / T)$. На рисунке показана величина ошибок восстановления исходного сигнала при ($1 \leq T_{sin} \leq 100$) ч. При $T_{sin} < 2T$ наблюдается обратная, почти линейная зависимость с постепенным схождением серии зависимостей к одной зависимости в районе точки $T_{sin} \rightarrow 0$.

С практической точки зрения важно рассмотрение изменения ошибки восстановления исходного сигнала в пределах T_{sin} от некоторого минимального уровня, ниже которого влияние на здание несущественно (оценочно $0,05T \dots 0,1T$), до $T_{sin} = 24$ ч, соответствующего суточным колебаниям температуры.



Сплошные линии соответствуют сериям модельных экспериментов с шагом моделирования:

$$1 - 5 \times 10^{-4}T, \quad 2 - 2,5 \times 10^{-4}T, \quad 3 - 1,25 \times 10^{-4}T, \quad 4 - 5 \times 10^{-5}T, \quad 5 - 10^{-5}T.$$

Кружками показаны экспериментальные точки.

Рисунок 2.41 – Зависимость СКО и приведенной СКО от отношения периода входного сигнала к постоянной времени обрабатываемого оператора

Также на графиках наблюдается рост ошибок σ_{RMSE} и σ_{NRMSE} с ростом Δt_m , что преимущественно объясняется влиянием вычислительных погрешностей (см. предыдущую серию экспериментов).

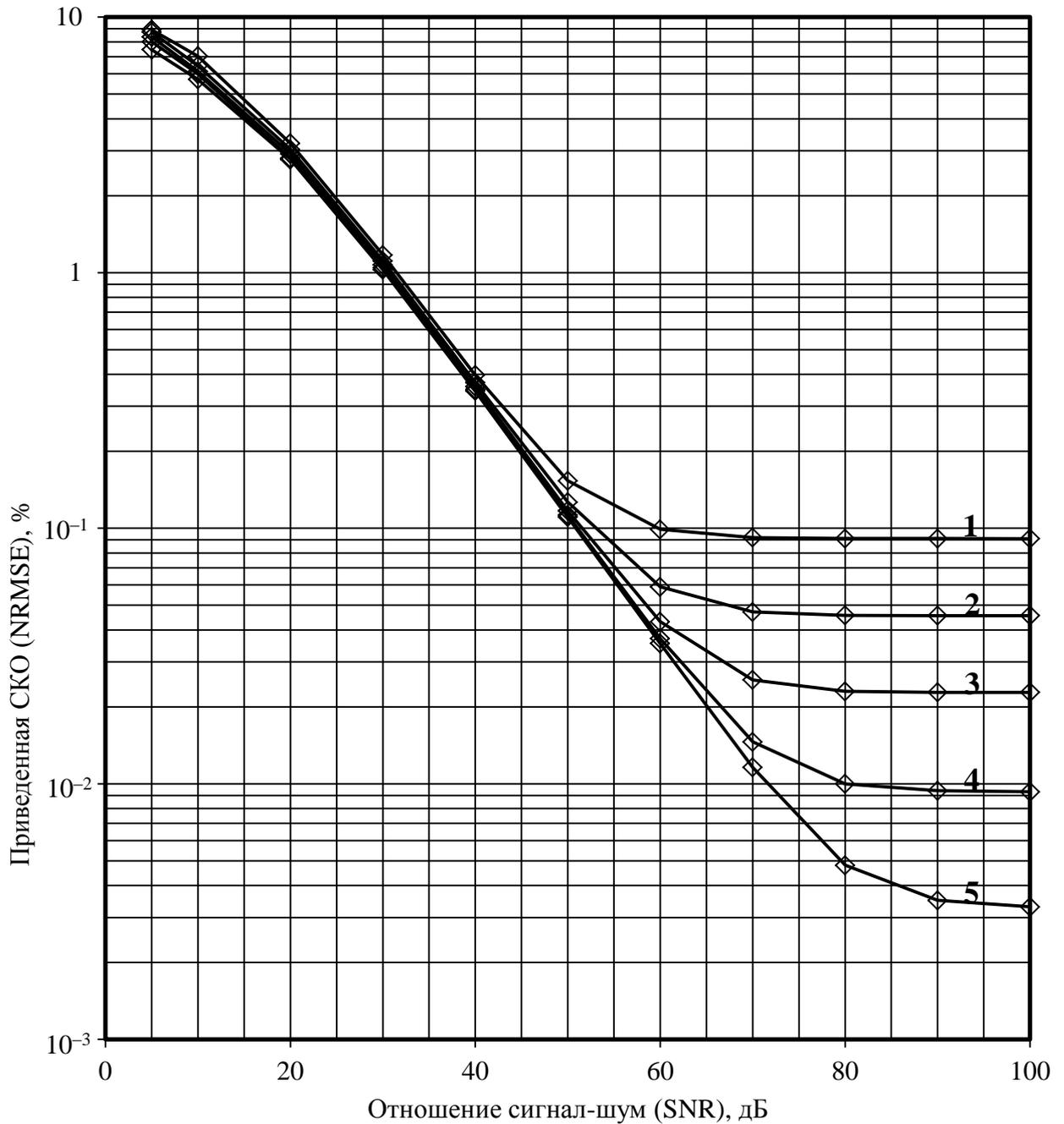
Зависимость ошибки восстановления сигнала от отношения сигнал/шум.

В ходе данной серии экспериментов исследовано изменение ошибки восстановления исходного сигнала в зависимости от отношения сигнал-шум (signal-to-noise ratio, SNR) исходного сигнала. Аналогично предыдущей серии экспериментов, осуществлено моделирование аperiodической системы 1 порядка (без звена чистого запаздывания) с постоянной времени $T = 20$ ч. Для каждой системы порядка n был составлен обратный оператор порядка n с использованием метода экспоненциального сглаживания. Постоянная времени экспоненциального фильтра $T_{\text{EF}} = 0,02$ ч. В серии экспериментов на вход системы подается синусоидальный исходный сигнал с периодом колебаний $T_{\text{sin}} = 24$ ч, зашумленный аддитивным белым гауссовским шумом. Влияние шума рассмотрено в диапазоне $\text{SNR} = [5 ; 100]$ дБ. Эксперименты проведены с различным шагом моделирования Δt_m от 0,0002 ч до 0,01 ч.

Результаты моделирования представлены в графическом виде (рисунок 2.42). При $20 < \text{SNR} < 50$ (дБ) наблюдается обратная линейная зависимость между $\log \sigma_{\text{NRMSE}}$ и SNR. При $\text{SNR} < 20$ дБ рост ошибки с уменьшением SNR (ростом шума) замедляется. Во всем диапазоне $\text{SNR} < 50$ дБ ошибка σ_{NRMSE} определяется именно SNR и влияние шага моделирования на ошибку не существенно. С дальнейшим увеличением $\text{SNR} > 50$ дБ влияние шума на сигнал становится столь малым, что величина σ_{NRMSE} определяется преимущественно вычислительными ошибками моделирования. При $\text{SNR} > 70 \dots 90$ дБ (для различных значений шага моделирования) σ_{NRMSE} устанавливается на постоянном уровне, определяемом шагом моделирования.

С практической точки зрения зависимость изменения ошибки восстановления исходного сигнала от SNR позволяет оценить возможность

достижения необходимого уровня точности восстановления и указывает на необходимость фильтрации исходных сигналов от высокочастотного шума.



Сплошными линиями показаны зависимости приведенной СКО от ОСШ.

Линии соответствуют сериям модельных экспериментов с шагом моделирования:

1 – 0,01 ч; 2 – 0,005 ч; 3 – 0,0025 ч; 4 – 0,001 ч; 5 – 0,0002 ч.

Ромбами показаны экспериментальные точки.

Рисунок 2.42 – Зависимость СКО и приведенной СКО от ОСШ

Выводы к главе 2

1. В работе предложена оригинальная двухконтурная структура системы автоматического управления тепловым режимом здания, объединяющая в себе базовый канал управления, осуществляющий управление по 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. Применение контура компенсации позволяет на практике устранить статическую ошибку, характерную для регулирования по разомкнутому контуру, а также уменьшить колебания регулируемой координаты – температуры воздуха в помещениях.

2. Разработан новый метод оценки совокупного действия возмущающих факторов на тепловой режим здания посредством сигнала обобщенного возмущения, формируемого на основе данных, доступных для непосредственного измерения в условиях массового внедрения в автоматизированных тепловых пунктах зданий. Применение данного метода позволяет в реальном времени учитывать действие возмущений в системах автоматического управления тепловым режимом здания.

3. Предложен метод формирования упреждающей оценки сигнала обобщенного возмущения на основе построения модели обратной динамики объекта управления с применением экспоненциальной фильтрации в полиномиальном базисе. Обоснован выбор базиса экспоненциального фильтра посредством сравнения результатов экспоненциальной фильтрации в полиномиальном и гармоническом базисах на тестовых данных, приближенных по характеристикам к фактическим данным эксплуатации систем отопления зданий. Рассмотрены особенности реализации обратных динамических операторов на базе экспоненциальных фильтров при построении систем автоматического управления тепловым режимом здания.

4. Получены и исследованы зависимости ошибок выходных сигналов, формируемых обратными динамическими операторами на базе экспоненциальных фильтров от ряда параметров: порядка линейной системы, отношения постоянной времени фильтра к постоянной времени обрабатываемого оператора, отношения периода входного сигнала к постоянной времени обрабатываемого оператора, отношения сигнал-шум исходного сигнала. На их основе может быть выполнена базовая настройка параметров экспоненциальных фильтров для быстрого запуска и обеспечения устойчивости автоматических систем регулирования отопления на практике.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОТАПЛИВАЕМОМ ЗДАНИИ

3.1. Модель теплового режима здания

Основным уравнением, описывающим тепловой режим отапливаемого объекта (здания или сооружения), является уравнение теплового баланса, записываемое в соответствии законом сохранения энергии. В [93] был предложен вариант записи уравнения теплового баланса для переходного процесса температурного режима отапливаемого объекта:

$$c_{\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot V_{\text{air}} \cdot \frac{dT_{\text{ind}}(t)}{dt} = Q_{\text{source}}(t) + Q_{\text{rad}}(t) - Q_{\text{env}}(t) - Q_{\text{wind}}(t) \pm Q_{\text{acc}}(t) \quad (3.1)$$

где c_{air} и ρ_{air} – теплоемкость и плотность воздуха в отапливаемом здании, соответственно; V_{air} – отапливаемый объем; $Q_{\text{source}}(t)$ – теплота источника; $Q_{\text{rad}}(t)$ – мощность радиационного нагрева; $Q_{\text{env}}(t)$ – тепловые потери через ограждающие конструкции; $Q_{\text{wind}}(t)$ – тепловые потери в результате ветрового воздействия.

В соответствии с рисунком 1.1 преобразуем (3.1) к виду:

$$c_{\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot V_{\text{air}} \cdot \frac{dT_{\text{ind}}(t)}{dt} = Q_{\text{h}}(t) + \sum_i Q_{\text{PF } i}(t), \quad (3.2)$$

где $Q_{\text{h}}(t)$ – тепловая энергия, передаваемая зданию системой отопления; $Q_{\text{PF } i}(t)$ – поток тепловой энергии, отражающий влияние i -го возмущающего воздействия;

$$\sum_i Q_{\text{PF } i}(t) = Q_{\{J_{\text{rad}}\}}(t) - Q_{\{T_{\text{out}}\}}(t) - Q_{\{V_{\text{wind}}\}} + Q_{\text{int}}(t) \pm Q_{\text{acc}}(t). \quad (3.3)$$

Из (3.2) следует:

$$Q_{\text{h}}(t) + \sum_i Q_{\text{PF } i}(t) = 0 \Rightarrow T_{\text{ind}} = \text{const}. \quad (3.4)$$

Из параметров уравнений (3.2), (3.3) выделим 3 ключевых фактора: $T_{\text{ind}}(t)$ – основная регулируемая координата объекта, основной показатель потребительского комфорта и качества процесса отопления; $Q_{\text{h}}(t)$ – управляющее воздействие на объект, зависящая от управляющего сигнала системы управления

величина; $Q_{\{T_{out}\}}(t)$ – возмущающее воздействие, имеющее наибольшее влияние на объект.

Запишем формулу Н. С. Ермолаева [42], определяющую удельную тепловую характеристику:

$$q_h = \left(\frac{P}{S} \cdot (k_{wall} + \varphi \cdot (k_{wndw} - k_{wall})) + \frac{1}{H} \cdot (k_{roof} + k_{bsmnt}) \right) \cdot (1 + \mu_h) \quad (3.5)$$

где P , S , H – периметр, площадь и высота здания, соответственно; k_{wall} , k_{wndw} , k_{roof} , k_{bsmnt} – приведенные коэффициенты теплопередачи наружных стен, оконных проемов, кровли и перекрытия над подвалом, соответственно; φ – коэффициент остекления наружных стен, μ_h – коэффициент инфильтрации (затраты теплоты на вентиляцию). На практике для определения тепловых потерь здания применяют следующую формулу [4; 42; 55; 60]:

$$Q_h(t) = q_h \cdot V \cdot (T_{ind}(t) - T_{out}(t)) \quad (3.6)$$

где q_h – удельный расход тепловой энергии на отопление здания в соответствии с СНиП 23-02-2003 [101], СП 23-101-2004 [102] (Гкал/(ч·м³·°C)); V – наружный объем здания; $T_{ind}(t)$ – температура воздуха в помещении; $T_{out}(t)$ – температура наружного воздуха.

Основываясь на концепции обобщенного возмущения (см. главу 2.1), с учетом (3.4) и (3.6), преобразуем (3.2) к виду:

$$T_{ind}^*(t) = \frac{Q_h(t) + Q_z(t)}{q_h \cdot V} + T_{out}(t), \quad (3.7)$$

где $T_{ind}^*(t)$ – упреждающая (прогнозная) оценка температуры воздуха в помещении (горизонт прогнозирования определяется колебаниями T_{ind} под воздействием возмущающих факторов (рисунок 1.1)) [104]. Инертность происходящих в здании процессов отразим динамическим оператором:

$$T_{ind}(t) = W_{obj} \{ T_{ind}^*(t) \}. \quad (3.8)$$

Структура модели динамики теплового режима здания, соответствующей (3.7) и (3.8), показана на рисунке 3.1 [104]. Структура данной модели соответствует обобщенной структуре модели, приведенной на рисунке 2.3.

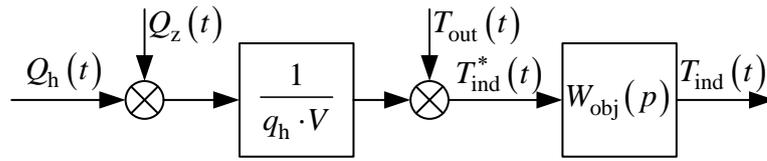


Рисунок 3.1 – Структурная схема модели динамики теплового режима здания

Однако, как было отмечено в п. 1.1, различные возмущающие факторы воздействуют на здание с различной динамикой [1; 106; 142]. Для решения данной проблемы было предложено разделение происходящих в системе процессов на две условные категории: процессы с быстрой динамикой и процессы с медленной динамикой. К процессам с медленной динамикой относится действие факторов, отделенных от температуры воздуха в помещении ограждающими конструкциями здания. Процессы с медленной динамикой включают действие основного возмущающего воздействия T_{out} , а также возмущений V_{wind} и Q_{acc} , влияние которых отражено в T_{out} . Быстродействие указанных факторов характеризуется инертностью ограждающих конструкций здания. К процессам с быстрой динамикой относится воздействие факторов, непосредственно влияющих на температуру воздуха в помещении (J_{rad} , Q_{int}), влияние которых отражено в Q_z , а также влияние управляющего воздействия Q_h . Разделенная таким образом динамическая модель теплового режима здания примет вид, представленный на рисунке 3.2. Данная модель описывается операторным выражением:

$$T_{ind}(t) = W_{T_{out}} \{T_{out}(t)\} + W_h \left\{ \frac{Q_h(t) + Q_z}{q_h \cdot V} \right\}, \quad (3.9)$$

где $W_{T_{out}}\{\bullet\}$ – динамический оператор процессов с медленной динамикой, $W_h\{\bullet\}$ – динамический оператор процессов с быстрой динамикой.

Произведем обращение динамической модели, изображенной на рисунке 3.2. Структурная схема модели обратной динамики теплового режима здания примет вид, представленный на рисунке 3.3. Структура данной модели также соответствует обобщенной структуре модели, приведенной на рисунке 2.3.

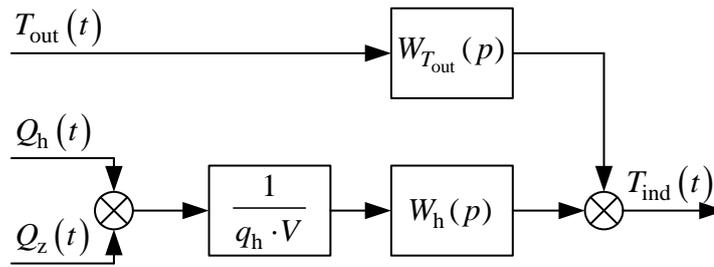


Рисунок 3.2 – Структурная схема динамической модели теплового режима здания с разделением процессов по динамике

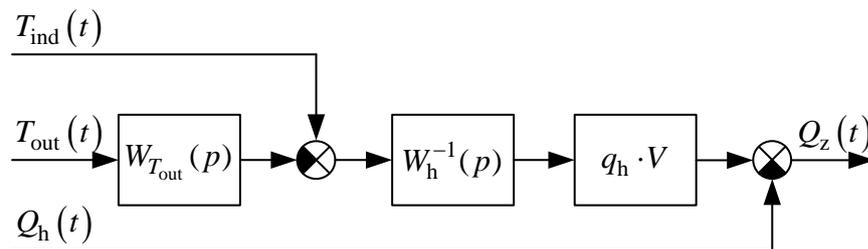


Рисунок 3.3 – Структурная схема модели обратной динамики теплового режима здания с разделением процессов по динамике

Полученная структура, позволяющая получить оценочное значение обобщенного возмущения, описывается операторным выражением:

$$Q_z^*(t) = Q_h(t) - q_h \cdot V \cdot W_h^{-1} \{ W_{T_{out}} \{ T_{out}(t) \} - T_{ind}(t) \}, \quad (3.10)$$

где $W_h^{-1}\{\bullet\}$ – оператор обратной динамики для группы процессов с быстрой динамикой [104]. Построение оператора обратной динамики осуществлено с использованием метода, использующего прогнозирующий цифровой экспоненциальный фильтр [19; 104; 105]. Детальное описание метода приводится в главе 2 диссертации.

Удельный расход тепловой энергии на отопление здания q_h определяется параметрами ограждающих конструкций и системы отопления здания, следовательно, требуется индивидуальное определение данного параметра для каждого объекта. Кроме того, с течением времени, в силу естественного старения элементов конструкции здания величина q_h для текущего здания изменяется. Кроме того, величина q_h изменяется существенно при проведении

энергосберегающих мероприятий (утепление фасадов, замена окон, замена радиаторов отопления и т.д.). Таким образом, требуется непрерывное определение или периодический пересчет q_h в ходе эксплуатации здания.

Рассмотрим процесс нахождения q_h . Положим, что сигналы T_{ind} , а соответственно и сигнал T_{ind}^* , являются статистически несмещенными, т.е.:

$$M_t \{T_{ind}\} = M_t \{T_{ind}^*\}, \quad (3.11)$$

а сигнал Q_z – центрированный, т.е.:

$$M_t \{T_z\} = 0, \quad (3.12)$$

где $M_t \{\bullet\}$ – оператор усреднения во времени, определяемый по формуле:

$$M_t \{x(t)\} = \frac{1}{t_{obs}} \cdot \int_{t-t_{obs}}^t x(t) dt, \quad (3.13)$$

где t_{obs} – период наблюдения, тогда:

$$q_h = \frac{M_t \{Q_h(t)\}}{V \cdot (M_t \{T_{out}(t)\} - M_t \{T_{ind}(t)\})} \quad (3.14)$$

Возможен вариант определения величины q_h по мгновенным значениям сигналов Q_h , T_{out} , T_{ind} , при этом с целью уменьшения влияния возмущающих факторов q_h определяется путем усреднения результатов серии расчетов:

$$q_h = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n q_{hj}, \quad (3.15)$$

где n – количество усредняемых расчетов, q_{hj} – результат j -го расчета.

В процессе работы предложенной системы управления тепловым режимом здания (рисунок 2.1) осуществляется непрерывный пересчет параметра q_h в реальном времени непосредственно на объекте управления на основе текущих данных эксплуатации.

3.2. Идентификация и верификация модели теплового режима здания

Модель теплового режима здания содержит 3 входных сигнала: Q_h , T_{out} , Q_z (рисунки 3.1, 3.2). Сигнал Q_z является центрированным (см. параграф 3.1), следовательно, статистически его влиянием можно пренебречь. Сигналы Q_h и T_{out} оказывают существенное влияние на T_{ind} и определяют тепловой баланс здания.

Для модели без разделения процессов по динамике (рисунок 3.1) требуется осуществлять идентификацию объекта управления по каналу $T_{ind}^* \rightarrow T_{ind}$. Для модели с разделением процессов по динамике требуется осуществлять идентификацию объекта управления по двум каналам: $Q_h \rightarrow T_{ind}$ и $T_{out} \rightarrow T_{ind}$.

Сложность идентификации модели заключается в одновременном изменении входных сигналов Q_h и T_{out} и невозможности зафиксировать значение хотя бы одного из них на необходимый промежуток времени. Сигнал T_{out} определяется независимыми от человека природными факторами. Подачей тепла в здание (параметр Q_h) возможно управлять через температуру прямой воды системы отопления (качественное регулирование), количество подаваемого в систему отопления теплоносителя (количественное регулирование) или совокупностью этих двух параметров (качественно-количественное регулирование), однако фактический теплосъем с системы отопления здания зависит от температуры воздуха в помещениях T_{ind} , которая в свою очередь зависит от температуры наружного воздуха T_{out} и ряда других факторов, определяемых величиной Q_z . Таким образом, значение параметра Q_h также невозможно точно зафиксировать. Другая причина, осложняющая процесс идентификации – нежелательность регулирования подачи тепла в функционирующее здание в широких пределах, как из-за угрозы заморозки системы отопления здания, так и по причине нарушения комфортных условий пребывания в здании. Кроме того, нужно учитывать существенное влияние ряда возмущений, характеризуемых величиной Q_z , и собственной аккумулирующей способности здания, которые также искажают переходную функцию и затрудняют идентификацию.

По названным выше причинам крайне затруднительно использовать типовые инженерные методы, основанные на анализе переходного процесса.

Вместо этого необходимо применение автоматизированных методов идентификации, осуществляемых с использованием соответствующего прикладного программного обеспечения.

Идентификация модели осуществлена с использованием комплекса инструментальных средств *System Identification Toolbox* из состава прикладного программного пакета *MATLAB*, который позволяет осуществить параметрическую идентификацию модели заданной структуры. Возможно осуществлять идентификацию: в режиме графического приложения – SISO-моделей (имеющих 1 вход и 1 выход), в режиме командной строки SISO-моделей и MISO-моделей (имеющих множество входов и 1 выход).

Далее рассматривается процесс идентификации MISO-модели, изображенной на рисунке 3.2. Для осуществления идентификации на вход *System Identification Toolbox* поданы входные и выходные сигналы модели. В соответствии с рисунком 3.2 модель имеет 2 входа (сигналы Q_h и T_{out}) и 1 выход (сигнал T_{ind}). Для целей идентификации были выбраны технологические данные о работе системы за период с 01 февраля 2015 г. 00:00 по 01 апреля 2015 г. 23:59. Для идентификации был выбран период, соответствующий средним показателям отопительного периода (без аномально холодных и аномально теплых температур) с целью исключить влияние дополнительных побочных факторов, влияющих на удельное теплотребление здания, таких как использование дополнительных источников тепла или активное открывание окон. Основные характеристики входных и выходных сигналов в рассматриваемом периоде представлены в таблице 3.1. На рисунках 3.4 и 3.5 показаны графики изменения входных и выходных сигналов за указанный период. При проведении процедуры идентификации был задан вид желаемой передаточной функции в соответствии с (2.4): 0 «нулей» и $n = 3$ «полюсов».

Таблица 3.1 – Параметры входных и выходных сигналов

№	Параметр	Значение
1	Общая продолжительность периода	60 сут. / 1440 ч

2	Градусо-сутки отопительного периода (ГСОП) (для нормативного значения $T_{ind} = 20^{\circ}\text{C}$)	1435,4 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут.}$
3	Среднесуточное теплопотребление	8,804 Гкал/сут.
4	Изменение температуры наружного воздуха в течение периода – минимальная температура – максимальная температура – средняя температура	-16,1 $^{\circ}\text{C}$ +6,3 $^{\circ}\text{C}$ -3,92 $^{\circ}\text{C}$
5	Изменение температуры воздуха в помещениях здания – минимальная температура – максимальная температура – средняя температура – среднесуточные колебания	17,58 $^{\circ}\text{C}$ 26,24 $^{\circ}\text{C}$ 22,58 $^{\circ}\text{C}$ 1,75 $^{\circ}\text{C}$

Осуществим идентификацию по каналу $T_{out} \rightarrow T_{ind}$. Т.к. входной и выходной сигнал имеют одинаковую размерность, примем коэффициент усиления по данному каналу равным $K_{T_{out}} = 1$. В результате процедуры идентификации была предложена передаточная функция вида:

$$W_{T_{out}}(p) = \frac{1}{56p^3 + 74p^2 + 19p + 1}. \quad (3.16)$$

По данным *System Identification Toolbox* ожидаемая СКО (RMSE) составит $\sigma = 0,25^{\circ}\text{C}$. Найдем полюсы передаточной функции:

$$W_{T_{out}}(p) = \frac{1}{(p+1)(14p+1)(4p+1)}. \quad (3.17)$$

Для удобства обработки в контроллере понизим порядок передаточной функции до $n = 2$, введя звено чистого запаздывания:

$$W_{T_{out}}(p) = \frac{1}{(14p+1)(4p+1)} \cdot e^{-p}. \quad (3.18)$$

Таким образом, $T_{LS1} = 14$ ч, $T_{LS2} = 4$ ч, $\tau_{dLS} = 1$ ч.

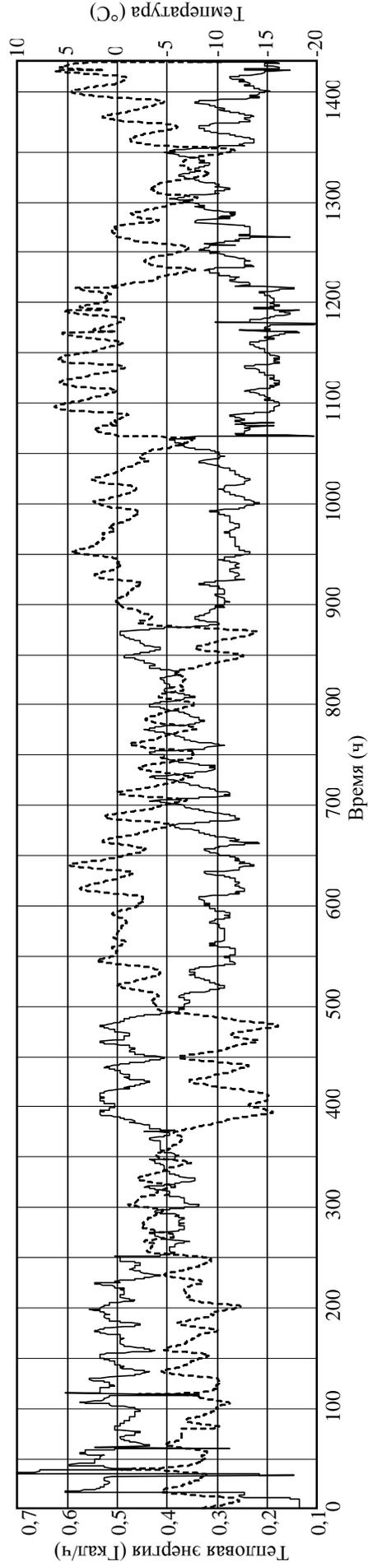


Рисунок 3.4 – Входные сигналы модели теплового режима здания

пунктирная линия – Q_h (Гкал/ч), сплошная линия – T_{ind} (°C)

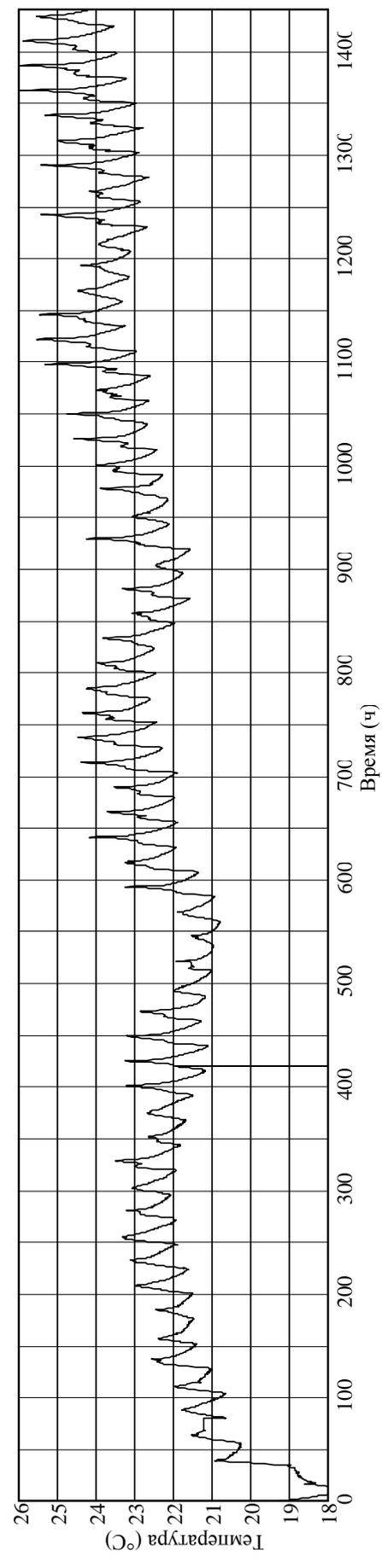


Рисунок 3.5 – Выходной сигнал T_{ind} (°C) модели теплового режима здания

Осуществим идентификацию по каналу $Q_h \rightarrow T_{ind}$. Преобразуем входной сигнал к величине температурного воздействия системы отопления T_h (°C):

$$T_h(t) = \frac{Q_h(t)}{q_h \cdot V}. \quad (3.19)$$

Т.к. входной и выходной сигнал имеют одинаковую размерность, примем коэффициент усиления по каналу $T_h \rightarrow T_{ind}$ равным $K_h = 1$. В результате процедуры идентификации была предложена передаточная функция вида:

$$W_h(p) = \frac{1}{0,9p^3 + 3,375p^2 + 3,65p + 1}. \quad (3.20)$$

По данным *System Identification Toolbox* ожидаемая СКО (RMSE) составит $\sigma = 0,5^\circ\text{C}$. Ошибка моделирования несколько выше по данному каналу в сравнении с каналом $T_{out} \rightarrow T_{ind}$, что объясняется бóльшим влиянием быстрых возмущений на канал $T_h \rightarrow T_{ind}$, имеющий более быструю динамику.

Найдем полюсы передаточной функции:

$$W_h(p) = \frac{1}{(0,75p + 1)(2,4p + 1)(0,5p + 1)}. \quad (3.21)$$

Для удобства обработки в контроллере понизим порядок передаточной функции до $n = 2$, введя звено чистого запаздывания:

$$W_h(p) = \frac{1}{(2,4p + 1)(0,75p + 1)} \cdot e^{-0,5p}. \quad (3.22)$$

Таким образом, $T_{HS1} = 2,4$ ч, $T_{HS2} = 0,75$ ч, $\tau_{dHS} = 0,5$ ч.

В результате выполненных преобразований получены эквивалентные передаточные функции, что подтверждается сохранением характера передаточного процесса: для передаточных функций (3.16) и (3.18) – рисунок 3.6, для передаточных функций (3.20) и (3.22) – рисунок 3.7. На рисунках сплошными линиями показаны исходные передаточные функции, полученные в результате работы *System Identification Toolbox*, пунктирной линией – преобразованные передаточные функции.

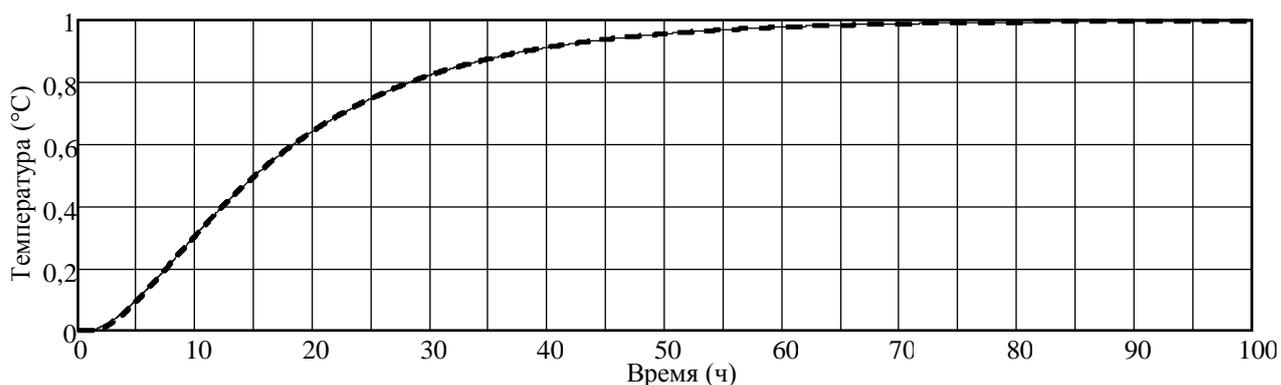


Рисунок 3.6 – Сравнение передаточных функций по каналу медленных процессов

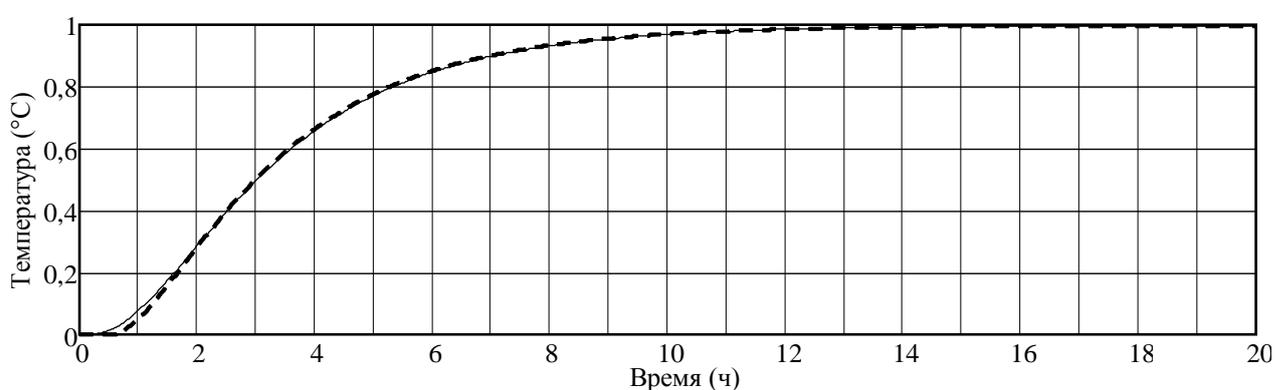


Рисунок 3.7 – Сравнение передаточных функций по каналу быстрых процессов

Осуществим моделирование идентифицированной системы в среде *Vissim* в целях ее верификации. Получим графики реакции системы на изменение входных сигналов отдельно для оператора медленных процессов $W_{T_{out}}$ (рисунок 3.8) и оператора быстрых процессов W_h (рисунок 3.9). На рисунках сплошной линией показан сигнал на входе соответствующего оператора ($W_{T_{out}}$ или W_h), пунктирной линией – сигнал на выходе.

Для исключения влияния ошибки моделирования, вызванной влиянием возмущающих факторов, введем в систему вычисленный с использованием предложенного в главе 2 подхода сигнал обобщенного возмущения Q_z (Рисунок 3.10). На рисунке 3.11 сплошной линией показан измеренный датчиками сигнал T_{ind} , пунктирной линией – сигнал, полученный на выходе идентифицированной модели. Ошибка моделирования показана на рисунке 3.12. Результаты

моделирования показывают соответствие полученной модели объекту моделирования.

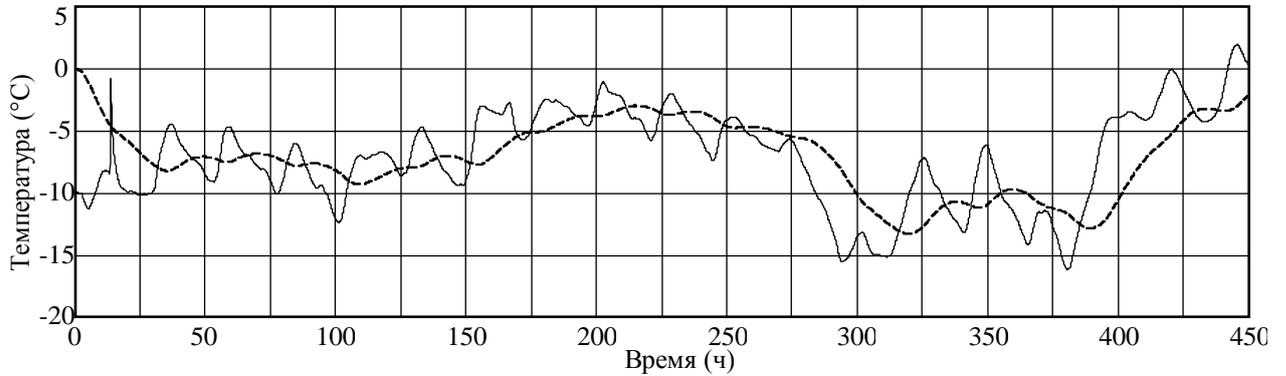


Рисунок 3.8 – Реакция системы по каналу медленных процессов

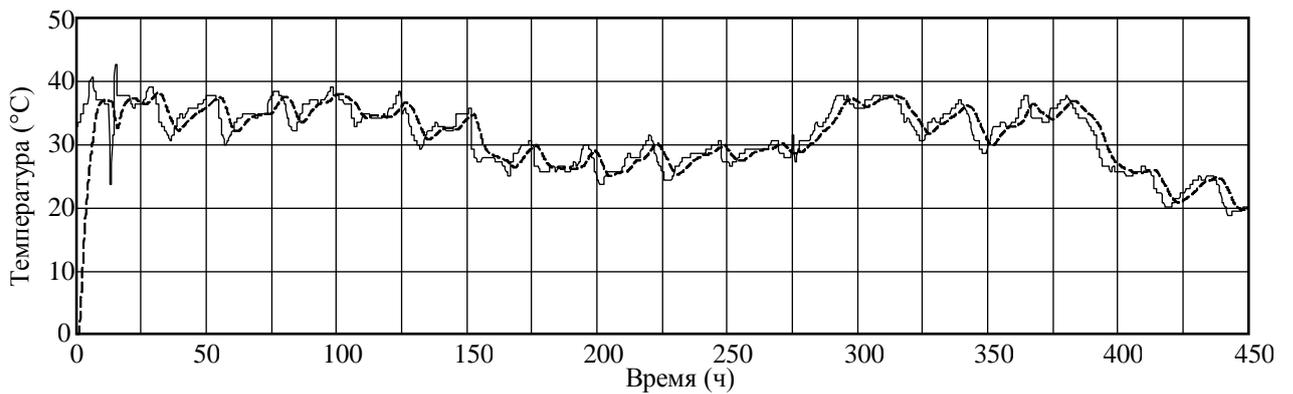


Рисунок 3.9 – Реакция системы по каналу быстрых процессов

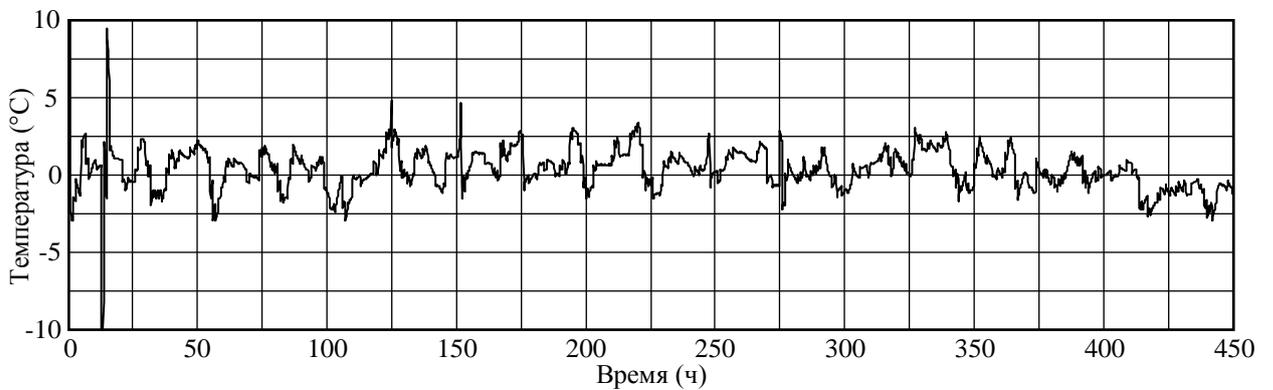


Рисунок 3.10 – Сигнал обобщенного возмущения

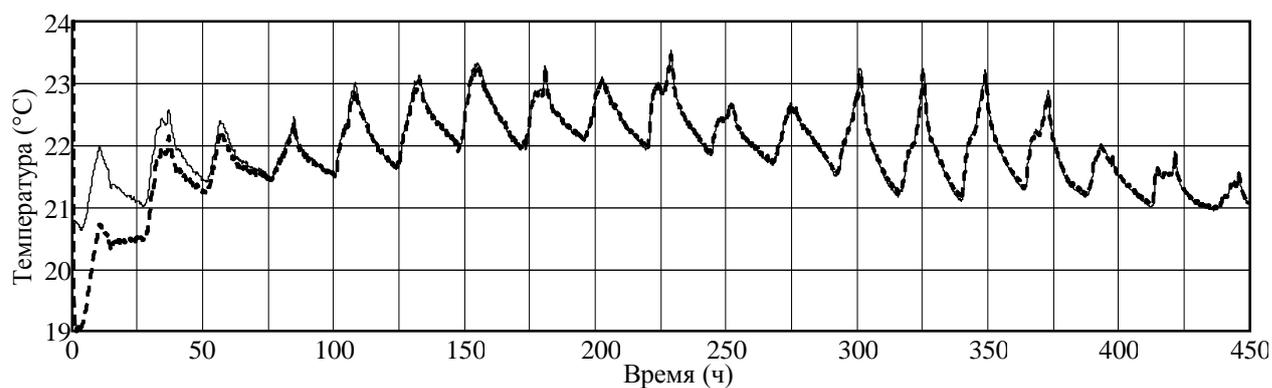


Рисунок 3.11 – Сравнение выхода модели с измеренным сигналом

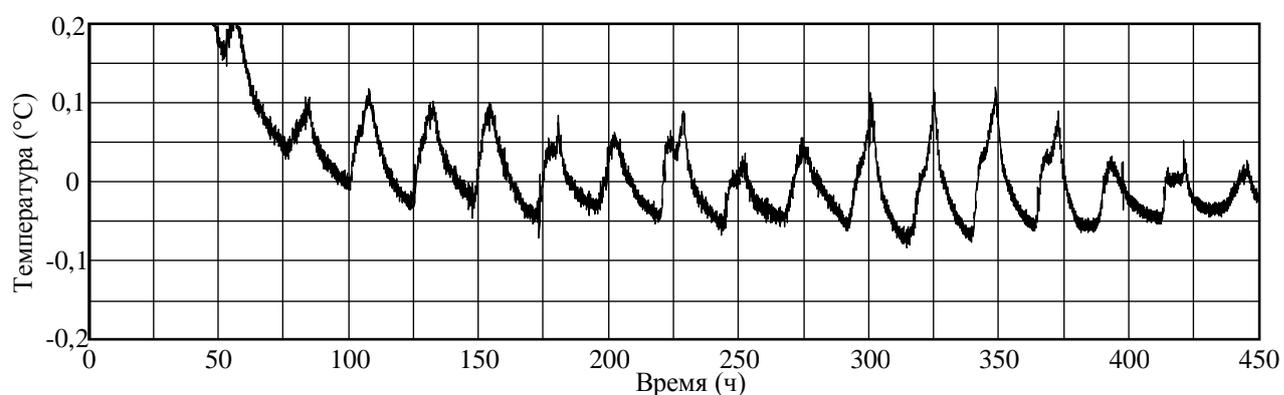


Рисунок 3.12 – Ошибка моделирования

Процедура идентификации была проведена в интерфейсе командной строки прикладного программного пакета *MATLAB*. Указанный программный пакет позволяет осуществить компиляцию алгоритма идентификации в машинный код и его исполнение на контроллере, устанавливаемом в АИТП, в целях дальнейшего практического использования.

3.3. Модель теплогидравлических процессов в тепловом пункте здания

Помимо процессов теплообмена в здании существенное влияние на процесс отопления оказывают состав и режимы работы оборудования теплового пункта здания. В этой связи далее рассмотрим математическую модель теплогидравлических режимов теплового пункта здания.

Тепловой пункт – достаточно сложный технический объект. В нем присутствуют регулирующие устройства (клапаны, насосы) с нелинейными характеристиками, управляющие контроллеры, реализующие определенные алгоритмы управления (как правило, ПИД-регулятор с управляющим воздействием, формируемым по температуре наружного воздуха посредством температурного графика). В частности, подобный тепловой пункт смонтирован в корпусе ЗБВ, на котором проводились исследования.

Тепловой пункт исследуемого здания построен по типовой схеме с насосной группой в подающем трубопроводе, управляющим клапаном в обратном трубопроводе и контуром смешения, оборудованным обратным клапаном для предотвращения прямого перетока из подающего в обратный трубопровод (рисунок 3.13). Система отопления здания вертикальная, имеет верхнюю разводку стояков, с однотрубным присоединением радиаторов.

В основе модели лежит описание теплогидравлических процессов в среде *Vissim* на базе подхода, предложенного в [91]. Модель осуществляет численное решение системы алгебраических уравнений, описывающих гидравлические процессы, происходящие с теплоносителем, и передачу тепловой энергии между теплоносителем и тепловой нагрузкой. Модель представлена совокупностью отдельных функциональных блоков, описывающих типовые элементы системы отопления: труба, задвижка, обратный клапан, насос, тепловая нагрузка и т.д. Каждый функциональный блок содержит в себе все уравнения, описывающие протекающие в нем процессы с заданным приближением. Блоки соединены однонаправленными связями, направление соединения соответствует положительному направлению течения потока (расход $G > 0$). Каждая связь представляет собой вектор из трех элементов: избыточное давление P [Па], массовый расход G [кг/с] и температура T [°C], – характеризующий параметры теплоносителя в соответствующем отрезке трубы. Таким образом, соединения между блоками могут быть ассоциированы с физическим подключением элементов друг к другу.

Модель включает в себя распределенные элементы (трубопроводы, радиаторы отопления). Весь путь движения теплоносителя от входа в распределенный элемент до выхода из него (от 0 до L , где L – длина пути теплоносителя) разбивается на N участков протяженностью dx . При этом полагается, что температура воды в пределах каждого участка постоянна и равна $T(x)$. Это позволяет моделировать транспортное запаздывание, вызванное конечной скоростью движения теплоносителя в трубопроводе.

Основным входным воздействием данной модели является положение штока управляющего клапана $Y, 0...100\%$, получаемое от управляющего контроллера теплового пункта. Выходом модели является тепловая мощность Q_h , передаваемая в помещение здания посредством отопительных приборов.

Рассмотрим модели основных функциональных блоков, построенные в рамках описанной методики.

Тепловой ввод.

Для теплового ввода известно давление в подающем и обратном трубопроводах (P_{1s} и P_{2s} соответственно) и температура подающей воды T_{1s} . Эти параметры определяются характеристиками внешней тепловой сети и, как правило, не зависят от гидравлических параметров схемы, подключенной к тепловому вводу. Неизвестным параметром является расход теплоносителя из теплосети G_{1s} (в подающем трубопроводе). Вычисление величины G_{1s} предлагается осуществлять численным методом Ньютона – Рафсона, который позволяет решать уравнения вида:

$$f(x) = 0 \quad (3.23)$$

с неизвестным x . При этом для одномерного случая алгоритм нахождения численного решения сводится к итерационной процедуре вычисления:

$$x^{[n+1]} = x^{[n]} - \frac{f(x)}{f'(x)} \quad (3.24)$$

до достижения условия (3.23) с допустимой погрешностью.

В качестве критерия решения (3.23) предлагается использовать ошибку давления в обратном трубопроводе:

$$P_{2 \text{ back}} (G_{1s}, P_{1s}) - P_{2s} \rightarrow 0, \quad (3.25)$$

где функция $P_{2 \text{ back}} (G_{1s}, P_{1s})$ означает вычисленное по структуре гидравлической сети, подключенной к тепловому вводу, давление возвращаемого теплоносителя.

При моделировании в среде *Vissim* на схеме тепловой ввод имеет один выход, соответствующий подающему трубопроводу, и один вход, соответствующий обратному трубопроводу. Таким образом, тепловой ввод содержит неизвестную переменную и условие.

Далее в ходе параграфа используются обозначения: $P_{x.in}, P_{x.out}$ – 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 входе и выходе элемента «х», где вместо «х» указывается обозначение конкретного элемента. Введены следующие обозначения элементов: «m» – (от англ. *mixer*) смеситель потока, «s» – (от англ. *splitter*) делитель потока, «v» – (от англ. *valve*) управляющий клапан, «cv» – (от англ. *check valve*) обратный клапан, «p» – (от англ. *pump*) насос, «h» – (от англ. *heater*) эквивалент отопительного прибора. При равенстве давлений, расходов или температур на входе и выходе элемента, используется единое обозначение соответствующей физической величины в данном элементе: P_x, G_x, T_x .

Смещение и деление потоков.

Потоки теплоносителя в системе теплоснабжения здания могут разделяться и смешиваться.

Существует неопределенность деления входящего потока $G_{s.in}$ на два исходящих: $G_{s.out 1}$ и $G_{s.out 2}$. Эта неопределенность не может быть разрешена внутри блока деления потока, так как пропорция деления определяется полными сопротивлениями соответствующих отходящих ветвей, а концепция модели подразумевает однонаправленные связи между блоками. Известно, что

$$G_{s.in} = G_{s.out 1} + G_{s.out 2}, \quad (3.26)$$

тогда

$$\begin{aligned} G_{s.out 1} &= G_{unk}; \\ G_{s.out 2} &= G_{s.in} - G_{s.out 1}, \end{aligned} \quad (3.27)$$

где G_{unk} – искомый неизвестный поток. Вычисление величины G_{unk} предлагается осуществлять численным методом Ньютона – Рафсона, при этом условие ограничения, в отличие от теплового ввода, задается в других блоках.

При смешении двух потоков возникает условие равенства их давлений:

$$P_{m.in 1} = P_{m.in 2} = P_{m.out}. \quad (3.28)$$

Это условие позволяет записать критерий вида (3.23) для определения неизвестного потока G_{unk} из (3.27):

$$P_{m.in 1} - P_{m.in 2} \rightarrow 0 \quad (3.29)$$

при условии $P_{in i} = f(G_{unk})$ для наиболее частого случая, при котором в системе количество элементов деления и смешения потоков равно. Однако в ряде случаев это может не выполняться. Равенство количества искомым переменных и ограничивающих условий может быть обеспечено другими элементами системы, например, дополнительными тепловыми вводами или утечками.

В общем случае в системе может содержаться большое количество элементов деления и смешения потоков. Для многомерного случая метода Ньютона – Рафсона:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; \\ \dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (3.30)$$

алгоритм нахождения численного решения принимает вид:

$$\vec{x}^{[j+1]} = \vec{x}^{[j]} - \lambda_j H^{-1}(\vec{x}^{[j]}) \nabla f(\vec{x}^{[j]}), \quad (3.31)$$

где

$$\lambda_j = \arg \min_{\lambda} f\left(\vec{x}^{[j]} - \lambda_j H^{-1}(\vec{x}^{[j]}) \nabla f(\vec{x}^{[j]})\right), \quad (3.32)$$

$\nabla f(\vec{x})$ – градиент функции $f(\vec{x})$, $H(\vec{x})$ – гессиан функции $f(\vec{x})$. Для оптимизации вычислений используют начальное приближение $H(f(\vec{x}^{[0]}))$ и обновляют его лишь раз в m шагов.

Принимается, что теплопотери на делителе отсутствуют, то есть температура теплоносителя на выходе равна температуре теплоносителя на входе. Таким образом, делитель описывается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} P_s &= P_{s.in} = P_{s.out 1} = P_{s.out 2}; \\ G_{s.out 1} &= G_{unk}; \\ G_{s.out 2} &= G_{s.in} - G_{s.out 1}; \\ T_s &= T_{s.out} = T_{s.in 1} = T_{s.in 2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.33)$$

Если смешиваемые потоки имеют различную температуру, то результирующая температура определяется с учетом их массовых соотношений. Таким образом, смешение двух потоков теплоносителя описывается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} P_m &= P_{m.out} = P_{m.in 1} = P_{m.in 2}; \\ G_m &= G_{m.out} = G_{m.in 1} + G_{m.in 2}; \\ T_{m.out} &= (T_{m.in 1} \cdot G_{m.in 1} + T_{m.in 2} \cdot G_{m.in 2}) / (T_{m.in 1} + T_{m.in 2}). \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

Регулирующий клапан.

В общем виде потери напора на любом гидравлическом участке определяется по формуле:

$$\Delta P = G^2 \cdot \text{sign } G \cdot s, \quad (3.35)$$

где ΔP – разница давлений на входе и выходе участка, G – массовый расход теплоносителя, s – гидравлическое сопротивление. Множитель $\text{sign } G$ введен для учета возможного изменения направления течения потока.

Для моделирования степени открытия клапана вводятся гидравлические сопротивления в открытом и закрытом состояниях s_{open} и s_{close} . При этом фактическое гидравлическое сопротивление регулирующего клапана s_v определяется по закону:

$$s_v = f_v(k) \cdot (s_{\text{open}} - s_{\text{close}}) + s_{\text{close}}, \quad (3.36)$$

где $Y = 0 \dots 1$ – степень открытия клапана, функция $f_v(k)$ задает регулировочную характеристику клапана (характер зависимости гидравлического сопротивления от положения штока). Принимается, что теплопотери на регулирующем клапане отсутствуют, то есть температура теплоносителя на выходе равна температуре теплоносителя на входе. Таким образом, регулирующий клапан описывается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} P_{v.out} &= P_{v.in} - G_v^2 \cdot \text{sign } G_v \cdot (f_v(Y) \cdot (s_{\text{open}} - s_{\text{close}}) + s_{\text{close}}); \\ G_v &= G_{v.out} = G_{v.in}; \\ T_v &= T_{v.out} = T_{v.in}. \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

Обратный клапан.

В общем случае сопротивление s_{cv} обратного клапана уменьшается с увеличением расхода G_{cv} и резко возрастает при уменьшении G_{cv} меньше нуля. Как и для регулирующего клапана принимается, что тепловые потери отсутствуют. Таким образом, обратный клапан описывается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P_{cv.out} &= P_{cv.in} - G_{cv}^2 \cdot \text{sign } G_{cv} \cdot s_{cv}(G_{cv}); \\ G_{cv} &= G_{cv.out} = G_{cv.in}; \\ T_{cv} &= T_{cv.out} = T_{cv.in}. \end{aligned} \right\} \quad (3.38)$$

Насос.

Перепад напора между выходом и входом насоса описывается нелинейной зависимостью вида

$$\Delta P = f_p(G_p) \quad (3.39)$$

где функция $f_{\text{pump}}(G_p)$ задает характеристику насоса, которая приводится в технических данных насоса.

Как и в случае с управляющим клапаном, здесь принимается, что тепловые потери отсутствуют. Таким образом, насос описывается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P_{p.out} &= P_{p.in} - G_p^2 \cdot \text{sign } G_p \cdot s_p(G_p); \\ G_p &= G_{p.out} = G_{p.in}; \\ T_p &= T_{p.out} = T_{p.in}. \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

Эквивалент отопительного прибора.

Тепловая мощность отопительного прибора определяется следующими выражениями:

$$Q_h = \varepsilon_h \cdot c \cdot G_h \cdot (T_{h.in} - T_{ind}); \quad (3.41)$$

$$Q_h = c \cdot G_h \cdot (T_{h.in} - T_{h.out}), \quad (3.42)$$

где ε_h – коэффициент эффективности отопительного прибора, c – удельная теплоемкость теплоносителя, G_h – массовый расход теплоносителя через отопительный прибор [75].

В [75] даны выражения для определения коэффициента эффективности рекуперативных теплообменных аппаратов при условии $c_1 \cdot G_1 > c_2 \cdot G_2$:

– для противоточных аппаратов

$$\varepsilon_h = \frac{1 - e^{-\frac{k_h \cdot F_h}{c_1 \cdot G_1} \left(\frac{c_1 \cdot G_1 - 1}{c_2 \cdot G_2} \right)}}{1 - \frac{c_1 \cdot G_1}{c_2 \cdot G_2} \cdot e^{-\frac{k_h \cdot F_h}{c_1 \cdot G_1} \left(\frac{c_1 \cdot G_1 - 1}{c_2 \cdot G_2} \right)}}, \quad (3.43)$$

– для прямоточных аппаратов

$$\varepsilon_h = \frac{1 - e^{-\frac{k_h \cdot F_h}{c_1 \cdot G_1} \left(\frac{c_1 \cdot G_1 + 1}{c_2 \cdot G_2} \right)}}{1 - \frac{c_1 \cdot G_1}{c_2 \cdot G_2}}, \quad (3.44)$$

где, k_h [Вт/(м²·°С)] – коэффициент теплопередачи отопительного прибора, F_h – площадь теплопередачи отопительного прибора. Для отопительного прибора: c_1 и

G_1 соответствуют удельной теплоемкости и массовому расходу теплоносителя, c_2 и G_2 – удельной теплоемкости и массовому расходу окружающего воздуха.

В работе [58] сделано допущение: для отопительного прибора $c_1 \cdot G_1 \gg c_2 \cdot G_2$, поэтому

$$\frac{c_1 \cdot G_1}{c_2 \cdot G_2} \rightarrow 0. \quad (3.45)$$

Переобозначим для теплоносителя:

$$c_1 \Leftrightarrow c; \quad G_1 \Leftrightarrow G_h, \quad (3.46)$$

При принятии допущения (3.45) оба выражения (3.43) и (3.44) с учетом переобозначения (3.46) могут быть сведены к одному и тому же виду:

$$\varepsilon_h = 1 - e^{-k_h \cdot F_h / (c \cdot G_h)}, \quad (3.47)$$

Приравняем (3.41) и (3.42):, затем

$$T_{h.in} - T_{h.out} = \varepsilon_h \cdot (T_{h.in} - T_{ind}). \quad (3.48)$$

Подставим (3.47) в (3.48) и получим для $T_{h.out}$:

$$T_{h.out} = T_{h.ind} + (T_{h.in} - T_{h.ind}) \cdot e^{-k_h \cdot F_h / (c \cdot G_h)}. \quad (3.49)$$

Следуя [58; 73; 91], выделим бесконечно малый участок площади поверхности отопительного прибора dF_h и составим из (3.41), (3.42) и (3.47) уравнение теплового баланса для участка dF_h :

$$c \cdot G_h \cdot \frac{dT_h}{dF_h} = \frac{1}{dF_h} \cdot \left[c \cdot G_h \cdot (T_h(F_h) - T_{ind}) \cdot \left(1 - e^{-k_h \cdot F_h / (c \cdot G_h)} \right) \right], \quad (3.50)$$

где dT_h – перепад температур теплоносителя на участке dF_h , $T_h(F_h)$ – функция изменения температуры теплоносителя с увеличением площади F_h поверхности отопительного прибора. В результате преобразований получим:

$$c \cdot G_h \cdot \frac{dT_h}{dF_h} = -k_h \cdot (T_h(F_h) - T_{ind}) \cdot e^{-k_h \cdot dF_h / (c \cdot G_h)}. \quad (3.51)$$

Т.к. $dF_h \rightarrow 0$, то $\exp[-k \cdot dF / (c \cdot G)] \rightarrow 1$. Тогда из (3.51) получим уравнение с разделяющимися переменными [58]:

$$-c \cdot G_h \cdot dT_h = -k_h \cdot (T_h(F_h) - T_{ind}) \cdot dF_h. \quad (3.52)$$

Введем условное понятие средней длины окружности пути теплоносителя ℓ , равной отношению площади теплопередачи отопительного прибора к длине пути теплоносителя:

$$\ell = F_h / L_h, \quad (3.53)$$

где L_h – длина пути теплоносителя в отопительном приборе.

Запишем уравнение (3.52) для бесконечно малого участка пути теплоносителя в отопительном приборе $dx = dF / \ell$:

$$-c \cdot G_h \cdot dT_h = -k_h \cdot \ell \cdot (T_h(F_h) - T_{ind}) \cdot dx. \quad (3.54)$$

Таким образом, каждый элементарный объем воды, находящийся в данный момент на участке dx , испытывает теплообмен с окружающей средой, описываемый следующей зависимостью [91]:

$$dT_h = - \frac{k_h \cdot \ell \cdot (T_h(x) - T_{ind}) \cdot dx}{c \cdot G_h}. \quad (3.55)$$

Отсюда получаем дифференциальное уравнение, описывающее закон распределения температуры теплоносителя в отопительном приборе:

$$\frac{dT_h}{dx} = -k_h \cdot \ell \cdot \frac{T_h(x) - T_{ind}}{c \cdot G_h}, \quad (3.56)$$

при решении которого получаем следующую зависимость:

$$T_h(x) = T_{ind} + (T_{h.in} - T_{h.out}) \cdot e^{-\frac{k_h \cdot \ell \cdot x}{c \cdot G_h}} \quad (3.57)$$

Полученное выражение (3.57) аналогично выражению (3.49): температура воды на выходе отопительного прибора $T_{h.out}$ может быть получена подстановкой в эту зависимость вместо x длины пути L_h .

Кроме того, любой отопительный прибор имеет собственное гидравлическое сопротивление s_h , приводящее к падению напора (см. обратный клапан). Таким образом, отопительный прибор (радиатор) описывается следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P_{h.out} &= P_{h.in} - G_h^2 \cdot \text{sign } G_h \cdot s_h(G_h); \\ G_h &= G_{h.out} = G_{h.in}; \\ T_{h.out} &= T_{ind} + (T_{h.in} - T_{h.out}) \cdot e^{-k \cdot F_h / (c \cdot G_h)}. \end{aligned} \right\} \quad (3.58)$$

С использованием перечисленных выше блоков была построена модель теплового пункта. Упрощенная схема теплового пункта представлена на рисунке 3.13. Тепловой пункт имеет трубопровод смешения, защищенный обратным клапаном. Подача теплоносителя регулируется двухходовым регулирующим клапаном, установленном на обратном трубопроводе после байпаса смешения. Циркуляция теплоносителя производится насосной группой в подающем трубопроводе после смешения. Переменные T_{1s} , T_{2s} , P_{1s} , P_{2s} на рисунке соответствуют параметрам сетевой воды (температуры и давления прямой и обратной воды, соответственно). Переменные T_{1h} , T_{2h} , P_{1h} , P_{2h} на рисунке соответствуют параметрам теплоносителя, подаваемого в здание из теплового пункта, с учетом смешения (аналогично, температуры и давления прямой и обратной воды, соответственно).

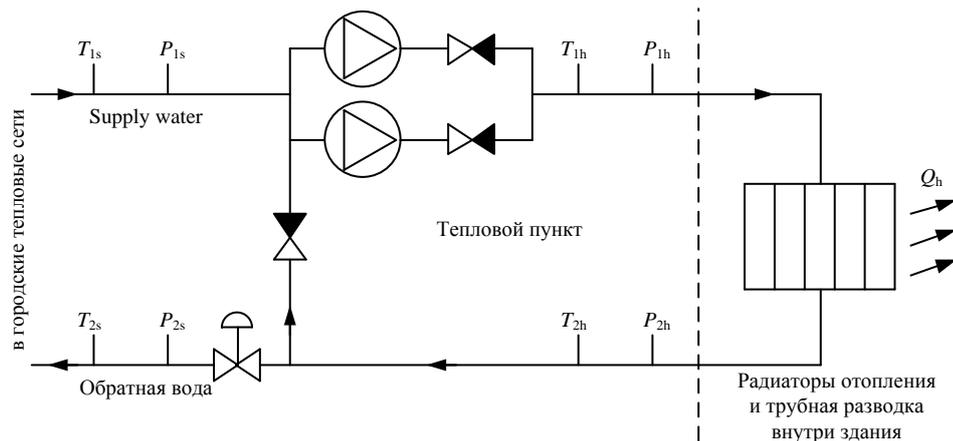


Рисунок 3.13 – Упрощенная схема теплового пункта здания

Динамика исполнительного механизма регулирующего клапана.

Влияние на общую динамику системы оказывает скорость работы исполнительного механизма – привода управляющего клапана. Работа

большинства исполнительных приводов характеризуется постоянной скоростью перемещения штока, что описывается интегральным процессом:

$$\left. \begin{aligned} u \neq 0 &\Rightarrow Y = \int \frac{\text{sign } u}{t_{\text{drv}}} dt ; \quad 0 \leq Y \leq 1 ; \\ u = 0 &\Rightarrow Y = \text{const} , \end{aligned} \right\} \quad (3.59)$$

где u – управляющий сигнал (выход регулятора), t_{drv} – время хода клапана (характеризует время, необходимое для перемещения штока клапана из одного крайнего положения в другое).

Косвенное измерение расхода теплоносителя.

Стандартная формула определения количества теплоты в закрытом контуре [75] (рисунок 3.13):

$$Q = c \cdot G_{\text{ss}} \cdot (T_{1s} - T_{2s}), \quad (3.60)$$

где c – теплоемкость теплоносителя (определяется по справочным данным), G_{ss} – расход теплоносителя (определяется по расходомеру теплосчетчика), T_{1s} и T_{2s} – температура теплоносителя в прямом и обратном трубопроводах, соответственно (определяется соответствующими термодатчиками теплосчетчика). При этом в теплосчетчиках с целью повышения точности измерений, как правило, применяют формулу, учитывающую плотность и энтальпию теплоносителя:

$$Q = \int \left[\frac{G_{1s} \cdot \rho(T_{1s}, P_{1s}) + G_{2s} \cdot \rho(T_{2s}, P_{2s})}{2} \cdot (h(T_{1s}, P_{1s}) - h(T_{2s}, P_{2s})) \right] \cdot dt, \quad (3.61)$$

где $\rho(T_{1s}, P_{1s})$, $\rho(T_{2s}, P_{2s})$ – плотность теплоносителя (сетевой воды) по стандартным справочным данным при текущих значениях температуры и давления в подающем и обратном трубопроводах, $h(T_{1s}, P_{1s})$, $h(T_{2s}, P_{2s})$ – удельная энтальпия теплоносителя по стандартным справочным данным при текущих значениях температуры и давления в подающем и обратном трубопроводах [98], G_{1s} и G_{2s} – расходы теплоносителя в прямом и обратном трубопроводах.

Однако, как показала практика моделирования работы АИТП, в некоторых случаях невозможно получить полный набор фактических данных путем выполнения соответствующих измерений. Например, требуется выделить из

общего теплоснабжения объекта количество тепловой энергии на конкретные нужды: отопление, вентиляцию, приготовление ГВС и т.д. При наличии технологических датчиков температуры и давления после узла смешения на отходящей линии интересующего контура (конкретного вида тепловой нагрузки) расчет потребленной тепловой энергии может быть выполнен с использованием косвенного измерения расхода теплоносителя по перепаду давления. В этом случае расход теплоносителя определяется по формуле:

$$G_h = \sqrt{\frac{P_{1h} - P_{2h}}{s_{hh}}}, \quad (3.62)$$

где P_{1h} and P_{2h} – избыточное давление в прямом и обратном трубопроводах, соответственно (определяется соответствующими датчиками давления теплового пункта), s_{hh} – гидравлическое сопротивление системы отопления. Величина s_{hh} постоянна в системах без индивидуального (порadiaторного) регулирования и может быть определена единожды с использованием мобильного (портативного) расходомера:

$$s_{hh} = \frac{P_{1h} - P_{2h}}{G_h^2}. \quad (3.63)$$

Таким образом, оценка количества потребленной тепловой энергии может быть осуществлена по формуле:

$$Q = c \cdot \sqrt{\frac{P_{1h} - P_{2h}}{s_h}} \cdot (T_{1h} - T_{2h}). \quad (3.64)$$

где T_{1h} и T_{2h} – температура теплоносителя в прямом и обратном трубопроводах соответственно. Заметим, расчет количества теплоты по формуле (3.64) допустим только при постоянном гидравлическом сопротивлении, следовательно, его использование в системах с индивидуальным (поквартирным, порadiaторным) регулированием является некорректным.

В сравнении с методом, основанном на прямом измерении расхода с использованием расходомера, данный метод обеспечивает более низкую точность и не может быть использован для коммерческого учета тепловой энергии, однако он позволяет произвести оценку расхода теплоносителя и количества тепловой

энергии, например, при настройке моделей, регуляторов систем управления, наладке оборудования.

Реализация модели АИТП в среде моделирования *Vissim*.

Структура разработанной модели в среде моделирования *Vissim* представлена на рисунке 3.14. На рисунке показаны: замкнутый контур системы теплоснабжения здания, включающий рассмотренные выше теплогидравлические элементы АИТП здания (тепловой ввод, насос, обратный клапан, смеситель, делитель, регулирующий клапан, привод регулирующего клапана), а также система распределенных трубопроводов здания и эквивалент батареи, совместно моделирующие работу системы отопления. Также на рисунке показаны не относящиеся к теплогидравлической модели элементы: привод регулирующего клапана, регулятор температуры теплоносителя, температурный график отопления, динамическая модель теплового режима здания.

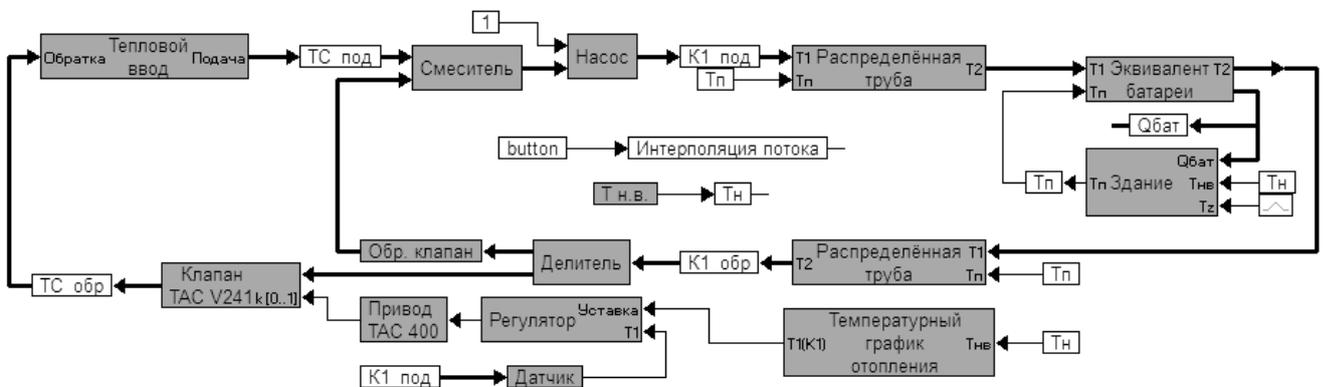
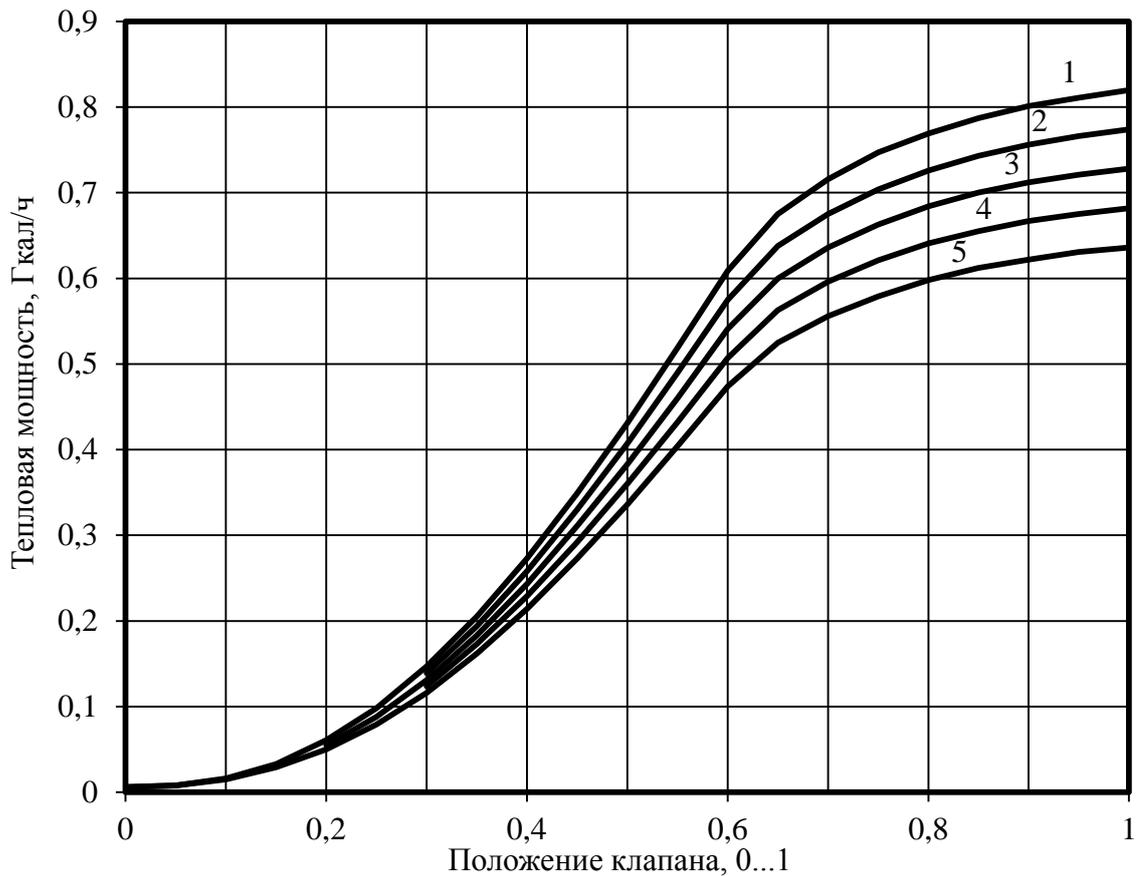


Рисунок 3.14 – Модель ИТП в среде *Vissim*

Семейство статических характеристик $Q_h(Y)$ построенной модели при различных значениях температуры воздуха в помещениях T_{ind} представлена в таблице 3.2 и на рисунке 3.15. Как видно из рисунка, модель имеет нелинейный характер.



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 – $T_{ind} = 15^\circ\text{C}$.

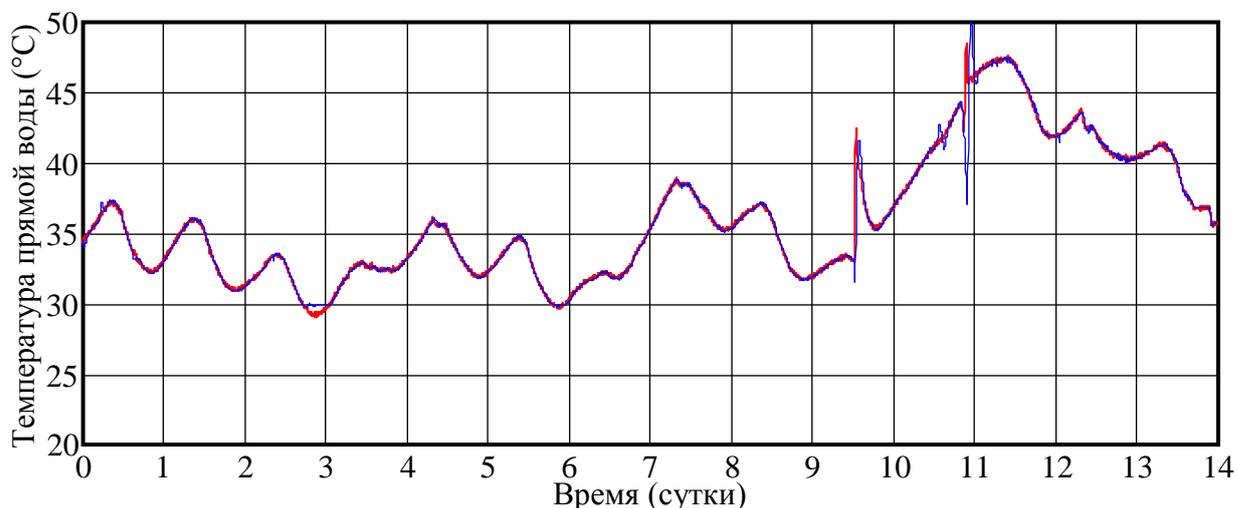
Рисунок 3.15 – Семейство статических характеристик модели АИТП

Работа модели была верифицирована на реальных данных, полученных в ходе эксплуатации АИТП учебно-лабораторного корпуса ЗБВ ЮУрГУ. Результаты верификации представлены далее на рисунках 3.16–3.20 и включают сравнение результатов моделирования на реальных входных сигналах с фактически измеренными сигналами за тот же период.

На рисунках 3.16 и 3.17 показаны временные тренды температур прямой и обратной воды, соответственно. На рисунках 3.18 и 3.19 показаны временные тренды давления теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, соответственно. На рисунке 3.20 представлен временной тренд отдаваемой системой отопления здания тепловой мощности.

Таблица 3.2 – Семейство статических характеристик модели АИТП

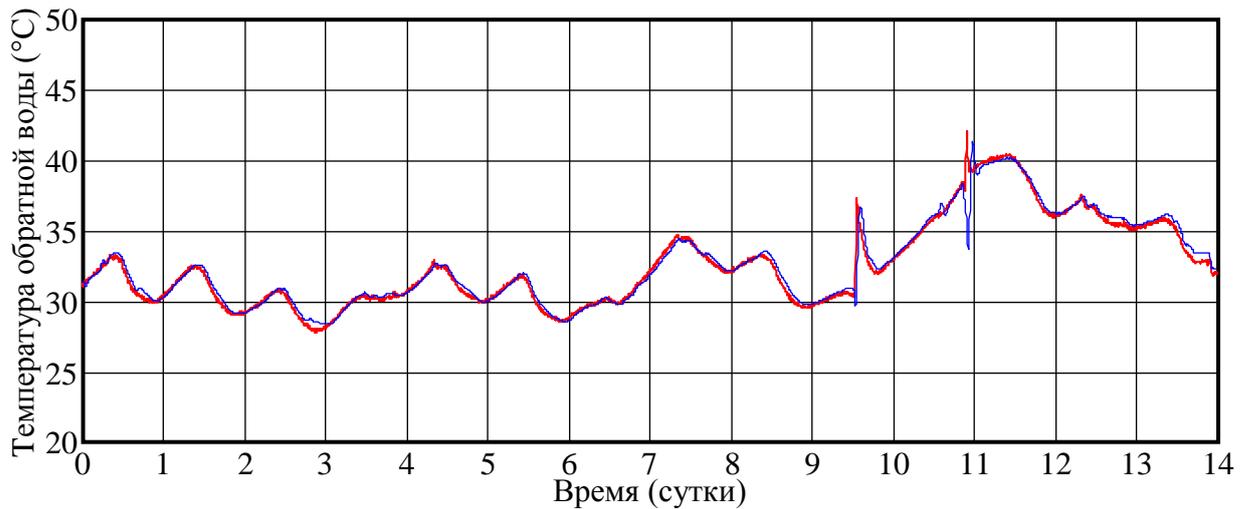
Положение клапана $Y, 0 \dots 1$	Потребляемая тепловая мощность Q , Гкал/ч при температуре воздуха в помещении:				
	$T_{\text{ind}}=15^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ind}}=18^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ind}}=21^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ind}}=24^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ind}}=27^{\circ}\text{C}$
1	0,82	0,774	0,728	0,682	0,636
0,95	0,811	0,766	0,721	0,675	0,631
0,9	0,801	0,756	0,712	0,667	0,622
0,85	0,787	0,743	0,7	0,655	0,612
0,8	0,769	0,726	0,684	0,641	0,598
0,75	0,747	0,704	0,663	0,621	0,579
0,7	0,716	0,675	0,636	0,596	0,556
0,65	0,675	0,638	0,6	0,563	0,525
0,6	0,609	0,575	0,541	0,507	0,474
0,55	0,519	0,49	0,46	0,432	0,404
0,5	0,431	0,407	0,383	0,36	0,336
0,45	0,349	0,33	0,301	0,292	0,273
0,4	0,273	0,258	0,243	0,229	0,214
0,35	0,205	0,194	0,183	0,173	0,162
0,3	0,147	0,139	0,131	0,124	0,116
0,25	0,098	0,093	0,088	0,084	0,079
0,2	0,061	0,058	0,055	0,052	0,05
0,15	0,033	0,032	0,031	0,03	0,029
0,1	0,016	0,016	0,016	0,015	0,015
0,05	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
0	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006



синяя линия – данные с объекта, красная линия – результаты моделирования

$$\sigma_{\text{RMSE}} = 0,32^{\circ}\text{C}, \sigma_{\text{NRMSE}} = 0,62\%$$

Рисунок 3.16 – Временной тренд изменения температуры прямой воды

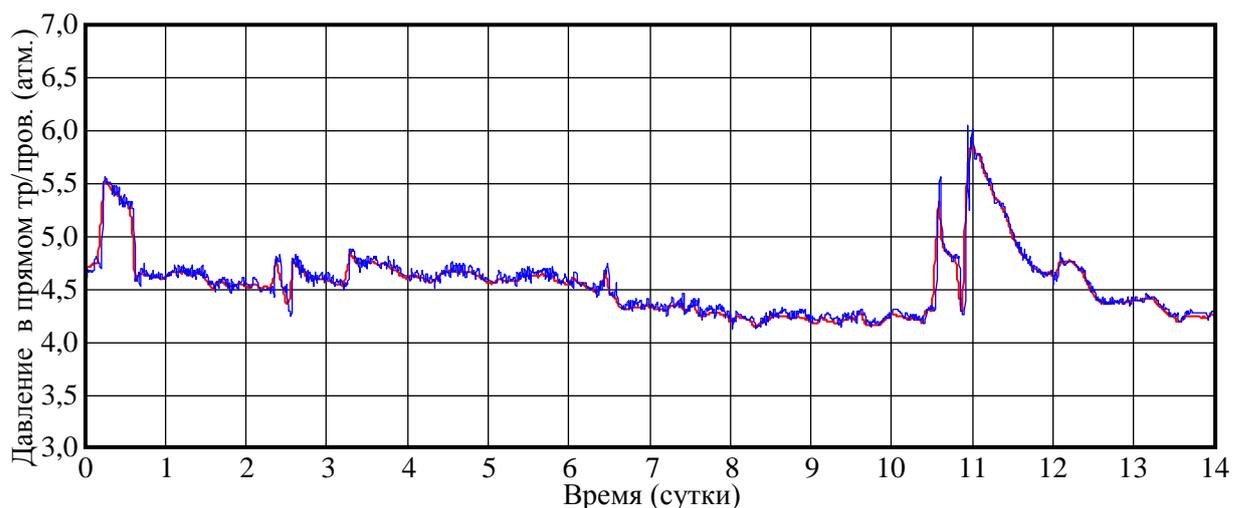


синяя линия – данные с объекта, красная линия – результаты моделирования

$$\sigma_{\text{RMSE}} = 0,32^{\circ}\text{C}, \sigma_{\text{NRMSE}} = 0,76\%$$

Рисунок 3.17 – Временной тренд изменения температуры обратной воды

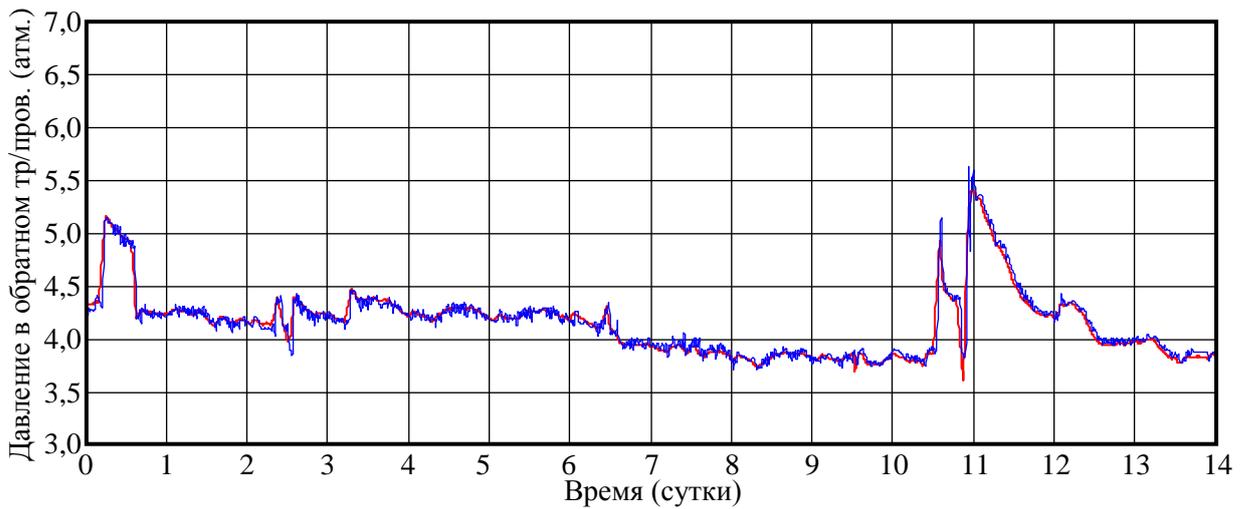
В соответствии с рисунками 3.16 и 3.17 СКО для температур прямой и обратной воды, составляет $\sigma = 0,32^{\circ}\text{C}$. Пиковые значения ошибок (без учета «всплесков» вызванных, техническими проблемами измерения) не превышают 1°C .



синяя линия – данные с объекта, красная линия – результаты моделирования

$$\sigma_{\text{RMSE}} = 0,07 \text{ атм.}, \sigma_{\text{NRMSE}} = 0,12\%$$

Рисунок 3.18 – Временной тренд изменения давления в подающем трубопроводе

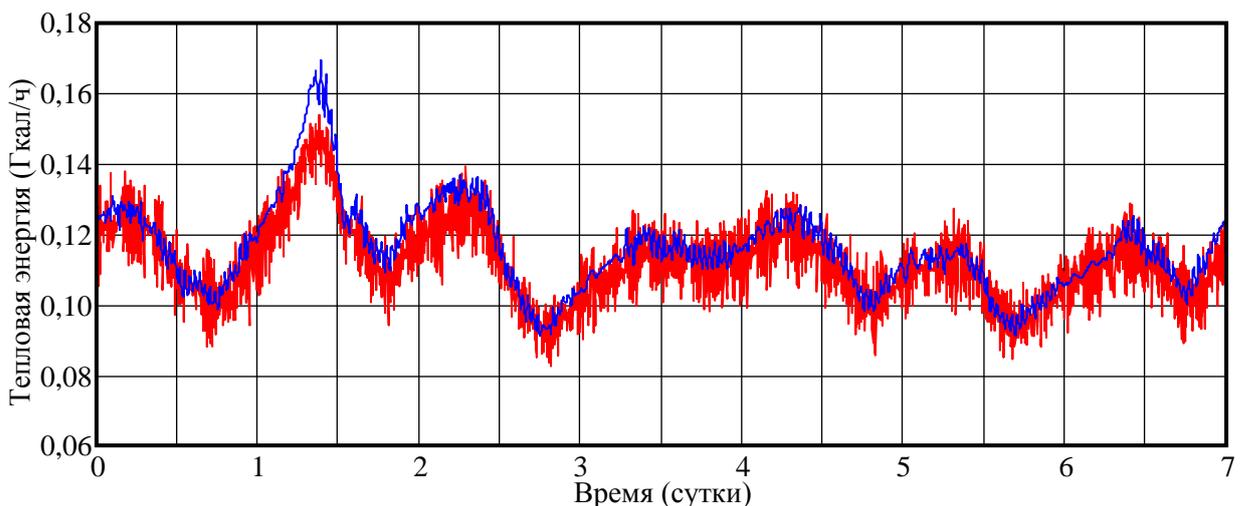


синяя линия – данные с объекта, красная линия – результаты моделирования

$$\sigma_{\text{RMSE}} = 0,069 \text{ атм.}, \sigma_{\text{NRMSE}} = 0,12\%$$

Рисунок 3.19 – Временной тренд изменения давления в обратном трубопроводе

В соответствии с рисунками 3.18 и 3.19 СКО для давления теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, составляет 0,07 атм. и 0,069 атм., соответственно. Пиковые значения ошибок (без учета «всплесков» вызванных, техническими проблемами измерения) не превышают 0,15 атм.



синяя линия – данные с объекта, красная линия – результаты моделирования

$$\sigma_{\text{RMSE}} = 0,0075 \text{ Гкал/ч}$$

Рисунок 3.20 – Временной тренд изменения теплопотребления

Ошибка моделирования по сигналу тепловой мощности существенно зависит от амплитуды суточных и внутрисуточных колебаний потребления тепловой энергии, вызванных влиянием различных возмущений. В показанном на рисунке 3.20 эксперименте ошибка моделирования $\sigma_{\text{RMSE}} = 0,0075$ Гкал/ч, что составляет 4,46%. Максимальная абсолютная ошибка (в пике без учета «всплесков» вызванных, техническими проблемами измерения) не превышает 0,016 Гкал/ч.

Полученная таким образом модель использована в ходе синтеза системы управления тепловым режимом здания: для отработки предложенных методов и алгоритмов и анализа их функционирования. Это позволило быстро и эффективно внедрить систему управления тепловым режимом здания на реальном объекте.

Выводы к главе 3

1. Тепловой режим здания формируется в зависимости от ряда факторов, воздействующих на температуру воздуха в помещении как непосредственно (тепловое излучение солнца через окна, теплопоступление от внутренних бытовых источников здания), так и через конструкции здания (температура наружного воздуха, ветер, тепловое излучение солнца на внешнюю поверхность здания, собственная теплоаккумулирующая способность здания). Влияние указанных выше факторов имеет различную динамику. Для повышения точности моделирования теплового режима здания предложены структуры моделей прямой и обратной динамики теплового режима здания с декомпозицией на быстрые и медленные процессы исходя из скорости их влияния на температуру воздуха в помещениях. В контексте предложенной декомпозиции к медленным процессам относится канал «температура наружного воздуха – температура воздуха в помещениях», к быстрым процессам – канал «тепловая мощность системы отопления – температура воздуха в помещениях» с учетом характеризуемого обобщенным возмущением влияния возмущающих факторов.

2. Произведена параметрическая идентификация модели теплового режима здания. Динамика каналов быстрых и медленных процессов характеризуется соответствующими динамическими операторами. Каждый из операторов представлен последовательным соединением динамического звена второго порядка и звена чистого запаздывания. В ходе процедуры идентификации определены постоянные времени и величины запаздывания для каждого из двух динамических операторов. В ходе процедуры верификации идентифицированной модели определены значения среднеквадратической ошибки моделирования: по каналу быстрых процессов $0,5^{\circ}\text{C}$, по каналу медленных процессов $0,25^{\circ}\text{C}$, – что говорит о достаточно высокой точности предложенной модели и ее соответствии реальному объекту.

3. Помимо процессов теплообмена в здании существенное влияние на процесс отопления оказывают состав и режимы работы оборудования теплового пункта здания. В этой связи в работе предложен подход к синтезу математических моделей теплогидравлических режимов теплового пункта здания. Модель состоит из блоков, соответствующих основным тепло-гидравлическим элементам теплового пункта, учитывает распределенный характер системы отопления здания и наличие элементов (устройств) с нелинейными характеристиками, а также решает задачу неопределенности деления и суммирования потоков теплоносителя.

4. На основе предложенного подхода к синтезу математических моделей теплогидравлических режимов разработана и реализована в программной среде *Vissim* математическая модель автоматизированного теплового пункта 10-ти этажного здания – учебно-лабораторного корпуса ЗБВ ЮУрГУ. Разработанная модель применена в ходе диссертационного исследования для принципиальной отработки и анализа эффективности алгоритмов управления тепловым режимом здания. Верификация модели (сравнение результатов моделирования с фактическими данными эксплуатации здания) показала достаточную точность моделирования для практического применения: СКО по показателю тепловой мощности на отопление составило 4,46%. Применение имитационной модели

позволило минимизировать риски возникновения нештатных и аварийных ситуаций при дальнейшем внедрении разрабатываемой системы управления на реальном объекте.

ГЛАВА 4. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ЗДАНИЯ

4.1. Формирование температурного графика отопления

Важным аспектом качественной работы системы отопления здания является правильная настройка температурного графика отопления. Вопрос определения оптимальных параметров температурного графика достаточно широко изучен в отечественной литературе [6; 33; 34; 52; 75]. С точки зрения теплотехники корректно осуществлять настройку системы «сверху вниз»: температурный график городской тепловой сети формируется исходя из особенностей источников тепловой энергии (ТЭЦ, котельных и т.д.) и климатических особенностей, оборудование конечных потребителей рассчитывается по температурному графику тепловых сетей. Температурный график потребителя (АИТП) для более точного регулирования формируется исходя из особенностей конкретного здания. При этом некоторые авторы отмечают, что определение оптимальных параметров температурного графика относится к числу проблем, для которых трудно получить аналитическое решение [71].

На практике ввиду низкой квалификации обслуживающего персонала температурный график АИТП либо полностью дублирует температурный график тепловых сетей, либо подбирается обслуживающим персоналом интуитивно, что ведет к ухудшению качества регулирования и появлению статических ошибок. Как правило, для предотвращения жалоб со стороны жильцов температурный график АИТП завышается, чтобы во всех помещениях здания гарантированно обеспечить температуру воздуха не ниже установленной нормативными документами, что, однако, ведет к перетопу, необходимости открывать окна для снижения температуры в большей части помещений и, как следствие, увеличению количества потребляемой тепловой энергии. Следует заметить, в некоторых контроллерах АИТП реализован линейный температурный график, задаваемый двумя параметрами (коэффициент наклона и коэффициент смещения), что делает

невозможным задание нелинейных температурных графиков. Решением проблемы в этом случае является модификация программного обеспечения контроллера (для свободно-программируемых контроллеров) или физическая замена контроллера.

Условием правильной настройки температурного графика отопления является соответствие фактических значений результирующей температуры помещений здания и температуры воздуха в помещениях здания нормативным значениям, устанавливаемым ГОСТ 30494-2011 [97].

Результирующая температура помещения $T_{ind.su}$ определяется по формуле:

$$\left. \begin{array}{l} v_{air} < 0,2 \text{ м/с} \Rightarrow T_{ind.su} = (T_{ind} + T_{ind.rad})/2; \\ 0,2 < v_{air} < 0,6 \text{ (м/с)} \Rightarrow T_{ind.su} = 0,6 \cdot T_{ind} + 0,4 \cdot T_{ind.rad} \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

где v_{air} – скорость движения воздуха в помещении, $T_{ind.rad}$ – радиационная температура помещения, определяемая с использованием шарового термометра или по температурам внутренних поверхностей ограждений и отопительных приборов [97]. Ввиду того, что непрерывное измерение $T_{ind.su}$ затруднительно на практике, в работе устанавливаются требования к T_{ind} .

Также заметим, что при стабильном поддержании T_{ind} на требуемом уровне отклонение $T_{ind.rad}$ от требуемых показателей будет вызвано, прежде всего, конструктивными особенностями здания. Решение данной проблемы не лежит в плоскости регулирования отопления: в качестве временной меры возможно введение статической коррекции температурного графика, однако в долгосрочной перспективе требуется проведение энергосберегающих мероприятий.

Ввиду сложности аналитических подходов к синтезу оптимального температурного графика и фактическому отличию объекта от исходных проектных решений было принято решение использовать эмпирический подход, основанный на поиске в истории процесса таких сочетаний $(T_{out}; T_{lh}; T_{ind})$, при которых выполняется условие соответствия температуры воздуха в помещениях диапазону желаемых значений:

$$\forall (T_{out}; T_{lh}; T_{ind}) \text{ при } T_{ind} \in [T_{ind.min}^*; T_{ind.max}^*], \quad (4.2)$$

где $T_{\text{ind.min}}^* = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{ind.max}}^* = 22^\circ\text{C}$ – соответственно, минимальная и максимальная границы диапазона оптимальных значений температуры воздуха в помещениях для отдыха и учебных занятий в соответствии с ГОСТ 30494-2011 [97].

Т.к. до начала исследования на объекте автоматическое регулирование не применялось и контроллер АИТП находился в неисправном состоянии, было принято решение использовать в качестве исходного линейный температурный график тепловых сетей «95/70». По результатам краткосрочной эксплуатации данный график был снижен на 10°C по двум причинам: во первых, фактическая температура теплоносителя, подаваемого с ЦТП (объект «Насосная №2» ЮУрГУ) ниже температурного графика «95/70» на $\approx 5^\circ\text{C}$, во-вторых, имел место перетоп. Ниже представлены линейный температурный график подачи «95/70», сниженный на 10°C , (рисунок 4.1) и соответствующая регулированию по данному графику температура воздуха в помещениях здания при различных значениях температуры наружного воздуха (рисунок 4.2). На рисунке 4.2 пунктирными линиями показаны границы диапазона колебаний температуры воздуха в помещении за рассматриваемый период, сплошной линией – средняя температура. Границы диапазона и средняя температура в помещении определены для ряда значений температур наружного воздуха с дискретностью в 1°C , при этом учитываются значения температуры воздуха в помещениях при фактическом соответствии температуры прямой воды представленному температурному графику с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Полученная эмпирическая зависимость имеет линейный нарастающий тренд (штрих-пунктирная линия на рисунке 4.2), что говорит о необходимости коррекции температурного графика по углу наклона. Кроме того, наблюдается достаточно сильный разброс значений температуры воздуха в помещениях при одной и той же температуре, что означает существенное влияние возмущающих факторов на температуру воздуха в помещении.

С использованием данного графика производилось накопление данных для осуществления его последующей коррекции.

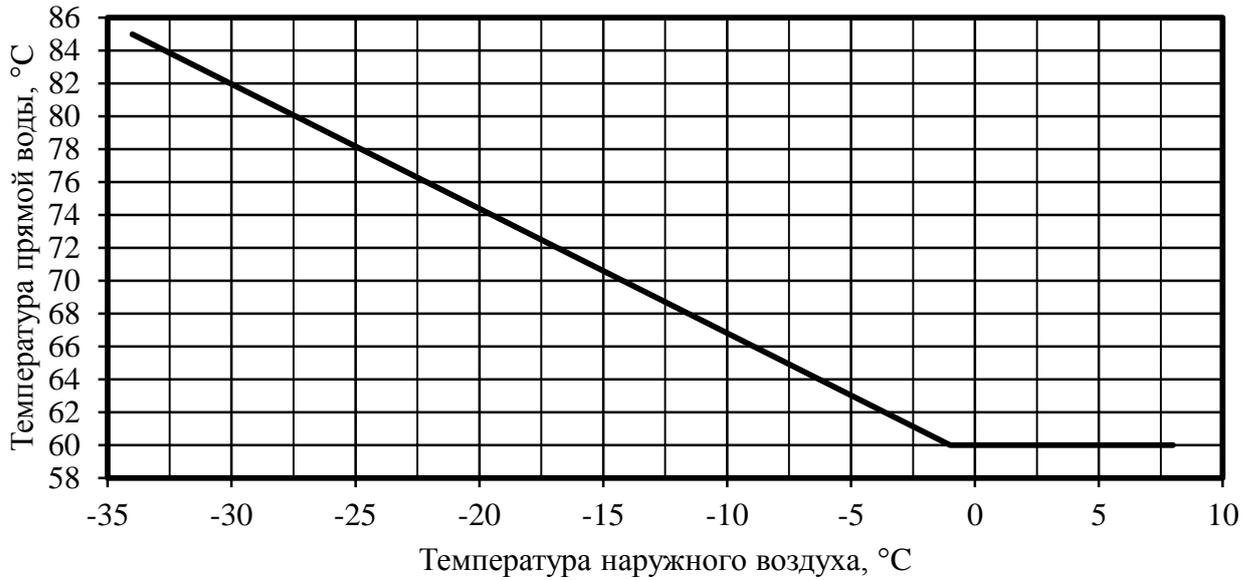
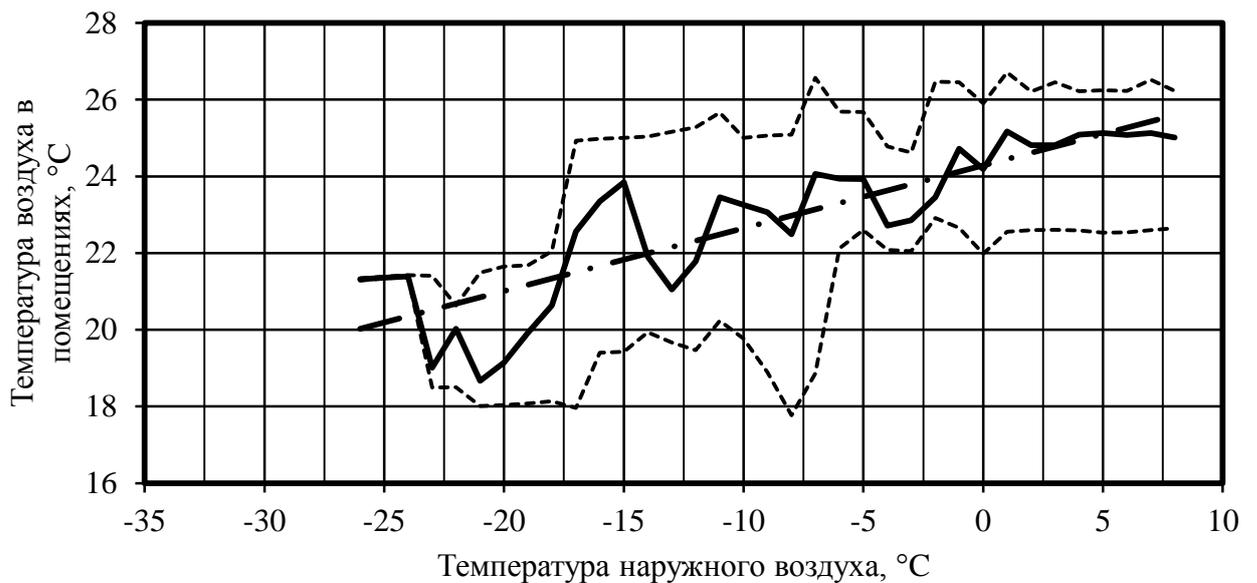


Рисунок 4.1 – Исходный температурный график отопления

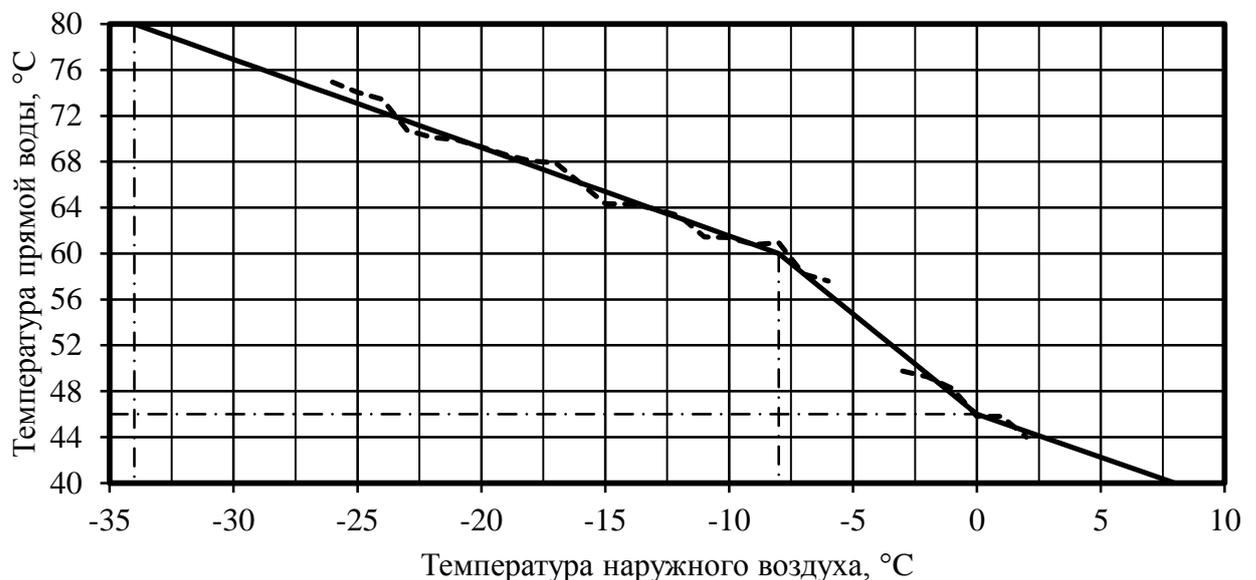


Сплошная линия – средняя температура воздуха в помещениях здания;
 пунктирные линии – границы диапазона колебаний температуры воздуха в помещениях здания;
 штрих-пунктирная линия – линия тренда температуры воздуха в помещениях здания.

Рисунок 4.2 – Температура воздуха в помещении при использовании исходного температурного графика

На рисунке 4.3 пунктирной линией показан откорректированный температурный график, полученный посредством эмпирической выборки.

Полученная линия имеет разрыв в диапазоне $(-6;-2)^{\circ}\text{C}$ ввиду отсутствия соответствующих данных в выборке. Данный график был аппроксимирован кусочно-линейной зависимостью (сплошная линия) с двумя точками излома: при $T_{\text{out}} = -8^{\circ}\text{C}$ и $T_{\text{out}} = 0^{\circ}\text{C}$. Таким образом, полученный график имеет переменный угол наклона. Наличие точек излома и переменный угол наклона объясняются тем, что при околонулевых и положительных температурах нарастает влияние возмущающих факторов, прежде всего, солнечной радиации, т.к. такие температуры приходятся на дневное время суток преимущественно в весенний период, характеризующийся повышенной солнечной активностью.

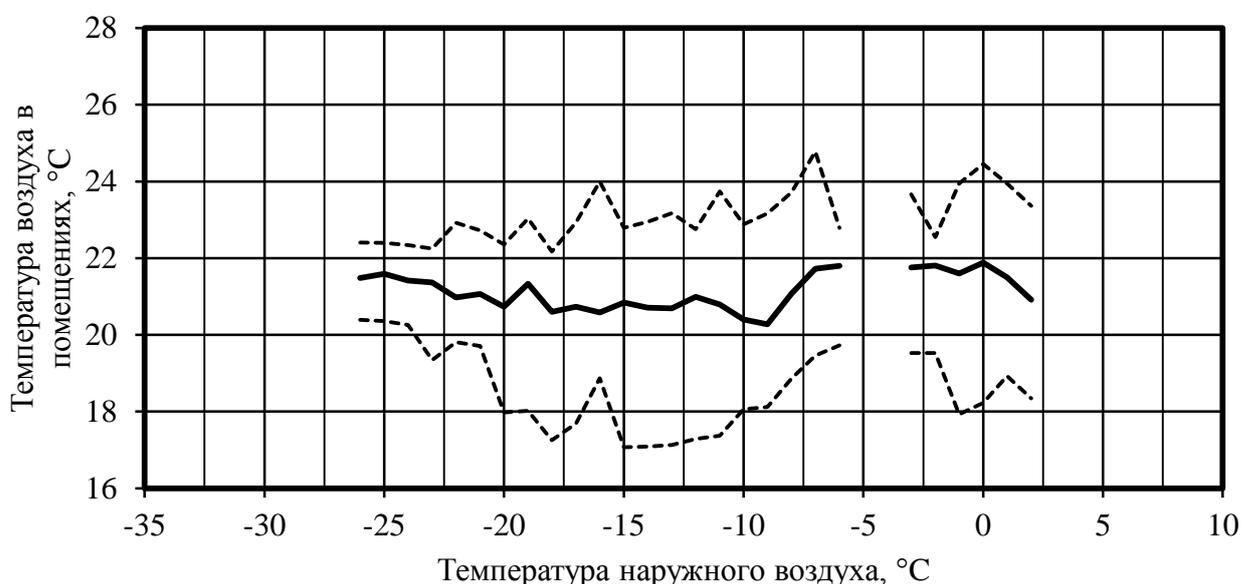


Пунктирные линии – откорректированный посредством эмпирической выборки температурный график; сплошная линия – кусочно-линейная аппроксимация температурного графика.

Рисунок 4.3 – Откорректированный температурный график

На рисунке 4.4 показана температура воздуха в помещениях здания, соответствующая различным температурам наружного воздуха: пунктирными линиями показаны границы диапазона колебаний температуры воздуха в помещении за рассматриваемый период, сплошной линией – средняя температура. Как видно, средняя температура воздуха в помещении находится в диапазоне требуемых температур ($T_{\text{ind.min}}^*; T_{\text{ind.max}}^*$) на всем фактическом диапазоне

температур наружного воздуха, т.е. качество регулирования повысилось, и дальнейшая коррекция температурного графика по углу наклона не требуется. Однако разброс значений температуры воздуха в помещении по-прежнему остается достаточно большим, что говорит о существенной ошибке регулирования в отдельные моменты времени. Это объясняется существенным влиянием возмущающих факторов на объект (см. параграф 1.1), а значит вопрос их компенсации (в частности, на основе методов, описанных в параграфах 2.1 и 2.2) является актуальной задачей. Следует заметить, некорректно настроенный график также можно скомпенсировать использованием предложенного подхода.



Сплошная линия – средняя температура воздуха в помещениях здания;

пунктирные линии – границы диапазона колебаний температуры воздуха в помещениях здания.

Рисунок 4.4 – Температура воздуха в помещении при использовании откорректированного температурного графика

Для реализации приведенного на рисунке 4.3 температурного графика в контроллере АИТП было принято решение запрограммировать кусочно-линейную зависимость, состоящую из 4 точек: $(-34;80)$, $(-8;60)$, $(0;46)$, $(8;40)$. Для выходного значения установлены минимальное и максимальное ограничения:

35°C и 90°C, соответственно. Реализованный таким образом график соответствует графику, изображенному на рисунке 4.3.

4.2. Алгоритм автоматической параметрической идентификации и оптимизации системы отопления

Совершенствование структуры системы управления, моделей объектов управления, законов регулирования безусловно играют важную роль в повышении качества регулирования, однако указанные мероприятия не обеспечивают эффективной работы автоматической системы регулирования (АСР) без оптимальной настройки параметров регуляторов.

Как было отмечено ранее, предложенная система управления тепловым режимом здания ориентирована на массовое внедрение и предполагает максимальную автоматизацию пуско-наладочных работ, что, во-первых, уменьшает временные и трудовые затраты на внедрение, во-вторых, позволяет осуществлять работы по внедрению силами менее квалифицированных специалистов. Оба фактора способствуют снижению стоимости внедрения.

В основе предложенного алгоритма автоматической настройки и идентификации параметров системы отопления лежит критерий параметрической оптимизации АСР.

Критерий параметрической оптимизации промышленных АСР в общем случае формулируется следующим образом: параметры настройки регуляторов должны быть выбраны такими, чтобы в замкнутой АСР был обеспечен заданный запас устойчивости; при этом выбранный показатель качества регулирования должен быть не хуже требуемого (или иметь экстремальное значение). Поскольку в теории автоматического регулирования запас устойчивости может быть оценен по-разному, а также используются различные показатели качества регулирования, в инженерных расчетах применяются различные методы определения оптимальных параметров настройки регуляторов.

К настоящему времени как в России, так и за рубежом, разработано множество различных методов определения оптимальных параметров настроек регуляторов. Среди отечественных исследователей отметим работы Е. П. Стефани [77], Н. И. Давыдова [3, 27], Н. Д. Александровой [3], С. И. Новикова [53], А. П. Копеловича [41], Б. Я. Жихарева [28], В. Я. Ротача [65, 66], А. С. Ключева [40], среди иностранных – методы Циглера–Никольса (Ziegler–Nichols), Чьена–Хронеса–Резвика (Chien–Hrones–Reswic), Коэна–Куна (Cohen–Coon), Тиреуса–Луибена (Tureus–Lueben) [99].

В наборы типовых алгоритмов имеющихся на рынке контроллеров включают ПИД-регуляторы с автоматической настройкой, как правило, реализующие экспериментальные методы определения оптимальных параметров настроек (ОПН) регуляторов. Общим достоинством экспериментальных методов является отсутствие необходимости определения динамических характеристик объекта регулирования, как следствие, достигаются одновременно простота и универсальность алгоритма автонастройки. Однако данное преимущество в конкретном случае нивелируется необходимостью определения динамических характеристик здания для настройки параметров модели. Как правило, в алгоритмах автонастройки используют метод Циглера–Никольса и его различные вариации (в том числе «метод раскачки», предложенный В. Ф. Кузициным, А. И. Зверьковым, В. Я. Ротачем [66]). Недостатком указанной группы методов является необходимость выведения системы на границу устойчивости и высокая опасность заморозки системы при тестировании на малых значениях коэффициента усиления. Другие методы, такие как шаговый метод А. Д. Неймана, требуют проведения большого количества итераций эксперимента и хранения их результатов, а также более сложной аналитической обработки результатов экспериментов, что существенно ограничивает их применение в условиях ограниченности вычислительных ресурсов промышленных контроллеров.

Другая группа методов определения ОПН регуляторов – приближенные методы определения ОПН с использованием формул и номограмм. Существует достаточно большое количество методов приближенного определения ОПН. В

отечественной практике широкое распространение получил метод расчета ОПН по формулам ВТИ, использующий данные кривых разгона и обеспечивающий степень колебательности $\psi = 0,75$ для объекта с самовыравниванием [40]. Данный метод позволяет настраивать П-, ПИ-, ПИД-регуляторы. Популярный отечественный метод, основанный на номограммах [40], позволяет производить параметрическую оптимизацию объектов первого и второго порядков с запаздыванием. С использованием данного метода возможно настроить ПИ- и ПИД-регуляторы и получить систему со степенью колебательности $\psi = 0,75 \dots 1$ в зависимости от выбранных номограмм. Среди других применяемых на практике методов – эмпирические формулы Коэна – Куна (Cohen – Coon) для колебательных объектов, зависимости Чьена–Хронеса–Резвика (Chien–Hrones–Reswic) для уставок и возмущений, иные эмпирические зависимости, предложенные различными разработчиками систем управления. Сравнительный обзор методов параметрической оптимизации АСР приведен в [13; 53; 110].

Объект регулирования относится к классу систем регулирования температуры и проявляет инерционные свойства. Для объектов данного класса при реакции на ступенчатое изменение управляющего воздействия характерно уменьшение угла наклона переходной характеристики по мере приближения к установившемуся значению [146], т.е. свойство самовыравнивания. Регуляторы подобных объектов обычно настраиваются на оптимум по модулю, что придает системе свойства фильтра Баттерворта. Тем самым обеспечивается малое перерегулирование (не более 5%) и хороший запас устойчивости по фазе (около 63°) [50].

С учетом недостатков рассмотренных типовых решений был предложен подход, который позволяет осуществить идентификацию параметров модели объекта регулирования (здания) и, одновременно, настройку регуляторов. Использованный подход основан на аналитическом методе параметрической идентификации системы и подразумевает оценку динамических характеристик объекта регулирования по виду переходного процесса. Определение коэффициентов регулятора осуществляется на основе полученных динамических

характеристик объекта регулирования с использованием номограмм [40; 53], аппроксимированных кусочно-линейными функциями для записи в контроллер. Использование номограмм обеспечивает высокую точность настройки ($\pm 10\%$), за счет учета нелинейностей.

В большинстве случаев для целей настройки регулятора объекта с инерционными свойствами достаточно представления объекта в виде апериодического звена первого порядка [146]. Аппроксимируем динамический оператор (2.4) объекта управления апериодическим звеном с чистым запаздыванием:

$$F_{\text{obj.at}}(p) = \frac{K_{\text{obj}}}{1 + T_{\text{obj}}p} \cdot e^{-p\tau_d}, \quad (4.3)$$

где K_{obj} – коэффициент усиления объекта, T_{obj} – постоянная времени объекта.

Величина K_{obj} определяется по статической характеристике объекта как отношение разностей величин входных и выходных сигналов в двух установившихся режимах:

$$K_{\text{obj}} = \frac{x_1(y_1) - x_2(y_2)}{y_1 - y_2}, \quad (4.4)$$

где $x_1(y_1)$, $x_2(y_2)$ – выходной сигнал объекта, y_1 , y_2 – входное воздействие на объект, при этом в точках $(x_1; y_1)$ и $(x_2; y_2)$ объект должен находиться в установившемся режиме.

Т.к. объект является нелинейным, требуется определение границы активного регулирования, в пределах которого зависимость $x(y)$ является существенной. Точки y_1 , y_2 рекомендуется выбирать внутри диапазона активного регулирования вблизи его границ:

$$y_1 = y_{\text{act.min}} + k_{\text{offset}} \cdot (y_{\text{act.max}} - y_{\text{act.min}}), \quad (4.5)$$

$$y_2 = y_{\text{act.max}} - k_{\text{offset}} \cdot (y_{\text{act.max}} - y_{\text{act.min}}), \quad (4.6)$$

Где $y_{\text{act.min}}$, $y_{\text{act.max}}$ – нижняя и верхняя границы диапазона активного регулирования, соответственно, k_{offset} – смещение от границы внутрь диапазона. Выбор y_1 , y_2

максимально близко к границам диапазона активного регулирования повышает точность определения K_{obj} , однако вблизи границ проявляются нелинейности.

Величина T_{obj} определяется по переходной характеристике по углу наклона касательной к точке перегиба переходной функции (рисунок 4.5). Точка перегиба $C_{flex}(y_{flex}; t_{flex})$ определяется в точке перехода через 0 второй производной от выхода объекта.

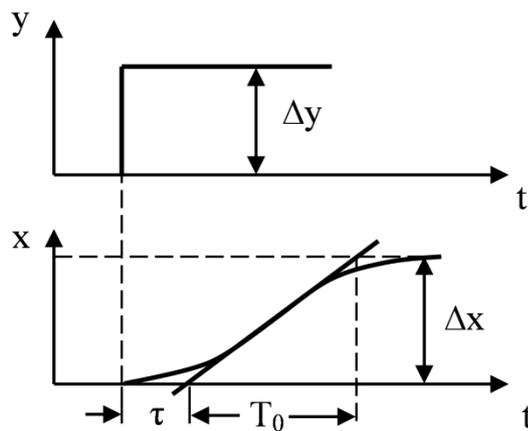


Рисунок 4.5 – Типовая реакция объекта на ступенчатое входное воздействие

После завершения этапа грубой настройки возможно проведение точной настройки шаговым методом в пределах погрешности номограмм $\pm 10\%$.

Предложенный подход позволяет в условиях реальной эксплуатации путем проведения ряда автоматизированных экспериментов безопасно для объекта и с приемлемой точностью определить основные параметры объекта и коэффициенты регуляторов.

4.3. Порядок настройки системы управления тепловым режимом здания

Важным аспектом качественной работы системы автоматического управления является правильная настройка всех ее компонентов. Настройка происходит по следующему алгоритму:

Этап I. Идентификация контура отопления и настройка ПИД-регулятора базового контура. Целью данного этапа является поиск оптимальных параметров (параметрическая идентификация) регулятора базового контура управления по температуре наружного воздуха. Осуществляется в соответствии с методикой, описанной в параграфе 4.2. Продолжительность этапа определяется динамикой системы отопления и может занимать до нескольких часов. В результате выполнения данного этапа определяется быстродействие системы отопления здания и производится нахождение коэффициентов ПИД-регулятора температуры прямой воды отопления, входящего в состав базового контура регулирования. В результате настройки регулятора были приняты коэффициенты: $K_p = 2,8$; $T_i = 78,4$ с; $K_d = 0$.

После выполнения Этапа I производится запуск контура базового регулирования.

Этап II. Оптимизация температурного графика системы отопления. Целью данного этапа является формирование оптимального температурного графика подачи теплоносителя в контур отопления здания. Осуществляется в соответствии с методикой, описанной в параграфе 4.1. Продолжительность этапа может быть различной и определяется периодом накопления истории процесса для эмпирической оптимизации температурного графика. До начала выполнения данного этапа необходимо ввести параметры базового температурного графика, например, температурного графика тепловых сетей. В результате выполнения данного этапа определяются пары значений $(T_{out}; T_{ih})$, составляющих точки кусочно-линейной зависимости – температурного графика подачи теплоносителя в систему отопления здания. Полученный таким образом график представлен на рисунке 4.3.

Этап III. Идентификация модели теплового режима здания. Целью данного этапа является параметрическая идентификация модели теплового режима здания, на базе которой формируется используемая в корректирующем контуре

упреждающего управления модель обратной динамики теплового режима здания. Осуществляется в соответствии с методикой, предложенной в параграфе 3.2. Продолжительность этапа – несколько суток. В результате выполнения данного этапа определяются параметры модели теплового режима здания:

– по каналу $T_{\text{out}} \rightarrow T_{\text{ind}}$ для медленных процессов (оператор $W_{T_{\text{out}}}$) – постоянные времени T_{LS1} , T_{LS2} , а также величина запаздывания τ_{dLS} ;

– по каналу $Q_{\text{h}} \rightarrow T_{\text{ind}}$ для быстрых процессов (оператор W_{h}) – постоянные времени T_{HS1} , T_{HS2} , а также величина запаздывания τ_{dHS} .

Для рассматриваемого здания – учебно-лабораторного корпуса ЗБВ ЮУрГУ – были определены: $T_{\text{LS1}} = 14$ ч, $T_{\text{LS2}} = 4$ ч, $\tau_{\text{dLS}} = 1$ ч, $T_{\text{HS1}} = 2,4$ ч, $T_{\text{HS2}} = 0,75$ ч, $\tau_{\text{dHS}} = 0,5$ ч (см. параграф 3.2).

Этап IV. Настройка модели обратной динамики в соответствии с моделью теплового режима здания. Целью данного этапа является настройка экспоненциального фильтра в составе модели обратной динамики.

Структура модели обратной динамики теплового режима здания представлена на рисунке 3.3. Данная модель содержит динамический оператор $W_{T_{\text{out}}}$, идентичный оператору $W_{T_{\text{out}}}$ в прямой модели, а также оператор W_{h}^{-1} , обратный оператору W_{h} в прямой модели. Динамические параметры (запаздывания, коэффициенты передаточных функций) данных операторов равны соответствующим коэффициентам прямой модели теплового режима здания и были определены на предыдущем этапе. В ходе данного этапа требуется определить оптимальную постоянную времени экспоненциального фильтра T_{EF} . В параграфе 2.4 была исследована зависимость ошибки обращения динамического оператора от отношения постоянной времени фильтра к постоянной времени обращаемого оператора (рисунок 2.40). Исследования показали, что зависимость ошибки обращения динамического оператора от отношения постоянной времени фильтра к постоянной времени обращаемого оператора имеет точку минимума, зависящую от шага моделирования, при этом не наблюдается существенной корреляции положения оптимума (точки минимальной ошибки) с абсолютными

значениями постоянной времени обрабатываемого оператора. С использованием полученной серии экспериментальных зависимостей происходит грубое определение постоянной времени фильтра (по точке минимума на графике для данного шага моделирования). Затем с помощью поискового алгоритма осуществляется точная настройка постоянной времени фильтра, направленная на минимизацию среднеквадратичной ошибки обращения динамического оператора.

Грубая настройка экспоненциального фильтра производится по заранее запрограммированным зависимостям. Работа поискового алгоритма в ходе точной настройки экспоненциального фильтра осуществляется с использованием технологических данных, полученных в ходе Этапа II, при этом оптимальное значение T_{EF} определяется по минимуму ошибки для серии значений T_{EF} в окрестностях точки, определенной в ходе этапа грубой настройки. Таким образом, на выполнение данного этапа не требуется существенных затрат времени. В результате выполнения данного этапа определяется постоянная времени экспоненциального фильтра T_{EF} , в результате чего возможно выполнять идентификацию параметров q_h и $Q_z(t)$ в реальном времени.

Для исследуемого объекта – учебно-лабораторного корпуса ЗБВ ЮУрГУ – был выбран шаг моделирования $t_k - t_{k-1} = 15$ с, что соответствует $1,74 \cdot 10^{-3} \cdot T_{HS1}$. Для данного шага моделирования оптимальным значением постоянной времени фильтра выбрано $T_{EF} = 7 \cdot 10^{-3} \cdot T_{HS1}$, что соответствует $T_{EF} = 60$ с.

Этап V. Настройка ПИД-регулятора контура компенсации. Целью данного этапа является поиск оптимальных параметров (параметрическая идентификация) регулятора корректирующего контура компенсации возмущений. Осуществляется в соответствии с методикой, описанной в параграфе 4.2, аналогично Этапу I. Продолжительность этапа определяется динамикой теплового режима здания и может занимать от нескольких суток до 1,5 недель. В результате выполнения данного этапа определяется динамика теплового режима здания и производится нахождение коэффициентов ПИД-регулятора корректирующего контура компенсации возмущений. В результате настройки для корректирующего контура

был выбран ПИ-регулятор с коэффициентом $K_{\text{п}} = 2,01$. Динамическая составляющая объекта компенсируется модельно-упреждающей оценкой в составе обратной связи. Для исключения статической ошибки была введена интегральная составляющая $T_{\text{и}} = 3 \cdot T_{\text{и.опт}}$, где $T_{\text{и.опт}} = 4$ ч – значение интегральной составляющей, полученной с использованием описанного в параграфе 4.2 метода. Таким образом, окончательное значение $T_{\text{и}} = 43200$ с.

Выполнение всех этапов настройки осуществляется в полностью автоматическом режиме без участия человека и требует минимальной квалификации обслуживающего персонала. Это является важным преимуществом для массового внедрения предложенного подхода к управлению

Полный цикл автоматической настройки, состоящий из 5 этапов, занимает от нескольких дней до 1 месяца, в зависимости от динамических характеристик здания и доступных для идентификации данных. Подключение контуров регулирования и отдельных составляющих модели производится после выполнения соответствующих этапов. При необходимости возможно ускорить выполнение цикла, выполнив отдельные этапы вручную, например, при наличии заранее известных значений отдельных или всех необходимых параметров.

Выводы к главе 4

1. Для оптимизации температуры теплоносителя по критерию минимума отклонения температуры воздуха в помещениях от установленного предела предложен подход к формированию эффективного температурного графика, основанный на анализе истории процесса, накапливаемого за тестовый период и период эксплуатации. В результате кусочно-линейной аппроксимации полученного эффективного графика сформирован температурный график с двумя изломами, учитывающими повышенный уровень солнечной радиации в период начала и окончания отопительного периода. Произведена верификация данного температурного графика, которая показала повышение точности регулирования

температуры воздуха в помещении и устранение статической ошибки при анализе усредненных за рассматриваемый период значений температуры воздуха в помещении, что подтверждает на практике возможность применения данного подхода. При этом сохраняется достаточно большой разброс значений температур воздуха в помещении в отдельные моменты времени, что указывает на существенное влияние на температуру воздуха в помещении различных возмущающих факторов, которые необходимо компенсировать соответствующим управляющим воздействием.

2. Предложен двухэтапный подход к определению коэффициентов ПИД-регуляторов в рамках предложенной системы управления отоплением, основанный на аналитическом методе параметрической идентификации системы и подразумевающий оценку динамических характеристик объекта регулирования по виду переходного процесса с последующей подстройкой поисковым методом. При этом на первом этапе осуществляется определение коэффициентов регулятора на основе полученных динамических характеристик объекта регулирования с использованием аппроксимированных кусочно-линейными функциями номограмм, на втором этапе осуществляется подстройка коэффициентов с использованием итерационного поискового метода.

3. Предложен алгоритм автоматической настройки системы модельно-упреждающего управления, включающий настройку ПИД-регулятора базового контура, формирование эффективного температурного графика системы отопления, идентификацию модели теплового режима здания, определение постоянной времени экспоненциального фильтра обратного динамического оператора в составе модели обратной динамики теплового режима здания, настройку ПИД-регулятора контура компенсации. Предложенный алгоритм позволяет осуществить настройку модельно-упреждающего контроллера, включая настройку всех моделей и регуляторов, без участия человека, что является значимым преимуществом в условиях массового внедрения.

ГЛАВА 5. ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ЗДАНИЯ

5.1. Общая структура комплекса технических средств

Как уже отмечалось ранее, результаты настоящего диссертационного исследования реализованы на практике как система управления тепловым режимом учебно-лабораторного корпуса 3БВ ЮУрГУ [106]. Структурная схема системы управления представлена на рисунке 5.1. Система является открытой, осуществляет двусторонний обмен данными с Автоматизированной управляющей информационно-измерительной системой тепло-, водо-, электроснабжения и наружного освещения комплекса зданий (АУИИС) ЮУрГУ.

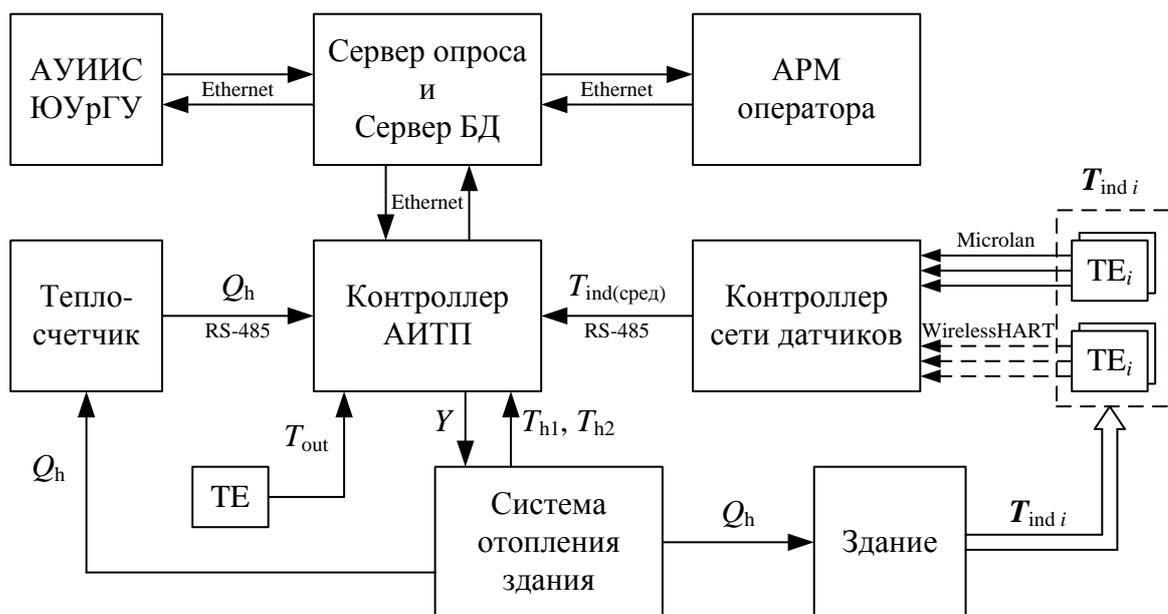


Рисунок 5.1 – Структурная схема системы управления тепловым режимом корпуса 3БВ ЮУрГУ

Структурно система может быть разделена на следующие составляющие:

1. Верхний уровень – SCADA-система. Осуществляет хранение основных параметров и настроек системы и временных трендов технологического процесса,

предоставление АРМ для удаленного мониторинга и диспетчерского управления, интеграцию с АУИИС ЮУрГУ.

2. Нижний уровень – АИТП здания. На контроллере АИТП реализовано алгоритмическое обеспечение системы управления подачей тепла в здание, включающее алгоритмы погодного регулирования (базовый канал управления) и алгоритм компенсации тепловой инерции здания и действующих на него быстропеременных возмущений (корректирующий контур). Теплосчетчик, установленный в АИТП, осуществляет учет потребляемого зданием тепла.

3. Система контроля температуры воздуха в помещениях здания. Включает в себя сеть проводных и беспроводных интеллектуальных датчиков температуры внутреннего воздуха.

Элементы системы объединены информационными связями. Текущее значение T_{out} поступает с датчика температуры наружного воздуха, подключенного к контроллеру, текущие значения Q_h и T_{ind} – по интерфейсу *Modbus* (RS-485) от теплосчетчика и контроллера распределенной сети датчиков соответственно. Управляющее воздействие, формируемое контроллером – положение штока регулирующего клапана Y – передается посредством привода клапана на регулирующий клапан. Контроллер получает от аналоговых датчиков в АИТП данные основных параметров циркулирующего в системе теплоносителя: T_{1h} , T_{2h} , P_{1h} , P_{2h} . Циркулирующий в системе отопления теплоноситель отдает зданию тепловую энергию Q_h . Настройки и уставки, задаваемые оператором, передаются контроллеру с верхнего уровня по протоколу *Modbus-TCP* (Ethernet).

5.2. Организация пользовательского интерфейса SCADA-системы и хранение данных

Верхний уровень системы реализован на базе программно-технического комплекса (ПТК) «ПолиТЭР». ПТК «ПолиТЭР» и входящее в его состав специализированное программное обеспечение «Автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ) «ПолиТЭР» предназначены для

автоматизации комплексов программно-технических средств диспетчерского контроля и управления инженерными системами тепло-, водо-, электроснабжения, вентиляции и освещения в жилищно-коммунальном хозяйстве и промышленности, а также технологическими процессами производства. ПТК «ПолиТЭР» является средством измерений утвержденного типа (номер в гос. реестре средств измерений 53530-13). Обобщенная структура ПТК «ПолиТЭР» представлена на рисунке 5.2.

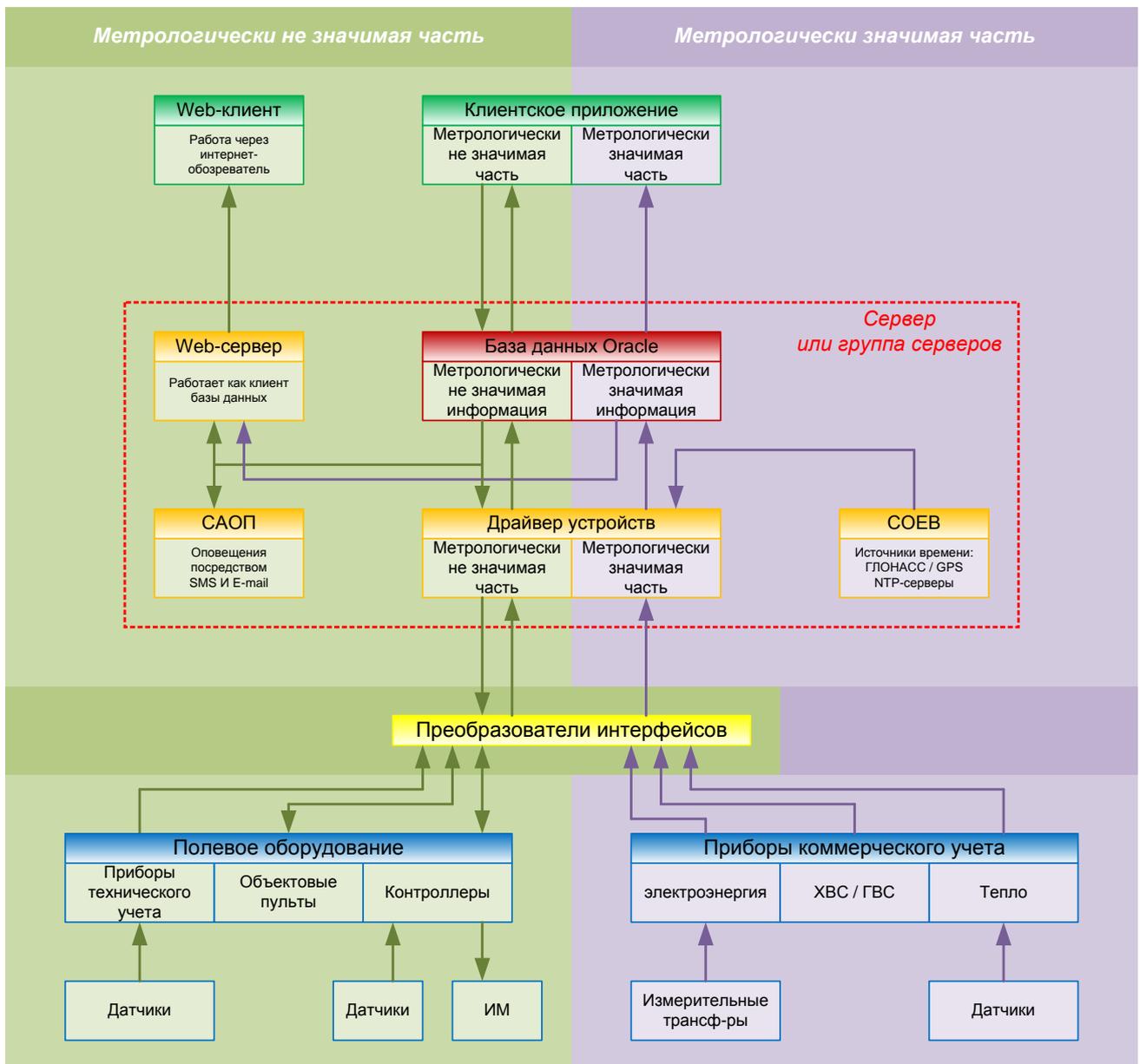


Рисунок 5.2 – Структурная схема ПТК «ПолиТЭР»

Пользовательский интерфейс представлен клиентским приложением АСДУ «ПолиТЭР». В составе АРМ пользователя посредством мнемосхем реализован полный функционал настройки и дистанционного управления всеми элементами и подсистемами.

На рисунке 5.3 представлена мнемосхема основных технологических параметров функционирования АИТП. На данной мнемосхеме посредством условно-графических обозначений изображено основное оборудование АИТП, в реальном времени отображаются значения основных характеристик теплоносителя до и после узла регулирования (смещение, насосная группа), представлен температурный график и основные уставки.

На рисунке 5.4 представлена мнемосхема основных настроек АИТП. Данная мнемосхема позволяет управлять режимами работы АИТП и его контуров (контур отопления, контур ГВС), производить настройку ПИД-регуляторов, изменять уставки и настраивать автоматическое переключение между уставками, редактировать температурный график. На рисунке 5.5 представлена мнемосхема настроек корректирующего контура. Данная мнемосхема позволяет настраивать коэффициенты регулятора корректирующего контура, параметры модели и постоянные времени фильтров, а также устанавливать диапазон коррекции. Управление настройками и параметрами (рисунки 5.4, 5.5) подразумевает одновременно возможность видеть текущие настройки и параметры контроллера и удаленно изменять данные настройки посредством АРМ оператора, а также контролировать изменения настроек и параметров, выполненные с операторской панели контроллера.

На рисунке 5.6 представлена мнемосхема, отображающая значения температуры в различных помещениях здания (на мнемосхеме – 7 этаж УЛК ЗБВ ЮУрГУ). Мнемосхема отображает показания температуры в 25 точках одного этажа: в аудиториях и в коридоре. На основе указанных измерений рассчитываются обобщенные данные: средняя, минимальная и максимальная температуры по этажу, средние температуры по коридору, по аудиториям и т.д.

> ЮУРГУ / Корпус 3БВ / АИТП / Контроллер Segnetics SMH-2G

>> Основные параметры работы АИТП:

Задание	Значение
<i>В автоматическом режиме</i>	
Запуск работы контура отопления	Пуск
Запуск работы контура ГВС	Пуск
Время года (контур отопления)	Лето
Смещение темпер. графика отопл-я, °С	Зима
Используемая уставка ГВС	0
	День/Ночь
	День/Ночь

В ручном режиме

Задание	Значение
<i>В ручном режиме</i>	
Ручной режим контура 1 (отопление)	Авто
Полож-е штока клапана контура 1, %	100
Ручной режим контура 2 (ГВС)	Авто
Полож-е штока клапана контура 2, %	50
	Авто
	50

>> Настройки контуров контроллера:

Задание	Значение
<i>ПИД-регулятор контура отопления</i>	
Коэффициент Кp	2.8
Коэффициент Ti	78.4
Коэффициент Td	0

Смена режимов отопления

Переход зима → лето, °С	12
Переход лето → зима, °С	4
	12
	4

>> Настройки насосной группы:

Задание	Значение
<i>Режим работы насосной группы</i>	
Выбор циркуляционного насоса	Ротация
Включение ПИД-регулятора	Ручное
Обороты (ручной режим), %	100

Задание	Значение
<i>ПИД-регулятор контура ГВС</i>	
Коэффициент Кp	2.8
Коэффициент Ti	78.4
Коэффициент Td	0

Смена режимов ГВС

Переход день → ночь, ч	22
Переход ночь → день, ч	6
	22
	6

Задание	Значение
<i>ПИД-регулятор насосной группы (давление)</i>	
Коэффициент Кp	2.79
Коэффициент Ti	78.4
Коэффициент Td	0.6

>> Задания и уставки:

Температурный график отопления

Темпер. н.в., °С	Задание	Значение
-34	Точка 1 (min Тн.в.)	80
-8	Точка 2	60
0	Точка 3	46
8	Точка 4 (max Тн.в.)	40

Задание	Значение
Max T подачи, °С	90
Min T подачи, °С	35

Уставки ГВС

Темпер. подачи, °С	Задание	Значение
55	Уставка «День», °С	55
40	Уставка «Ночь», °С	40
30	Уставка «Эконом», °С	30

Уставки насосной группы

Задание	Значение
Уставка максимального давления, атм.	5.8

Рисунок 5.4 – Мнемосхема основных настроек АИТП

> ЮУРГУ / Корпус ЗБВ / АИТП / Контроллер Segnetics SMN-2Gi / Алгоритм коррекции

>> Основные параметры работы АИТП:

Задание	Значение
Вкл	Вкл
20.8	20.8
Выкл	Выкл

Режимы и уставки

Режим работы алгоритма коррекции
 Уставка температуры в помещении, °С
 Работа при ручном режиме контура 1
 Сместение темпер. графика отопл-я, °С

>> Параметры модели и фильтра:

Задание	Значение
---------	----------

Параметры модели здания

Постоянная времени Tz1 (большая)	20	20
Постоянная времени Tz2 (меньшая)	1.2	1.2
Чистое запаздывание τ z	1	1

Характеристики здания

Внешний объем здания, х 10 куб. м	7157	7157
Гидравлич. сопр-е системы отопл-я, атм.		

>> Настройки ограничений:

Задание	Значение	
Максимальная коррекция в "+", °С	5	5
Максимальная коррекция в "-", °С	5	5

Настройки ограничения коррекции

Вкл коррекции при Tп(оц) > Tп(д) на, °С	8	5
Вкл коррекции при Tп(оц) > Tп(д) на, °С	8	5

Задание	Значение
---------	----------

ПИД-регулятор блока коррекции

1	1
0	0
0	0

Коэффициент Kп
 Коэффициент Ти
 Коэффициент Тd

Задание	Значение
---------	----------

Параметры фильтра

5	5
0.5	0.5
-1.07	-1.07

Постоянная сглаживающ. фильтра Tt1
 Постоянная сдвигающ. фильтра Tt1
 Интервал ретроспективы λ

Параметры моделирования

15	15
Вкл	Вкл

Шаг моделирования Δt
 Минимальное время перех. процесса, ч
 Подключение сдвигающего фильтра

Задание	Значение
---------	----------

Настройки максимального рассогласования модели и здания

8	8
8	8

Вкл коррекции при Tп(оц) > Tп(д) на, °С
 Вкл коррекции при Tп(оц) > Tп(д) на, °С

>> Контрольные показатели

Показатели коррекции уставки контура отопления

Выход температурного графика (To1), °С	40.61
Коррекция ΔTo1 (выход алгоритма), °С	-1.91
Коррекция ΔTo1 (после ограничителя), °С	-1.91
Откорректированная To1, °С	38.71
Конечная уставка To1 для контура 1, °С	38.71

Режим работы алгоритма коррекции и модели

Переходный / Установившийся режим	норма
Сработка ограничителя коррекции	
Время работы алгоритма (текущий сеанс), ч	153

Температура воздуха в помещении

Ср./взвеш. значение Tп (по датчикам), °С	23.8
Оценочное значение Tп по модели, °С	22.88
Прогнозное значение Tп, °С	22.71
Обобщенное возмущ. воздействие Tz, °С	1.1

Оценка энергосбережения

Теплопотребление по теплосчетчику, Гкал/ч	
Оценка теплопотр-я без коррекции, Гкал/ч	
Оценка теплопотр-я без коррекции, Гкал/ч	
Оценка теплопотр-я при коррекцией, Гкал/ч	
Потребление на прочие нужды, Гкал/ч	

Прочие показатели и переменные

Оценка удельн. теплопотр-я q0, Гкал/куб.м	0.18
Оценка расхода теплоносителя, т/ч	

Рисунок 5.5 – Мнемосхема настроек контура компенсации

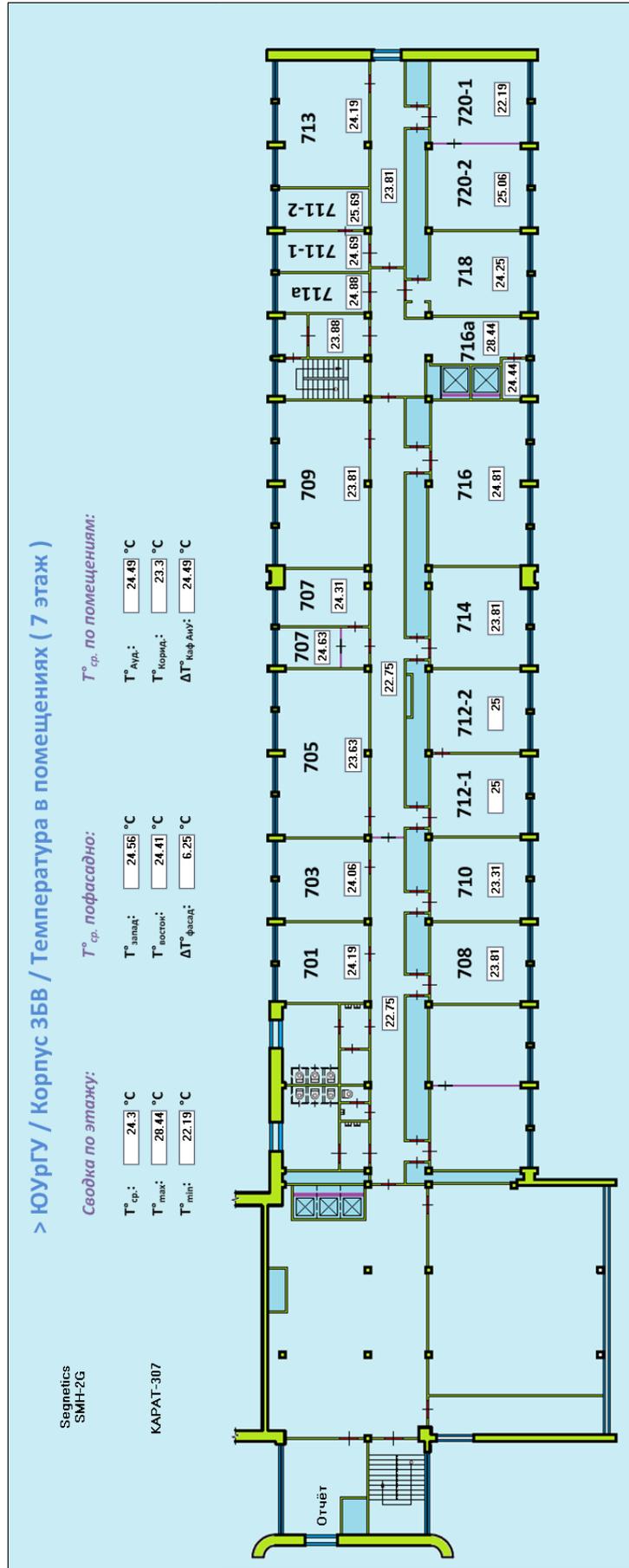


Рисунок 5.6 – Мнемосхема подсистемы измерения температуры воздуха в помещениях

5.3. Структура исполнительной программы контроллера АИТП

Программно-алгоритмическое обеспечение контроллера АИТП разработано на высокоуровневом графическом технологическом языке функциональных блоковых диаграмм FBD (стандарт IEC 61131-3 [148]).

Обработка команд осуществляется последовательно в цикле выполнения программы в порядке, регламентированном языком FBD. Выполнение команд осуществляется в следующей последовательности:

- 1) Обработка входных данных:
 - обработка дискретных входных сигналов;
 - обработка аналоговых входных сигналов;
 - обработка значений входных переменных Modbus;
 - обработка нажатий клавиш клавиатуры.
- 2) Определение режимов работы (логика включения и отключения контуров регулирования, регуляторов, переключение режимов работы системы).
- 3) Формирование системы экранного меню (локального пользовательского интерфейса).
- 4) Синхронизация времени.
- 5) Обработка логических условий и операций (логика включения и выключения исполнительных устройств).
- 6) Формирование температурных графиков и уставок:
 - формирование текущей уставки температуры теплоносителя по температурному графику отопления;
 - формирование текущей уставки горячей воды в соответствии с текущим режимом работы контура.
- 7) Контур коррекции уставки температуры теплоносителя (алгоритм компенсации тепловой инерции здания и действующих на здание возмущений).
- 8) Оценка тепловой мощности (косвенная оценка количества теплоты).
- 9) Формирование выходных сигналов:
 - формирование сигналов аварий;

- регулирование контура отопления;
- формирование аналогового сигнала управления регулирующим клапаном контура отопления;
- управление насосной группой циркуляции контура отопления;
- регулирование контура ГВС;
- формирование аналогового сигнала управления регулирующим клапаном контура ГВС;
- формирование значений выходных переменных Modbus.

Таким образом, в описанном цикле выполнения программы реализуется весь необходимый функционал разработанной системы управления отоплением здания. Детальная структура основных блоков программы в среде разработки представлена в Приложении 4.

5.4. Методы автоматизированного сбора и анализа данных по температуре воздуха в помещениях

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что вследствие действия множества описанных выше возмущающих факторов, в различных помещениях одного здания температура воздуха может существенно различаться. Поэтому управление отоплением здания по температуре внутреннего воздуха в отдельном контрольном помещении показало свою неэффективность на практике [63]. Отсюда в рамках данной работы возникла необходимость создания распределенной сети датчиков, определяющих температуру в различных помещениях. На первом этапе в различных помещениях здания учебного корпуса ЮУрГУ были установлены 25 цифровых сенсоров температуры *Dallas DS18B20*, объединенных сетью *MicroLan (1-wire)* [1; 95]. На рисунке 5.7 показана схема расположения датчиков на 7 этаже УЛК ЗБВ.

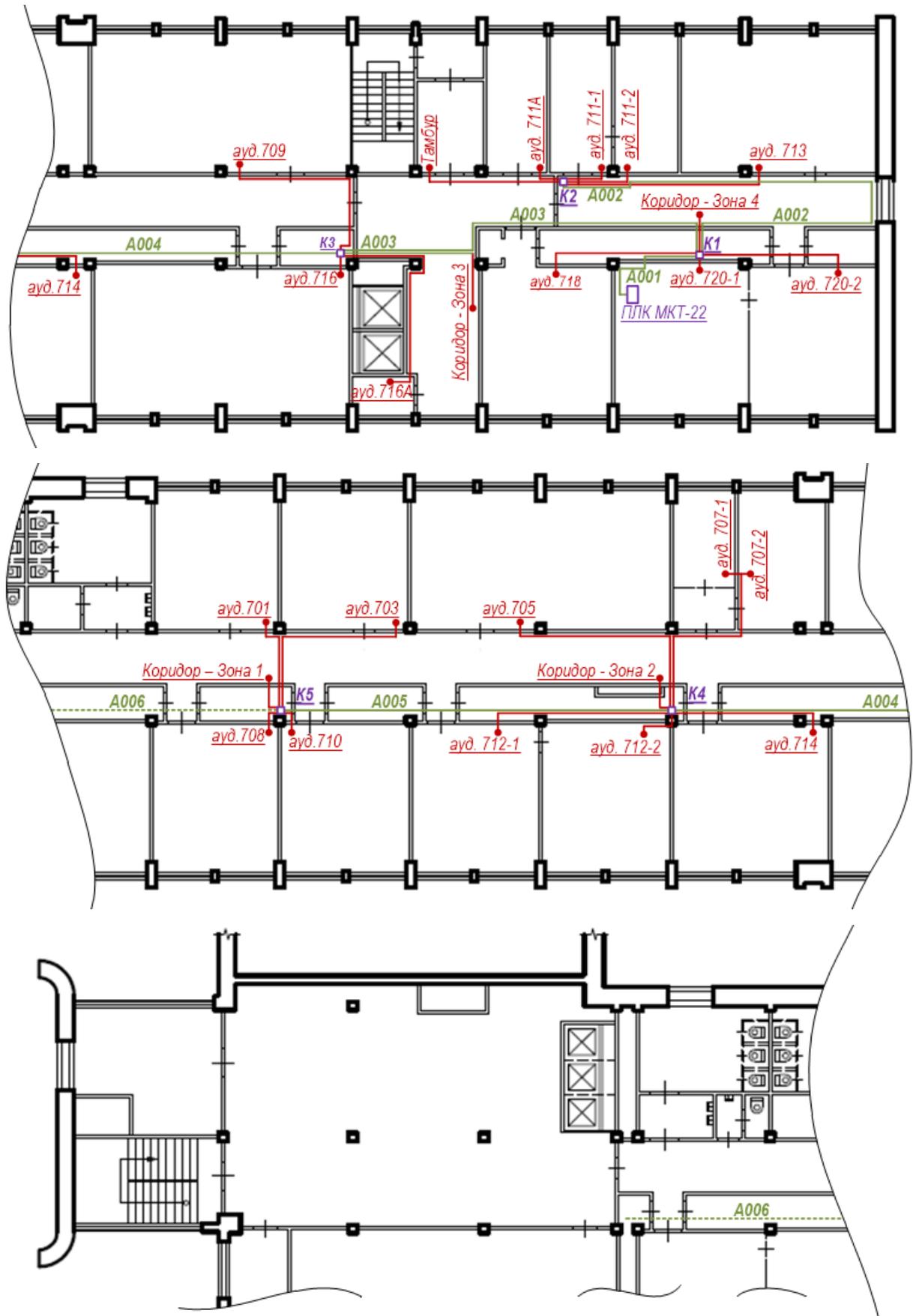


Рисунок 5.7 – Схема расположения датчиков температуры воздуха в помещениях здания

Представленная структура позволяет в реальном времени контролировать температуру воздуха в помещениях и оперативно выявлять помещения с несоответствующей нормативу температурой воздуха. Контроль температуры в помещениях здания позволяет выявлять существующие факторы неэффективного потребления энергоресурсов, включая их причины и локализацию: правила интерпретации и обработки показаний датчиков сведены в таблицу 5.1.

На практике для определения средней температуры воздуха в здании число точек измерения может быть ограничено несколькими представительными помещениями, включающими помещения разных фасадов, разных этажей, разных стояков (с разной удаленностью от теплового ввода). Это позволяет выявлять проблемы с качеством отопления на уровне здания в целом и отдельных фасадов, а также общие закономерности (например, недостаточный поток теплоносителя в дальних от теплового ввода стояках).

Таблица 5.1 – Интерпретация данных о температуре воздуха в помещениях

Наименование фактора	Описание показаний	Возможные причины и способы их устранения
1	2	3
Общий перетоп или общий недотоп	температура воздуха в большинстве помещений здания выше или ниже нормативной	1) Здание получает избыточное или недостаточное количество тепловой энергии. Требуется коррекция температурного графика. Возможно, требуется проведение энергосберегающих мероприятий для всего здания. 2) Естественный износ системы отопления вследствие старения. Требуется замена стояков и радиаторов.
Перетоп по стояку или недотоп по стояку	температура воздуха в большинстве помещений по одному или нескольким стоякам выше или ниже нормативной	1) Стояки имеют различное гидравлическое сопротивление и/или тепловую нагрузку. Требуется гидравлическая балансировка стояков. 2) Неравномерный износ системы отопления. Требуется замена труб и радиаторов по данному стояку.

Окончание таблицы 5.1.

1	2	3
Перетоп по фасаду или Недотоп по фасаду	температура воздуха в большинстве помещений одного фасада выше или ниже нормативной	Наблюдается, как правило, по фасадам север – юг. Требуется балансировка системы. В случае недотопа, возможно, требуется проведение энергосберегающих мероприятий.
Периодические петопы (недотопы) по фасадам	температура воздуха в помещениях разных фасадов существенно различается и колеблется в течение суток	Наблюдается, как правило, по фасадам запад – восток. Требуется внедрение пофасадного регулирования.
Локальный перетоп	температура воздуха в отдельных помещениях здания выше нормативной	1) Установленный радиатор отдает избыточную тепловую энергию. 2) Помещение обладает имеет более высокую энергоэффективность ввиду локально проведенных энергосберегающих мероприятий. 3) Помещение имеет дополнительные источники тепlopоступления (люди, работающее оборудование). Во всех случаях необходима индивидуальная балансировка либо замена радиатора (в зависимости от схемы) с целью уменьшения подаваемого тепла.
Локальный недотоп	температура воздуха в отдельных помещениях здания ниже нормативной	1) Установленный радиатор отдает недостаточное количество тепловой энергии, требуется замена радиатора. 2) Помещение обладает более низкой энергоэффективностью, требуется проведение локальных энергосберегающих мероприятий.
Общий периодический перетоп	температура воздуха в помещениях здания выше нормативной в определенные периоды суток	1) Фасад здания подвержен существенному влиянию солнечной радиации. 2) Здание имеет дополнительные источники тепlopоступления (люди, работающее оборудование), воздействующие в определенные периоды суток. В обоих случаях требуется коррекция подачи тепла с учетом воздействия указанных факторов.

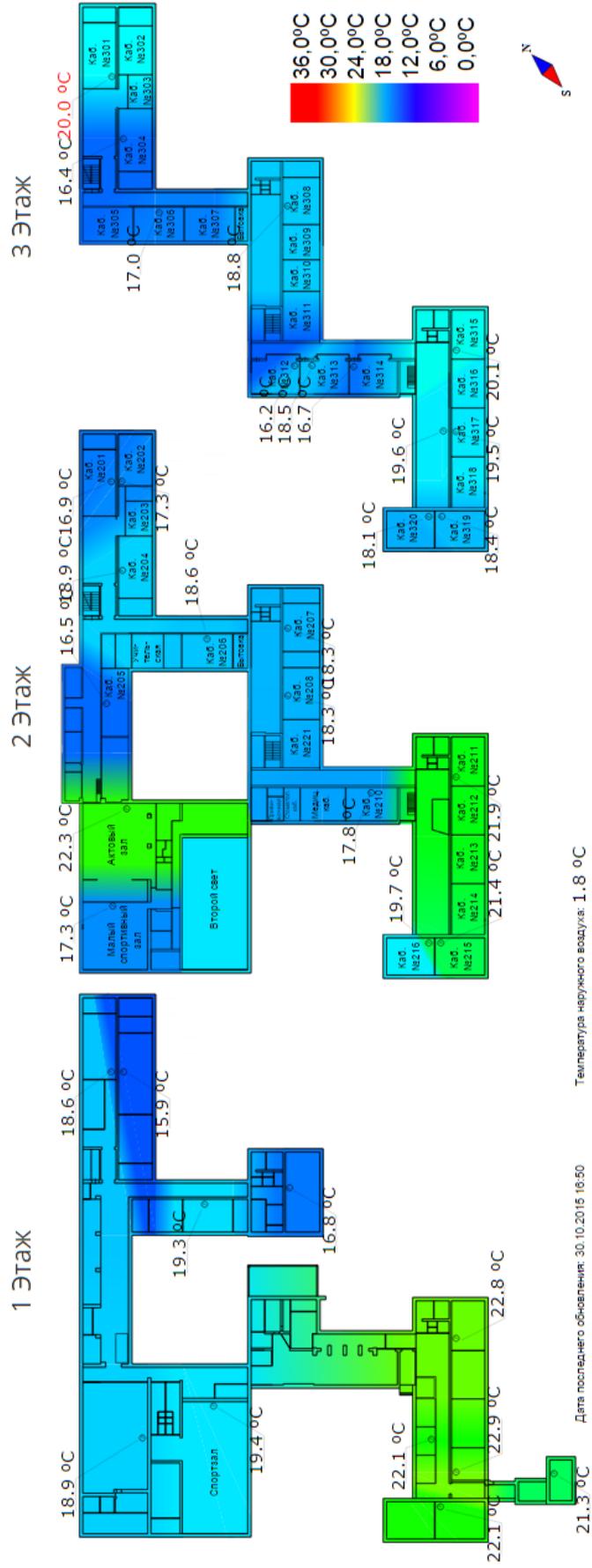


Рисунок 5.8 – Цветовая карта температур (теплогарма) воздуха в помещениях здания

В целях снижения затрат на внедрение дальнейшую локализацию проблем с отоплением до конкретных стояков и помещений возможно осуществлять по опросам находящихся в здании людей (жильцов, сотрудников), а также с использованием временно устанавливаемых беспроводных датчиков либо термометров-самописцев.

Для удобства интерпретации и анализа человеком полученных данных возможно представление результатов измерений в виде цветовой карты температур (рисунок 5.8) с помощью соответствующего программного обеспечения. На рисунке 5.8 показана цветовая карта температур для Средней общеобразовательной школы №33 (г. Омск, ул. Туполева, 1). Работа корректирующего контура управления с компенсацией возмущений была проверена на данных, полученных с системы диспетчеризации данного объекта.

Беспроводной сбор данных на базе протокола WirelessHART

В рамках диссертационной работы были проведены экспериментальные исследования перспективной технологии беспроводной передачи данных с датчиков на базе встраиваемых коммуникационных модулей *RFM XDM2510HP*, объединенных в беспроводную сенсорную сеть WirelessHART [2; 141]. Для этого были созданы полунатурные оконечные устройства, состоящие из встраиваемых коммуникационных модулей *XDM2510HP* производства *RF Monolithics*, США (рисунок 5.9, а), и ПЭВМ с программным обеспечением собственной разработки, эмулирующим работу прикладного контроллера. Взаимодействие натурной (модули) и имитационной (эмулятор приложения) частей осуществляется посредством интерфейса USB через интерфейсные платы из комплекта разработчика *XDM2510HDK*, выпускаемого производителем коммуникационных модулей. На втором этапе были протестированы натурные устройства, в которых имитационная часть и интерфейсная плата были заменены платой-контроллером собственной разработки. Сбор данных осуществляется на устройство *XG2510HE* производства *RF Monolithics*, США, объединяющее в себе координатор сети WirelessHART и шлюз в сеть Ethernet. Для радиосвязи использовались

ненаправленные антенны с коэффициентом усиления 2,1 дБи. Все коммуникационное оборудование, использованное в экспериментах, серийного производства и промышленного назначения.

Аналогичные экспериментальные исследования были проведены с использованием встраиваемых коммуникационных модулей *RFM ZMN2430HP*, производства *RF Monolithics*, США (рисунок 5.9, б) с интерфейсом беспроводной сенсорной сети ZigBee. В результате сравнения двух технологий: ZigBee и WirelessHART – в сходных условиях установлено, что WirelessHART обеспечивает большую стабильность соединения и устойчивую передачу данных на большие расстояния. Кроме того, на базе беспроводной сенсорной сети WirelessHART возможно создание систем передачи данных реального времени.



а – XDM2510HP (WirelessHART)



б – ZMN2430HP (ZigBee)

Рисунок 5.9 – Встраиваемые коммуникационные модули

Среднее значение температуры воздуха в здании определяется посредством усреднения температур воздуха в различных помещениях здания с использованием весовых коэффициентов, пропорциональных площади этих помещений:

$$T_{\text{ind}}(t) = \frac{\sum_i S_i \cdot T_{\text{ind } i}(t)}{\sum_i S_i}, \quad (5.1)$$

где $T_{\text{ind } i}$ – температура воздуха в i -м помещении здания, S_i – площадь i -го помещения здания. Использование среднего значения температуры T_{ind} ослабляет влияние возмущений, действующих локально на отдельные помещения. В

результате учитывается совокупное действие возмущающих воздействий на здание в целом.

Выводы к главе 5

1. В рамках реализации предложенной в работе системы управления тепловым режимом здания разработана структура комплекса технических средств системы управления тепловым режимом корпуса ЗБВ ЮУрГУ, включающая элементы программного и аппаратного обеспечения. Предложенная структура включает 3 подсистемы, характеризующиеся самостоятельными целями функционирования: SCADA-систему на верхнем уровне, АИТП здания на нижнем уровне, а также систему контроля температуры воздуха в помещениях здания.

2. Предложенные в работе методы и алгоритмы управления реализованы в виде исполнительной программы на языке FBD для программируемого логического контроллера, устанавливаемого в АИТП здания. Разработанная исполнительная программа осуществляет управление исполнительными средствами АИТП и реализует контур регулирования отопления с каналом базового управления по температурному графику, корректирующий контур упреждающего управления с компенсацией возмущений, а также контур регулирования ГВС и управление насосной группой.

3. На базе ПТК «ПолиТЭР» организован диспетчерский пользовательский интерфейс разработанной системы управления тепловым режимом корпуса ЗБВ ЮУрГУ, осуществляющий опрос установленного на нижнем уровне оборудования АИТП здания и датчиков температуры воздуха в помещениях здания, архивирование трендов технологических параметров и событий, а также формирование пользовательских экранных форм и автоматически формируемых отчетных документов. В рамках пользовательского интерфейса разработаны экранные формы отображения основных технологических параметров объекта и конфигурирования контуров управления разработанной системы.

4. Для получения в режиме реального времени объективных данных о температуре воздуха в помещениях, контроля качества управления и предоставления данных для работы прямых и обратных моделей динамики теплового режима здания внедрена система контроля температуры воздуха, включающая проводные и беспроводные интеллектуальные датчики температуры.

ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ

6.1. Система управления отоплением УЛК ЗБВ ЮУрГУ

Объектом внедрения предложенных в работе математических моделей, методов и алгоритмов управления было выбрано 10-этажное здание учебно-административного назначения – учебно-лабораторный корпус (УЛК) ЗБВ Южно-Уральского государственного университета. Здание расположено по адресу: г. Челябинск, пр. Ленина, 87. Характеристики здания представлены в таблице 6.1. Характеристики системы отопления здания представлены в таблице 6.2. Принципиальная схема ИТП представлена на рисунке 6.1.

Таблица 6.1 – Технические характеристики здания УЛК ЗБВ

№	Параметр	Значение
1	Год постройки	1981
2	Функциональное назначение	гражданское общественное
3	Материалы ограждающих конструкций: – наружные стены – крыша	железобетонные блоки трехслойная рубероидная (плоская)
4	Материал внутренних конструкций: – несущая конструкция – внутренние стены – межэтажные перекрытия	железобетонные балки, шлакоблок, железобетонные панели сборные железобетонные плиты
5	Этажность	надземных – 10, чердак подземных – 1
6	Ориентация фасадов по сторонам света	запад – восток
7	Площадь помещений	16 078 м ²
8	Внутренний объем (приблизительно)	50 000 м ³
9	Удельный расход тепловой энергии на отопление здания	0,38 Вт / (м ³ ·°С)

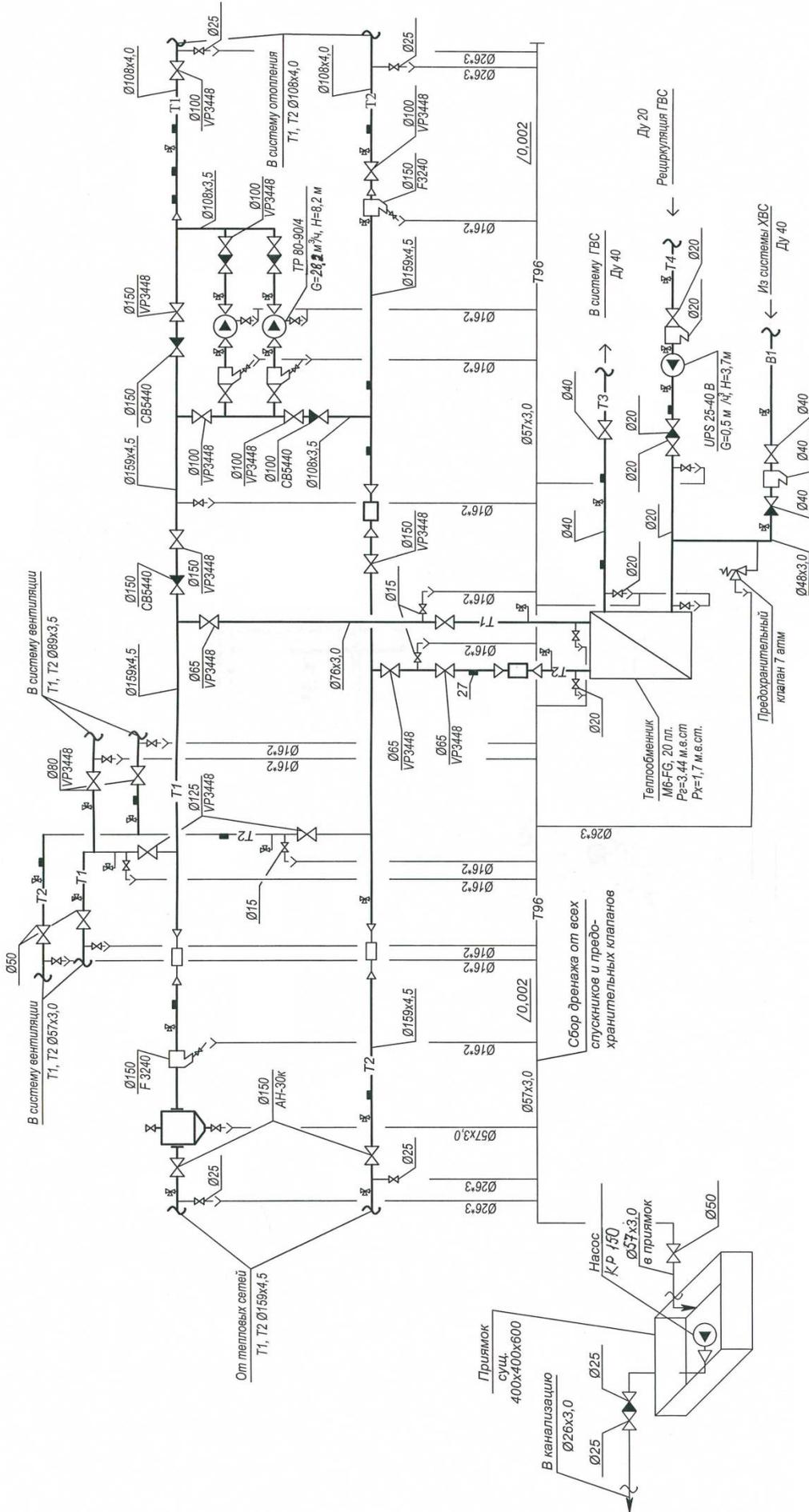


Рисунок 6.1 – Принципиальная схема индивидуального теплового пункта

Таблица 6.2 – Технические характеристики системы отопления УЛК 3БВ

№	Параметр	Значение
1	Тип	централизованное водяное (по зависимой схеме)
2	Источник теплоснабжения	смешанный (городские тепловые сети, газовая котельная, утилизация тепла микрогазотурбинной когенерационной установки) через ЦТП
3	Трубная разводка	верхняя разводка, вертикальные стояки
4	Отопительные приборы	чугунные радиаторы
5	Расположение ИТП	в подвале здания
6	Циркуляция теплоносителя	принудительная (насосная группа)
7	Регулирование	качественно-количественное автоматическое
8	Потребление тепловой энергии	на отопление, ГВС

6.2. Описание проведенных экспериментов и полученных результатов

Основная цель проведенных экспериментов – подтверждение адекватности построенных моделей и определение возможности практического применения предложенного подхода. Эксперименты проводились в несколько этапов.

Первый этап – проверка на модельных данных.

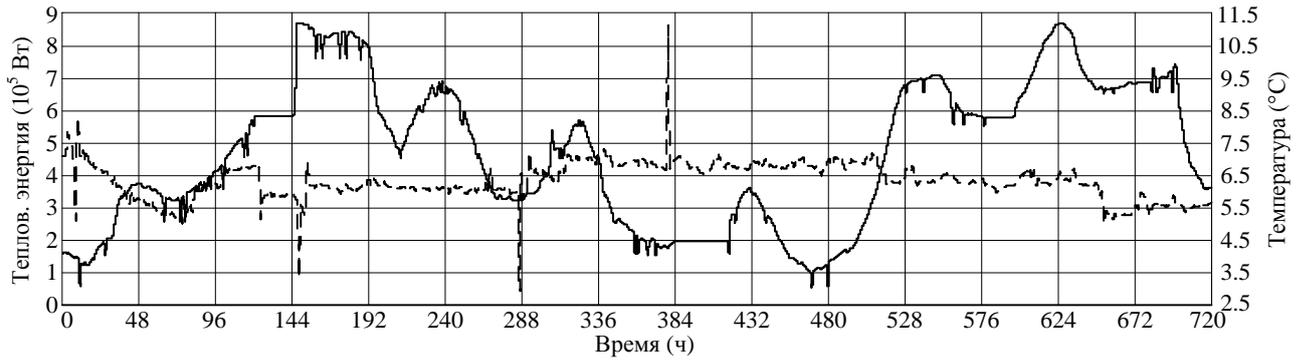
На первом этапе проводилось изучение функционирования предложенной структуры системы управления и исследование прогнозирующих свойств экспоненциальных фильтров с использованием синтетических данных. В качестве синтетических данных использовались полигармонические функции с периодами колебаний, отражающими периодичность процессов теплового режима здания и действующих на здание возмущающих факторов. Используются гармоники с периодами: 0,5 ч, 1 ч, 3 ч, 6 ч, 24 ч, 168 ч, 720 ч. Высокочастотные гармоники отражали действие возмущений с относительно быстрой динамикой, таких как солнечная радиация и теплоступление от внутренних бытовых источников, низкочастотные (период 24 ч и более) – изменение погодных условий. Также проводились эксперименты с линейными, экспоненциальными, параболическими составляющими, пилообразными функциями, ступенчатыми воздействиями.

Данный подход позволил изучить реакцию элементов синтезируемой САР на входные сигналы различного вида. В частности, по результатам данных экспериментов были приняты решения: о декомпозиции динамического оператора модели теплового режима здания по скорости динамики процессов, о структуре модели теплового режима, о выборе метода получения упреждающей оценки с использованием цифровых фильтров, о типе используемых фильтров. В результате была разработана структура системы управления тепловым режимом здания с компенсацией тепловой инерции здания и влияющих на здание быстропеременных возмущений, которая затем была уточнена, идентифицирована и верифицирована с использованием реальных данных (см. параграф 3.2).

Второй этап – пассивная проверка на реальных данных.

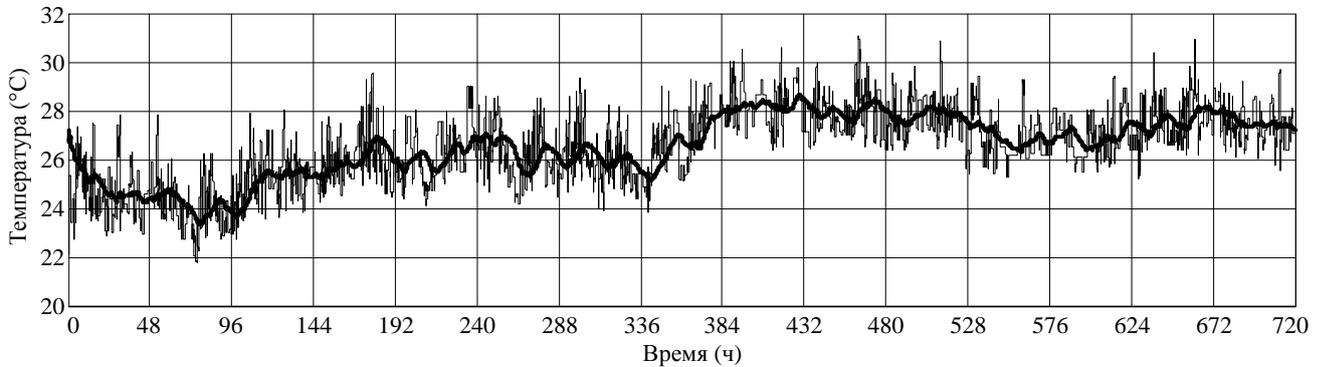
На данном этапе в качестве входных параметров модели были использованы измеренные значения $Q_h(t)$ и $T_{out}(t)$, полученные при помощи теплосчетчика и датчика температуры наружного воздуха из состава АИТП, соответственно (рисунок 6.2). Сбор данных о температуре воздуха в помещениях здания осуществлялся при помощи распределенной сети датчиков температуры (см. параграф 5.4). На рисунке 6.3 представлено усредненное значение температуры воздуха в помещении: тонкая серая линия – значение без фильтрации, жирная черная линия – отфильтрованное значение. Фильтрация позволяет выделить основной тренд изменения сигнала, характеризующий влияние на температуру воздуха в помещении значений величин $Q_h(t)$ и $T_{out}(t)$, одновременно снизив влияние «быстрых» возмущений и шумов. Фильтрация должна осуществляться с использованием фильтров с относительно небольшой постоянной времени, чтобы не вносить значимую задержку по времени между исходным и отфильтрованным сигналом.

Определение значений неизвестных сигналов q_h и $Q_z(t)$ произведено согласно методике, описанной в параграфах 2.2 и 3.1.



Пунктирная линия – $Q_h(t)$ [Вт]; сплошная линия – $T_{out}(t)$ [°C].

Рисунок 6.2 – Входные сигналы модели



Тонкая линия – результаты измерений; жирная линия – данные после фильтрации.

Рисунок 6.3 – Среднее значение температуры воздуха в здании

На рисунке 6.4 представлен график удельного расхода тепловой энергии на отопление на единицу объема здания $q_h(t)$, определенный по модели (рисунок 3.2). Как видно из графика, наблюдаются весьма сильные колебания сигнала q_h и его существенные отклонения от расчетного значения в отдельные моменты времени. Снижение амплитуды и частоты колебаний весьма эффективно осуществляется путем фильтрации входных сигналов $Q_h(t)$, $T_{out}(t)$, $T_{ind}(t)$. Т.к. при нормальной эксплуатации здания реальное значение $q_h(t)$ в среднесрочном рассмотрении постоянно (в долгосрочном рассмотрении наблюдается постепенное повышение $q_h(t)$ из-за естественного износа системы отопления и ограждающих конструкций здания), в реализации системы может быть использовано усредненное значение:

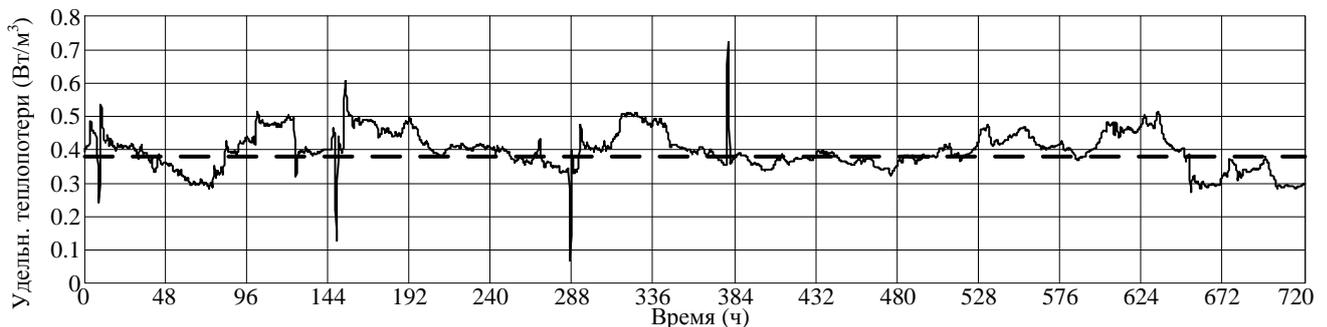
$$q_h^{t-avg}(t) = \frac{1}{t} \cdot \int q_h dt \quad (6.1)$$

что на практике (в дискретной системе) реализовано как [54; 134]:

$$q_h^{t\text{-avg}}[i] = \frac{i - k_{WF}}{i} \cdot (q_h^{t\text{-avg}}[i-1]) + \frac{k_{WF}}{i} \cdot q_h[i] \quad (6.2)$$

где $q_h^{t\text{-avg}}$ – усредненное значение величины удельных теплопотерь, q_h – текущее значение величины удельных теплопотерь, i – номер текущей итерации (цикла дискретной системы). Весовой коэффициент $k_{WF} = 1 \dots 2$ (рекомендуется не более 1...1,2) позволяет усилить влияние текущего значения $q_h[i]$ в сравнении с накопленным усредненным $q_h^{t\text{-avg}}[i-1]$ что оправдано в случае девиации реального значения q_h .

Расчетное значение величины удельных теплопотерь (рисунок 6.4), определено путем усреднения входных сигналов $Q_h(t)$, $T_{out}(t)$, $T_{ind}(t)$ за большой промежуток времени (в данном случае – за полный отопительный период 2013–2014 года).



Сплошная линия – оценка значения по модели в реальном времени;

пунктирная линия – результаты расчетов по номинальным параметрам здания.

Рисунок 6.4 – Удельные теплопотери

На рисунке 6.5 представлен график обобщенного возмущения $Q_z(t)$, определенного по модели, приведенной на рисунке 3.15. Из рисунка хорошо виден центрированный характер сигнала, т.е. соответствие условию (3.12). На рисунке 6.6 изображен график ошибки моделирования температуры воздуха в помещении. Величина ошибки не превышает $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

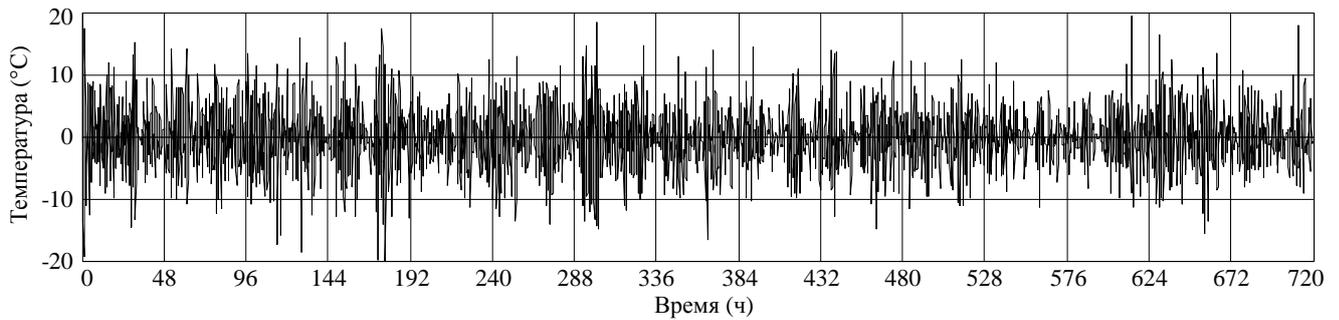


Рисунок 6.5 – Оценочное значение обобщенного возмущения

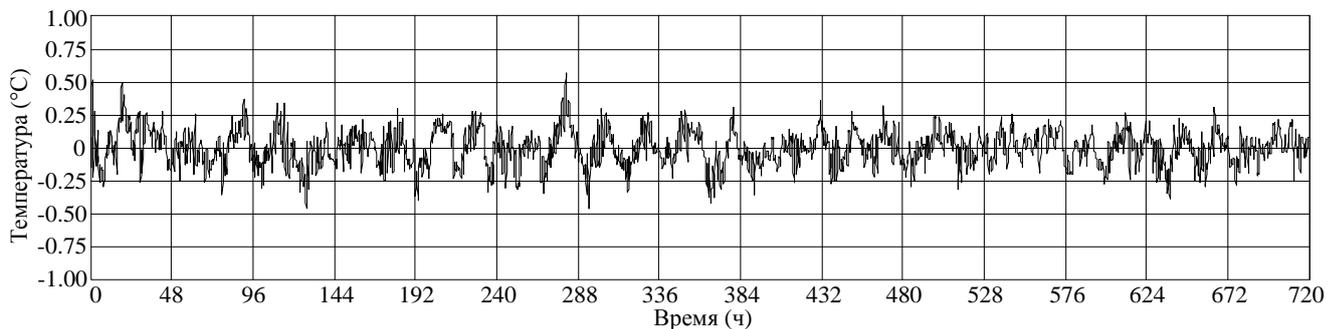


Рисунок 6.6 – Ошибка оценки температуры воздуха в помещении

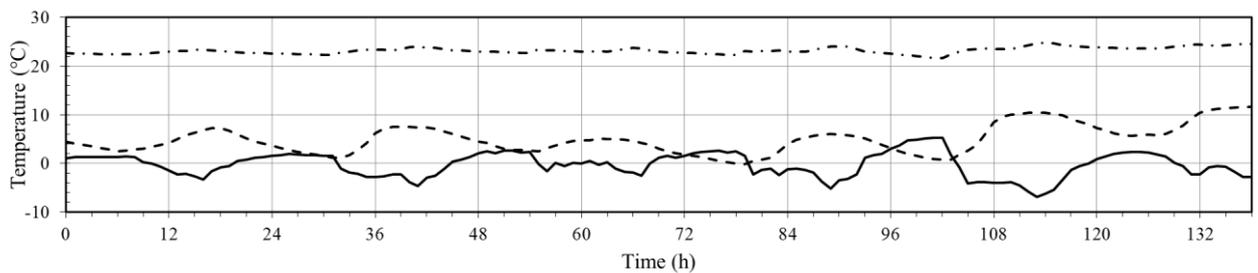
Третий этап – проверка на объекте.

На третьем этапе были проведены эксперименты по проверке работы предложенной системы управления на реальном объекте – учебно-лабораторном корпусе ЗБВ.

На рисунке 6.7 представлен график прогнозной оценки обобщенного возмущения вместе с графиками температуры наружного воздуха и температуры воздуха в помещениях (результаты измерений за апрель 2015 г.). На рисунке: пунктирная линия – температура наружного воздуха, штрих-пунктирная линия – температура воздуха в помещениях здания, сплошная линия – оценочное значение обобщенного возмущения.

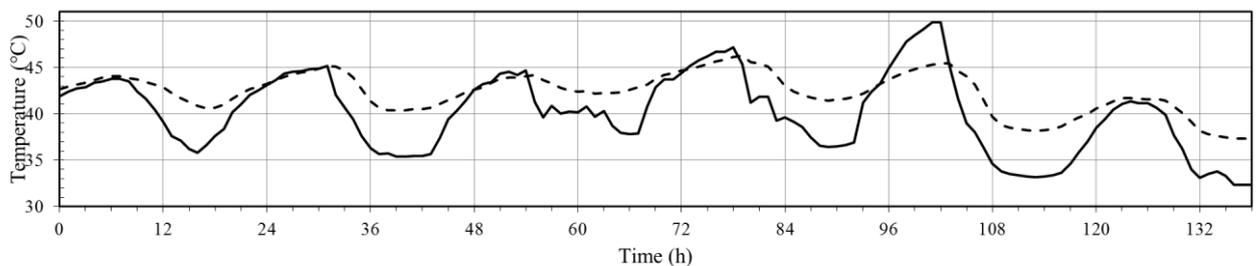
На рисунке 6.8 представлены графики температуры теплоносителя в подающем трубопроводе при использовании только базового канала управления по температуре наружного воздуха (пунктирная линия) и при использовании корректирующего контура (сплошная линия). Поведение системы в ночное время

близко к проектным значениям и требуется минимальная коррекция подачи тепла в здание. В дневные часы, напротив, под воздействием возмущающих факторов: прежде всего, солнечной радиации и внутренних бытовых источников тепла (работающего оборудования и находящихся в здании людей) – наблюдается рост величины обобщенного возмущения. Возникает, необходимость компенсации указанных факторов путем уменьшения температуры подаваемого теплоносителя, что приводит к уменьшению количества потребляемой тепловой энергии.



Пунктирная линия – температура наружного воздуха;
штрих-пунктирная линия – температура воздуха в помещениях здания;
сплошная линия – оценочное значение обобщенного возмущения.

Рисунок 6.7 – Суточные колебания величины обобщенного возмущения

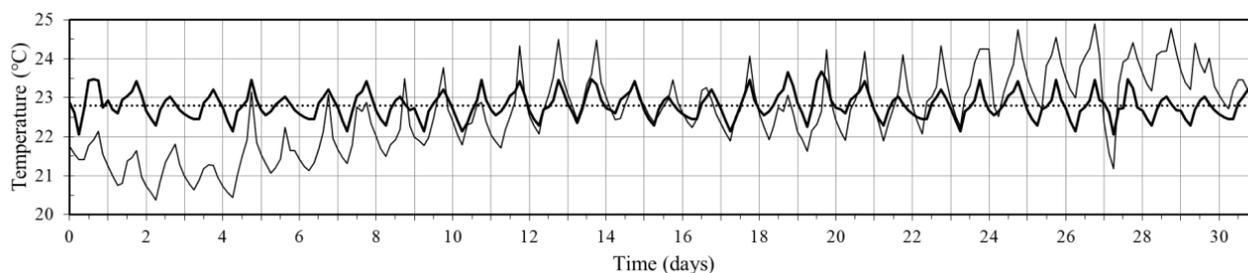


Сплошная линия – управление с компенсацией тепловой инерции и быстропеременных возмущений; пунктирная линия – только погодное регулирование.

Рисунок 6.8 – Температура теплоносителя в системе теплоснабжения

Кроме того, в результате применения предложенного подхода к управлению возрос уровень комфорта в здании. На рисунке 6.9 показаны графики температуры воздуха в помещениях здания при использовании погодного регулирования (тонкая линия) и предложенного метода управления на основе

компенсации возмущений и тепловой инерции (жирная линия). Как видно из рисунка, суточные колебания температуры воздуха в помещении снизились с $\pm 1^\circ\text{C}$ до $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Также удалось практически полностью исключить статическую ошибку, характерную для погодного регулирования.



Тонкая линия – только погодное регулирование; жирная линия – управление с компенсацией тепловой инерции и быстропеременных возмущений.

Рисунок 6.9 – Суточные колебания температуры воздуха в помещении

Таким образом, в результате применения предложенного подхода к управлению повышается качество и эффективность управления, достигается энергосберегающий эффект, повышается комфорт здания.

6.3. Расчет экономического эффекта от внедрения разработанной системы управления тепловым режимом здания с компенсацией возмущений

Расчет технико-экономической эффективности реализации энергосберегающих мероприятий в учебно-лабораторном корпусе ЗБВ Южно-Уральского государственного университета выполнен путем сравнения потребления тепловой энергии в базовом периоде и 2 отчетных периодах эксплуатации.

Базовым периодом является отопительный период до начала внедрения – с 11.10.2012 г. по 21.04.2013 г. В базовом периоде в тепловом узле рассматриваемого здания (учебно-лабораторный корпус ЗБВ Южно-Уральского государственного университета) отсутствовало индивидуальное регулирование.

Подача тепла осуществлялась с ЦТП с последующей ручной неавтоматизированной коррекцией при помощи ручной регулирующей арматуры в ИТП здания.

Первым отчетным периодом является половина отопительного периода 2013–2014 годов – с 31.12.2013 г. по 29.04.2014 г – от внедрения алгоритма базового управления до конца отопительного периода. На первом этапе внедрения, предшествовавшем первому отчетному периоду, был установлен контроллер АИТП с алгоритмом погодного регулирования.

В качестве второго отчетного периода рассмотрено 3 отопительных периода после внедрения управления с компенсацией быстропеременных возмущений на основе обратных моделей динамики – с 06.10.2014 г. по 22.04.2015 г., с 13.10.2015 г. по 14.04.2016 г. и с 11.10.2016 г. по 24.04.2017 г.

Из указанных периодов были исключены дни, в которые автоматика теплового узла не работала по тем или иным причинам: ремонтные работы, аварии в здании, переход на ручной режим, аварии в сетях и на ЦТП.

Расчет экономии осуществлялся путем приведения тепловых нагрузок первого и второго отчетных периодов к тепловым нагрузкам базового периода в соответствии с «Методикой определения тепловой нагрузки объекта теплоснабжения по результатам данных приборов учета потребления тепловой энергии» (Приложение к Правилам установления и изменения (пересмотра) тепловых нагрузок, утв. Приказом Министерства регионального развития РФ от 28 декабря 2009 г. № 610) [100]. Для этого, в соответствии с указанной Методикой, по данным приборного учета за выбранные периоды построены линии тренда вида:

$$Q = b_0 + b_1 \cdot T_{\text{out}} \quad (6.3)$$

(простые линейные регрессии). Уравнения линий тренда и результаты регрессионного анализа приведены в таблице 6.3. Полученные регрессии показывают высокую значимость статистической модели:

$$p(\bullet) \ll 0,001 \text{ и } R^2 > 0,8,$$

где $p(\bullet)$ – уровень значимости, R^2 – квадрат коэффициента множественной корреляции.

Таблица 6.3 – Характеристики линейных регрессий теплопотребления УЛК ЗБВ

Период	b_0	b_1	$p(b_0)$	$p(b_1)$	R^2
11.10.2012 – 21.04.2013	9,8419	-0,359	$1,1 \cdot 10^{-135}$	$3,22 \cdot 10^{-74}$	0,825
31.12.2013 – 29.04.2014	7,754	-0,4676	$8,27 \cdot 10^{-66}$	$2,43 \cdot 10^{-52}$	0,861
06.10.2014 – 22.04.2015	7,0352	-0,3691	$1,3 \cdot 10^{-129}$	$6,42 \cdot 10^{-75}$	0,872
13.10.2015 – 14.04.2016	8,8405	-0,2219	$2,57 \cdot 10^{-128}$	$3,53 \cdot 10^{-40}$	0,823
11.10.2016 – 24.04.2017	7,6907	-0,3489	$3,51 \cdot 10^{-77}$	$2,08 \cdot 10^{-61}$	0,954

Далее, произведено приведение (пересчет) тепловой нагрузки (теплопотребления) в первом и втором отчетных периодах к базовому периоду путем подстановки данных о температуре наружного воздуха в базовом периоде в соответствующие уравнения линий тренда (таблица 6.4). Так как время фактического начала и окончания каждого их отопительных периодов различаются, то в качестве базового и двух отчетных периодов были выбраны одинаковые по длительности периоды соответствующих лет: с 11 октября по 21 апреля за вычетом 29 февраля в високосный год. По полученным данным была определена экономия в относительных величинах, а также в абсолютных величинах в расчете на 1 сутки и рассмотренный период (193 суток).

Таблица 6.4 – Потребление тепловой энергии в базовом и отчетных периодах

№	Расчетный период	$T_{out\ avg},$ °С	$Q_h,$ Гкал	
			по прибору	Приведенная
1	Базовый период – 2012–2013 гг.	-7,34	2407,929	–
2	Первый отчетный период – 2013–2014 гг.	-5,14	–	2158,698
3	Второй отчетный период – 2014–2015 гг.	-5,84	–	1880,463
4	Второй отчетный период – 2015–2016 гг.	-5,70	–	1998,18
5	Второй отчетный период – 2016–2017 гг.	-8,13	–	1978,421

Как показано в таблицах 6.5 и 6.6, в результате внедрения автоматизированной системы управления тепловым режимом здания учебно-лабораторного корпуса ЗБВ были достигнуты следующие показатели экономии энергоресурсов:

1) на первом этапе внедрения при использовании алгоритма базового управления по основному возмущающему воздействию экономия в первом отчетном периоде (отопительный период 2013–2014 гг.) по сравнению с базовым периодом (отопительный период 2012–2013 гг.) составила 10,35%;

2) на втором этапе внедрения в ходе эксплуатации во втором отчетном периоде в течение трех лет (отопительные периоды 2014–2015, 2015–2016, 2016–2017 гг.) дополнительная экономия от применения метода управления на основе обратных моделей динамики, по сравнению с первым отчетным периодом (отопительный период 2013–2014 гг.) составила:

- в отопительном периоде 2014–2015 гг. – 12,89%;
- в отопительном периоде 2015–2016 гг. – 7,43%;
- в отопительном периоде 2016–2017 гг. – 8,35%;
- в среднем за 3 указанных отопительных периода – 9,56%.

Таблица 6.5 – Экономия тепловой энергии к базовому периоду

№	Расчетный период	Экономия к базовому периоду		
		относит., %	на период, Гкал	на 1 сутки, Гкал
1	Первый отчетный период – 2013–2014 гг.	10,35%	249,231	1,2914
2	Второй отчетный период – 2014–2015 гг.	21,91%	527,466	2,733
3	Второй отчетный период – 2015–2016 гг.	17,02%	409,479	2,1231
4	Второй отчетный период – 2016–2017 гг.	17,83%	429,508	2,2254

Таблица 6.6 – Экономия тепловой энергии к первому отчетному периоду

№	Расчетный период	Экономия к первому отчетному периоду		
		относит., %	на период, Гкал	на 1 сутки, Гкал
1	Второй отчетный период – 2014–2015 гг.	12,89%	278,235	1,4416
2	Второй отчетный период – 2015–2016 гг.	7,44%	160,518	0,8317
3	Второй отчетный период – 2016–2017 гг.	8,35%	180,277	0,9341

Таким образом, использование предложенного метода управления с компенсацией тепловой инерции здания и влияющих на здание возмущений при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах обеспечивает

существенную дополнительную экономию потребления энергоресурсов при сохранении комфортных условий пребывания в помещении.

Окупаемость затрат на реализацию разработанной системы управления отоплением тепловым режимом здания.

В ходе выполнения работ по внедрению разработанной системы управления тепловым режимом здания выполнена замена управляющего контроллера и его программирование. Для сбора данных о температуре воздуха в помещении собраны и смонтированы датчики температуры воздуха. В рамках пуско-наладочных работ выполнена настройка алгоритмов управления и моделей, а также настроена SCADA-система. Фактические затраты на реализацию системы модельно-упреждающего управления тепловым режимом здания включают стоимость закупленного оборудования, материалов и программного обеспечения (таблица 6.7), а также стоимость выполненных работ (таблица 6.8). Цены указаны на дату внедрения (лето 2014 г.) с учетом налогов, в т.ч. налогов и отчислений на фонд оплаты труда.

Таблица 6.7 – Фактическая стоимость оборудования, работ, материалов

№	Наименование оборудования, работ, материалов	Количество	Цена, руб.	Стоимость, руб.
1	Оборудование			
1.1	Контроллер Segnetics SMH-2Gi	1	11 337	11 337
1.2	Модуль MC для контроллера SMH-2Gi	1	7 033	7 033
1.3	Блок питания MeanWell PSC-60B	1	850	850
1.4	Аккумулятор (АКБ) 12В 4,5Ач	2	420	840
1.5	Датчик температуры Dallas DS18B20	25	60	1 500
	Итого по п.1			21 560
2	Материалы			
2.1	Кабель УТР 5е 4×2×0,25, м	150	4,5	675
2.2	Кабель ПВС 3×2,5, м	10	24	240
2.3	Корпус для блока питания и АКБ	1	500	500
2.4	Корпус для датчика температуры	25	30	750
2.5	Монтажные коробки	5	40	200
	Итого по п.2			2 365
3	Программное обеспечение			
3.1	ПТК «ПолиТЭР» на 100 точек	–	бесплатно	0
	Итого по п.3			0
	Итого затрат по таблице			23 925

Таблица 6.8 – Фактическая стоимость работ

№	Наименование оборудования, работ, материалов	Количество часов	Цена часа, руб.	Стоимость, руб.
1	Программирование контроллера	50	320	16 000
2	Сборка датчиков температуры	16	250	4 000
3	Монтажные работы	32	250	8 000
4	Пуско-наладочные работы	20	320	6 400
	Итого затрат по таблице			34 400

Итого фактическая стоимость затрат составила 58 325 рублей, что соответствует 37,358 Гкал в ценах 2014 года (1561,26 руб./Гкал). Таким образом, затраты на внедрение системы окупились приблизительно за 1 месяц эксплуатации в отопительном периоде 2014–2015 года от дополнительной экономии тепловой энергии относительно погодного регулирования.

Выводы к главе 6

1. Проведенные эксперименты на здании с практической точки зрения подтвердили следующие теоретические заключения, сделанные в главах 2 и 3:

– предложенный подход позволяет оценивать величину удельного расхода тепловой энергии на отопление здания на единицу объема на 1°C ;

– величина (сигнал) обобщенного возмущения имеет центрированный характер.

2. Проведенные эксперименты в целом подтвердили корректность и возможность практического применения моделей, предложенных в главе 3: динамической модели теплового режима здания и соответствующей ей модели обратной динамики теплового режима здания. Полученная амплитуда ошибки выходной величины – температуры воздуха в помещении – не превышает $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

3. В результате применения предложенного алгоритма управления тепловым режимом здания на базе модели обратной динамики были достигнуты следующие результаты:

– выполнена компенсация статической ошибки регулирования, характерной для регулирования по основному возмущающему воздействию (температуре наружного воздуха) с использованием температурного графика;

– уменьшена амплитуда суточных колебаний температуры воздуха в помещении, вызванная влиянием различных возмущений, воздействующих на объект с $\pm 1^{\circ}\text{C}$ до $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

4. В результате внедрения результатов диссертационной работы достигнута экономия потребляемого энергоресурса – тепловой энергии: при использовании базового управления экономия составила 10,35%, внедрение корректирующего контура позволило получить дополнительную экономию тепловой энергии в размере: 12,89% в отопительном периоде 2014–2015 гг.; 7,43% в отопительном периоде 2015–2016 гг.; 8,35% в отопительном периоде 2016–2017 гг.; 9,56% в среднем за 3 отопительных периода 2014–2017 г.

5. Фактическая стоимость затрат на внедрение предложенной в работе системы управления тепловым режимом здания составила 58 325 рублей, что соответствует 37,358 Гкал в ценах 2014 года. Это позволило окупить затраты на внедрение системы приблизительно за 1 месяц эксплуатации в отопительном периоде 2014–2015 года за счет дополнительной экономии относительно погодного регулирования.

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, воздействующих 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 качестве 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 3БВ 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 верификация на фактических данных эксплуатации корпуса 3 БВ 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 3БВ 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 $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллин, В. В. Модельно-упреждающее управление тепловым режимом здания [Текст] / В. В. Абдуллин // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника. – 2015. – Т. 15. – №3. – С. 33–39.

2. Абдуллин, В. В. Экспериментальное исследование сетей стандарта WirelessHART в системах автоматизированного энергоменеджмента зданий [Текст] / В. В. Абдуллин // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника. – 2012. – Выпуск 13. – №35 (294). – С. 110–114.

3. Александрова, Н. Д. и др. О настройках импульсных релейных регуляторов на малоинерционных объектах [Текст] / Н. Д. Александрова, Н. И. Давыдов // Теплоэнергетика. – 2002. – №5. – С. 54–57.

4. Амосов, Н. Т. Теплофикация и теплоснабжение [Текст] : учеб. пособие / Н. Т. Амосов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 237 с.

5. Анисимова, Е. Ю. Оптимизация температурных режимов общественно-административных и производственных зданий [Текст] / автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Е. Ю. Анисимова. – Челябинск : Южно-Уральский гос. университет, 2008. – 20 с.

6. Апарцев, М. М. Наладка водяных систем централизованного теплоснабжения [Текст] : Справочно-методическое пособие / М. М. Апарцев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 204 с.

7. Баскаков, А. П. и др. Регулирование температуры внутри жилых и общественных помещений – перспективный и эффективный метод энергосбережения [Текст] / А. П. Баскаков, А. П. Мартюшев, Г. Я. Захарченко, А. Н. Ведерников; источник : НПФ «Энтальпия» // Коммунальщик. – 2006. – №7. – С. 62.

8. Баскаков, А. П. и др. Теплотехника [Текст] / А. П. Баскаков, Б. В. Берг, О. К. Витт и др.; под ред. А. П. Баскакова. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.

9. Бизяев, М. Н. и др. Восстановление динамических искажений сигналов испытательно-измерительных систем методом скользящих режимов [Текст] / М. Н. Бизяев, А. Л. Шестаков // Известия РАН. Энергетика. – 2004. – №6. – С. 119–130.

10. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): Учебник для вузов [Текст] / В. Н. Богословский. – М.: Высш. школа, 1982. – 415 с.

11. Богуславский, Л. Д. и др. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха [Текст]: справ. пособие / Л. Д. Богуславский, В. И. Ливчак, В. П. Титов и др.; под ред. Л. Д. Богуславского и В. И. Ливчака. – М.: Стройиздат, 1990. – 624 с.

12. Булгакова, Р. И. и др. Классификация теплообменных аппаратов и области их применения [Текст] / Р. И. Булгакова, Г. А. Круглов, В. В. Старших // Достижения науки – агропромышленному производству. Материалы I международной научно-технической конференции / под ред. Н. С. Сергеева. – Челябинск: Челябинская государственная агроинженерная академия, 2011. – С. 156–158.

13. Бурцева, Ю. С. Беспойсковый метод расчета настроек регуляторов на минимум квадратичного критерия [Текст] / дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Ю. С. Бурцева. – М.: НИУ «МЭИ», 2014. – 156 с.

14. Гавей, О. Ф. и др. Поиск оптимальной температуры теплоносителя в системах теплоснабжения с целью сокращения затрат энергетических ресурсов [Текст] / О. Ф. Гавей, С. А. Голяк, В. И. Панферов // Архитектура. Строительство. Образование. – 2013. – №2. – С. 236–241.

15. Гершкович, В. Ф. Новые подходы к возрождению теплофикации [Текст] / В. Ф. Гершкович // АВОК. – 2008. – №7. – С. 4–9.

16. Голяк, С. А. и др. Совершенствование систем отопления с использованием кавитационного эффекта [Текст] / С. А. Голяк, Т. О. Гаврилова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2014. – Т. 2. №1. – С. 53–55.

17. Голяк, С. А. и др. Повышение теплоотдачи теплообменников за счет изменения профиля каналов [Текст] / С. А. Голяк, П. Н. Брянский // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2013. – Т. 2. – №71.– С. 239–241.

18. Голяк, С. А. и др. Снижение температуры теплоносителя в системах теплоснабжения России : за и против [Текст] / С. А. Голяк, О. Ф. Гавей // Энергосбережение. – 2012. – №3. – С. 42–47.

19. Горелик, С. И. и др. Прогнозирование случайных колебательных процессов на основе метода экспоненциального сглаживания [Текст] / С. И. Горелик, Л. С. Казаринов // Автоматика и Телемеханика. – 1994. – №10. – С. 27–34.

20. Глухов, В. Н. и др. Оптимизация управления тепловым режимом здания в условиях неопределенности [Текст] / В. Н. Глухов, Е. А. Алешин // Радиоэлектроника. Автоматика. Телемеханика. : Тем. сб. науч. тр. – Челябинск : ЮУрГУ, 1999.

21. Глухов, В. Н. Алгоритм определения параметров настройки технологического процесса по критерию параметрической нечувствительности [Текст] / В. Н. Глухов // Исследование и применение строительных материалов на основе местных вторичных ресурсов. – Челябинск : Уралниипромпроект, 1984.

22. Глухов, В. Н. Адаптивное управление процессом термообработки. – В материалах координационного совещания по проблемам адаптации XI семинара по адаптивным системам [Текст] / В. Н. Глухов. – Фрунзе : ИПУ АН СССР, 1982.

23. Глухов, В. Н. Оптимизация управления процессом термообработки изделий [Текст] / В. Н. Глухов // Известия ВУЗов. – Строительство. – 1994. – №12.

24. Глухов, В. Н. Метод оптимизации и энергосберегающие системы автоматизации многостадийных технологических процессов и процессов потребления тепловой энергии в зданиях [Текст] / В. Н. Глухов // Наука и технологии. тр. 23-й Рос. шк. – М. : Изд-во Рос. акад. наук, 2003. – С. 505–515.

25. Громов, Н. К. Городские теплофикационные системы [Текст] / Н. К. Громов. – М. : Энергия, 1974. – 253 с.

26. Гува, А. Я. Краткий теплофизический справочник [Текст] / А. Я. Гува. – Новосибирск : Сибвузиздат, 2002. – 300 с.

27. Давыдов, Н. И. и др. Определение параметров настройки ПИД-регулятора по переходной характеристике объекта управления [Текст] / Н. И. Давыдов, О. М. Идзон, О. В. Симонова // Теплоэнергетика. – 1995. – №10. – С. 17–22.

28. Даниленко, С. Н. и др. Расчет настройки САР, использующих дополнительный импульс из промежуточной точки объекта [Текст] / С. Н. Даниленко, Б. Я. Жихарев // ММСС. Серия УШ. Монтаж и наладка средств автоматизации и связи. – Выпуск 3(89). – БТНТИ, 1976.

29. Данилов, Н. И. Энциклопедия энергосбережения [Текст] / Н. И. Данилов, Я. М. Щелоков. – Екатеринбург : ИД «Сократ», 2002. – 352 с.

30. Данилов, Н. И. Основы энергосбережения : учебник [Текст] / Н. И. Данилов, Я. М. Щелоков ; под ред. Н. И. Данилова. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 564 с.

31. Довгун, В. П. Численные методы интегрирования уравнений динамических цепей [Электронный ресурс] // Компьютерное моделирование электронных цепей и устройств: курс лекций / В. П. Довгун. – Красноярск: [б. и.], (ИКИТ СФУ). – Лекция 6. – С. 57–67. – Режим доступа: <http://ikit.edu.sfu-kras.ru/files/au/1/lectures/6.pdf>, свободный.

32. Закиров, Д. Г. Энергосбережение [Текст]: учебное пособие / Д. Г. Закиров. – Пермь : Изд-во «Книга», 2000. – 308 с.

33. Зингер, Н. М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем [Текст] / Н. М. Зингер. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 320 с.

34. Зингер, Н. М. и др. Повышение эффективности работы тепловых пунктов [Текст] / Н. М. Зингер, В. Г. Бестолченко, А. А. Жидов. – М. : Стройиздат, 1990. – 188 с.

35. Казаринов, Л. С. Системы. Управление и познание [Текст]: аналитические очерки / Л. С. Казаринов. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – 496 с.

36. Казаринов, Л. С. Системные исследования и управление : когнитивный подход [Текст] : научно-методическое пособие / Л. С. Казаринов. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ : Издатель Т. Лурье, 2011. – 524 с.

37. Калентьева, Н. А. Эффективное сбережение энергоресурсов – одно из ключевых звеньев реформирования ЖКХ в России [Текст] / Н. А. Калентьева // Экономическая наука и практика: материалы междунар. науч. конф. (г. Чита, февраль 2012 г.). – С. 198–201.

38. Каменев, П. Н. и др. Отопление и вентиляция [Текст] : Учебник для вузов. В 2-х ч. Ч 1. Отопление. / П. Н. Каменев, А. Н. Сканава, В. Н. Богословский, А. Г. Егизаров, В. П. Щеглов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1975. – 483 с.

39. Кирьянов, Д. В. и др. Вычислительная физика [Текст] / Д. В. Кирьянов, Е.Н. Кирьянова – М. : Полибук Мультимедиа, 2006. – 352 с.

40. Ключев, А. С. и др. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие [Текст] / А. С. Ключев, А. Т. Лебедев, С. А. Ключев, А. Г. Товарнов ; под ред. А. С. Ключева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.

41. Копелович, А. П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов [Текст] / А. П. Копелович. – М. : Госуд. науч.-технич. изд-во лит-ры по черн. и цветн. металлургии, 1960. – 191 с.

42. Копьев, С. Ф. Теплофикация. Теплопотребление, тепловые сети [Текст] / С. Ф. Копьев. – М. ; Л. : Госстройиздат, 1940. – 280 с.

43. Круглов, Г. А. и др. Теоретические исследования взаимосвязи степени турбулизации потока с коэффициентом теплоотдачи [Текст] / Г. А. Круглов, В. В. Бакунин, М. В. Андреева // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2015. – №5. – С. 67–73.

44. Круглов, Г. А. и др. Теплообменник как средство обеспечения ГВС индивидуальных домов [Текст] / Г. А. Круглов, М. В. Андреева // Достижения науки – агропромышленному производству. Материалы LIII международной

научно-технической конференции / под ред. П. Г. Свечникова. – Челябинск: Челябинская государственная агроинженерная академия, 2014. – С. 26–30.

45. Круглов, Г. А. и др. Теплотехника [Текст]: Учебное пособие / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 208 с.

46. Ливчак, В. И. и др. Энергоэффективность пофасадного автоматического регулирования систем отопления [Текст] / В. И. Ливчак, А. А. Чугункин, В. А. Оленев // Водоснабжение и сантехника. – 1986. – №5.

47. Ливчак, В. И. Как повысить энергоэффективность потребления тепловой энергии при независимом операторе коммерческого учета [Текст] / В. И. Ливчак // Энергосвет. – 2013. – №1(26). – С. 43–54.

48. Лисиенко, В. Г. и др. Хрестоматия энергосбережения: Справочное издание: В 2-х книгах. Книга 1 [Текст] / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев; Под ред. В. Г. Лисиенко. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 688 с.

49. Лисиенко В. Г. и др. Хрестоматия энергосбережения: Справочное издание: В 2-х книгах. Книга 2 [Текст] / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев; под ред. В. Г. Лисиенко. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 768 с.

50. Лукас, В. А. Теория автоматического управления: учебник для вузов [Текст] / В. А. Лукас. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 416 с.

51. Лукашин, Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов [Текст] / Ю. П. Лукашин. – М.: Финансы и Статистика, 2003. – 416 с.

52. Манюк, В. И. и др. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: справочник [Текст] / В. И. Манюк, Я. И. Каплинский, Э. Б. Хиж, А. И. Манюк, В. К. Ильин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1988. – 432 с.

53. Новиков, С. И. Оптимизация автоматических систем регулирования теплоэнергетического оборудования [Текст]: учеб. пособие / С. И. Новиков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – Ч. 1. – 108 с.

54. Оппенгейм, А. В. и др. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – М.: Мир, 1980. – 552 с.

55. Панферов, В. И. и др. Об особенностях вывода уравнений регулирования систем централизованного теплоснабжения [Текст] / В. И. Панферов, С. В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – Т. 16, №1. – С. 21–30.

56. Панферов, В. И. и др. Низкотемпературные системы теплоснабжения в России [Текст] / В. И. Панферов, О. Ф. Гавей, С. А. Голяк, А. М. Уливанов // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2012. – №8 (128). – С. 58–59.

57. Панферов, В. И. и др. Возможности применения низкотемпературных систем теплоснабжения [Текст] / В. И. Панферов, О. Ф. Гавей, С. А. Голяк, А. М. Уливанов // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2012. – №3 (123). – С. 34–35.

58. Панферов, В. И. и др. Исследование и разработка алгоритмов регулирования систем теплоснабжения [Текст] / В. И. Панферов, Ю. Н. Денисенко // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2007. – Вып. 6. – №23. – С. 55–59.

59. Панферов, В. И. и др. Об оптимальном управлении тепловым режимом зданий [Текст] / В. И. Панферов, Е. Ю. Анисимова, А. Н. Нагорная // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2007. – Вып. 3. – №20. – С. 3–9.

60. Панферов, В. И. и др. К теории математического моделирования теплового режима зданий [Текст] / В. И. Панферов, А. Н. Нагорная, Е. Ю. Пашнина // Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2006. – Вып. 4. – №16 (69). – С. 128–133.

61. Панферов, В. И. Выбор и настройка автоматических регуляторов в системах теплоснабжения [Текст] / В. И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия Строительство и архитектура. – 2005. – Вып. 3. – №13. – С. 81–84.

62. Панферов, В. И. Идентификация тепловых режимов трубопроводных систем [Текст] / В. И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2005. – Вып. 3. – №13. – С. 85–90.

63. Панферов, С. В. Адаптивная система управления тепловым режимом зданий [Текст] / С. В. Панферов, А. И. Телегин, В. И. Панферов // Материалы VII

Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве». – Новокузнецк : СибГИУ», 2009. – С. 224–228.

64. Панферов, С. В. Структурно-параметрический синтез адаптивной системы управления температурным режимом отапливаемых зданий [Текст] / автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / С. В. Панферов. – Челябинск : Южно-Уральский гос. университет, 2011. – 20 с.

65. Ротач, В. Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования [Текст] / В. Я. Ротач. – М. : Энергия, 1973.

66. Ротач, В. Я. Автоматизация настройки систем управления [Текст] / В. Я. Ротач, В. Ф. Кузицин, А. С. Ключев и др. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.

67. Ротов, П. В. и др. О температурном графике центрального регулирования систем теплоснабжения [Текст] / П. В. Ротов, М. Е. Орлов, В. И. Шарапов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 5–6. – С. 3–12.

68. Ротов, П. В. и др. О температурном графике работы теплофикационных систем городов [Текст] / П. В. Ротов, М. Е. Орлов, М. А. Ротова, В. И. Шарапов // Энергосбережение и водоподготовка. 2012. № 6 (80). С. 39-42.

69. Ротов, П. В. и др. О работе систем теплоснабжения без излома температурного графика [Текст] / П. В. Ротов, М. Е. Орлов, В. И. Шарапов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 2. – С. 12–17.

70. Румянцев, Д. В. и др. Алгоритм упреждающего управления тепловыми процессами здания при комбинированной системе отопления [Текст] / Д. В. Румянцев, М. М. Тверской // Фундаментальные исследования. – 2015. – №2 (24). – С. 5371–5376.

71. Седнин, В. А. и др. Оптимизация параметров температурного графика отпуска теплоты в теплофикационных системах [Текст] / В. А. Седнин, А. В. Седнин, М. Л. Богданович // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2009. – №4.

72. Сканави, А. Н. и др. Отопление [Текст] : Учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению «Строительство», специальности 290700 / А. Н. Сканави, Л. М. Махов. – М. : АСВ, 2002. – 576 с.

73. Сканави, А. Н. и др. Переходные тепловые процессы в отопительных приборах [Текст] / А. Н. Сканави, Л. М. Махов, В. Э. Сварич // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1986. – №4. – С. 86–88.

74. Сканави, А. Н. Конструирование и расчет систем водяного и воздушного отопления зданий [Текст] / А. Н. Сканави. – изд. 2-е. – М.: Стройиздат, 1983. – 304 с.

75. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети [Текст] : Учебник для вузов. / Е. Я. Соколов. – 6-е изд., перераб. – М. : МЭИ, 1999. – 472 с.

76. Соренсон, Г. Обзор математических методов фильтрации и стохастического управления в динамических системах [Текст] / Г. Соренсон // Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / под ред. К. Т. Леондеса. – М. : Изд-во Мир, 1980. – Глава I. – С. 11–48.

77. Стефани, Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов [Текст] / Е. П. Стефани. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1972. – 376 с.

78. Табунщиков, Ю. А. и др. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий [Текст] / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – М. : АВОК–ПРЕСС, 2002. – 194 с.

79. Тверской, М. М. и др. Оптимальное управление температурным режимом здания при комбинированной системе отопления [Текст] / М. М. Тверской, Д. В. Румянцев // Наука ЮУрГУ. Секции технических наук. Материалы 67-й научной конференции. – Челябинск : Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2015. – С. 460–467.

80. Туркин, В. П. Водяные системы отопления с автоматическим управлением для жилых и общественных зданий [Текст] / В. П. Туркин. – М. : Стройиздат, 1976. – 135 с.

81. Туркин, В. П. и др. Автоматическое управление отоплением жилых зданий [Текст] / В. П. Туркин, П. В. Туркин, Ю. Д. Тыщенко. – М. : Стройиздат, 1987. – 189 с.
82. Фаликов, В. С. и др. Автоматизация тепловых пунктов: Справочное пособие [Текст] / В. С. Фаликов, В. П. Витальев. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
83. Четыркин, Е. М. Статистические методы прогнозирования [Текст] / Е. М. Четыркин. – М. : Статистика, 1977. – 200 с.
84. Чуев, Ю. В. и др. Прогнозирование количественных характеристик процессов [Текст] / Ю. В. Чуев, Ю. Б. Михайлов, В. И. Кузьмин. – М. : Советское радио, 1975. – 388 с.
85. Шайдуров, В. В. Многосеточные методы конечных элементов [Текст] / В. В. Шайдуров. – М. : Наука, 1989. – 288 с.
86. Шарапов, В. И. и др. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения [Текст] / В. И. Шарапов, П. В. Ротов. – М. : Изд-во «Новости теплоснабжения». – 2007. – 164 с.
87. Шарапов, В. И. и др. Технологии обеспечения пиковой нагрузки систем теплоснабжения [Текст] / В. И. Шарапов, М. Е. Орлов. – М. : Изд-во «Новости теплоснабжения». – 2006. – 208 с.
88. Шестаков, А. Л. Оценка достоверности результатов динамических измерений [Текст] / А. Л. Шестаков // Информационные устройства и системы управления: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск : ЧГТУ, 1994. – С. 63–68.
89. Шестаков, А. Л. Коррекция динамической погрешности измерительного преобразователя линейным фильтром на основе модели датчика [Текст] / А. Л. Шестаков // Известия высших учебных заведений. Раздел «Приборостроение» – 1991. – Т. 34. – №4. – С. 3–13.
90. Ширакс, З. Э. Теплоснабжение [Текст] / З. Э. Ширакс ; авториз. перев. с латыш. О. И. Шапиро. – М. : Энергия, 1979. – 225 с.
91. Шишкин, М. В. и др. Моделирование теплогидравлических систем в среде VisSim [Текст] / М. В. Шишкин, Д. А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия

«Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2004. – Вып.3. – №9 (38). – С. 120–123.

92. Шмидт, Дж. Линейные и нелинейные методы фильтрации [Текст] / Дж. Шмидт // Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / под ред. К. Т. Леондеса. – М. : Изд-во Мир, 1980. – Глава II. – С. 49–73.

93. Шнайдер, Д. А. Автоматизация управления системами теплоснабжения промышленных объектов при низкотемпературных режимах [Текст] / дис. канд. техн. наук: 05.13.06 / Д. А. Шнайдер. – Челябинск: Южно-Уральский гос. университет, 2003. – 159 с.

94. Шнайдер, Д. А. Автоматизированные системы упреждающего управления по критериям энергетической эффективности (в теплоэнергетических комплексах металлургических предприятий) [Текст] / дис. д-ра техн. наук: 05.13.06 / Д. А. Шнайдер. – Челябинск: Южно-Уральский гос. университет, 2011. – 345 с.

95. Шнайдер, Д. А. Адаптивный регулятор отопления здания на основе искусственных нейронных сетей [Текст] / Д. А. Шнайдер, М. В. Шишкин // Автоматизация и управление в технических системах : Сб. науч. тр. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2000. – С. 131–134.

96. Анализ эффективности потребления энергетических ресурсов и составление энергетического паспорта ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ) [Текст] : отчет о НИР [Текст] / Южно-уральский гос. университет; рук. Д. А. Шнайдер; исполн. : Д. А. Шнайдер, Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова, В. В. Абдуллин и др. – Челябинск, 2013. – 188 с.

97. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях [Текст]. – Взамен ГОСТ 30494–96; введ. 2013–01–01. – М.: Стандартинформ, 2013.

98. ГСССД 187–99. Таблицы стандартных справочных данных. Вода. Удельный объем и энтальпия при температурах 0...1000°С и давлениях 0,001...1000 МПа [Текст] / А. А. Александров, Б. А. Григорьев. – М. : Всеросс. Научн.-иссл. центр стандартизации, информации и сертификации сырья,

материалов и веществ Госстандарта РФ, 1999. – 39 с. – Деп. в ВНИЦСМВ 28.12.1999, №779-99кк.

99. Правила настройки ПИД регулятора [Электронный ресурс] // Новое в системе Wolfram Mathematica 9. Расширенная функциональность систем управления. – Режим доступа: <http://www.wolfram.com/mathematica/new-in-9/enhanced-control-systems/pid-tuning-rules.html>, свободный. – Загл. с экрана.

100. Приказ Министерства регионального развития РФ от 28 декабря 2009 г. №610 «Об утверждении Правил установления и изменения (пересмотра) тепловых нагрузок» [Электронный ресурс] // Система ГАРАНТ. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/12174237/>, свободный. – Загл. с экрана.

101. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий [Текст]. – Взамен СНиП II-3-79 ; введ. 2003–10–01. – М. : Госстрой России, 2004.

102. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий [Текст]. – Взамен СП 23-101-2000 ; введ. 2004–06–01. – М., 2004.

103. Федеральная служба государственной статистики – Центральная База Статистических Данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cbsd.gks.ru/>, свободный. – Загл. с экрана.

104. Abdullin, V. V. et al. Method of Building Thermal Performance Identification Based on Exponential Filtration [Текст] / V. V. Abdullin, D. A. Shnayder, L. S. Kazarinov // Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering 2013, WCE 2013. – 3–5 July, 2013. London, U.K. – pp. 2226–2230.

105. Abdullin, V. V. et al. Identification of Multistorey Building's Thermal Performance Based on Exponential Filtering [Текст] / V. V. Abdullin, D. A. Shnayder, L. S. Kazarinov // Transactions on Engineering Technologies. – Springer Netherlands, 2014. – pp. 501–512.

106. Abdullin, V. V. et al. Implementation of an advanced heating control system at the university academic building [Текст] / V. V. Abdullin, D. A. Shnayder // 2015 21st International Conference on Automation and Computing, ICAC 2015. – ; 11–12 September 2015. Glasgow; U.K.

107. Abdullin, V. V. et al. Model predictive control of building heating process using exponential filtration in harmonic basis [Текст] / V. V. Abdullin, D. A. Shnayder, L. S. Kazarinov // The 21st World-Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Proceedings. Volume II. – 8–11 July, 2017. Orlando, USA. – pp. 152–157.

108. Allgower, F. et al. Nonlinear predictive control and moving horizon estimation. An introductory overview [Текст] / F. Allgower, T. A. Badgwell, S. J. Qin, J. B. Rawlings, S. J. Wright // Advances in control: highlights of ECC '99. – In P. M. Frank (Ed.) – Berlin: Springer, 1999.

109. Arvastson L. et al. Maximum and design hot water loads in district heating substations [Текст] / L. Arvastson, S. Frederiksen, T. I. Hoel, J. Holst, A. Holtsberg, B. Svensson, J. Wollerstrand // 5-th International Symposium on Automation of District Heating Systems, 20–23 August 1995, Otaniemi, Espoo, Finland.

110. Åström, K. J. et al. Automatic tuning and adaptation for PID controllers - a survey [Текст] / K. J. Åström, T. Hägglund, C. Hang, W. K. Ho // Control Engineering Practice. – 1993. – August. – Volume 1. – Issue 4. – pp. 699–714.

111. Bemporad, A. et al. Model predictive control - New tools for design and evaluation [Текст] / A. Bemporad, N. L. Ricker, J. G. Owen // Proceedings of the 2004 American Control Conference, AAC. Vol. 6. – 30 June – 2 July, 2004, Boston, USA. – pp. 5622–5627.

112. Bitmead, R. R. et al. Adaptive Optimal Control, The Thinking Man's GPC [Текст] / R. R. Bitmead, M. Gevers, and V. Wertz. – New York : Prentice Hall, 1990.

113. Brown, R. G. Exponential Smoothing for Predicting Demand [Текст] / R. G. Brown. – Cambridge, Massachusetts: Arthur D. Little Inc, 1956. – 15 p.

114. Brown, R. G. Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series [Текст] / R. G. Brown. – Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1963. – 468 p.

115. Camacho, E. F. et al. Model Predictive Control in the Process Industry [Текст] / E. F. Camacho and C. Bordons. – Berlin : Springer-Verlag, 1995.

116. Camacho, E. F. et al. Model Predictive Control [Текст] / E. F. Camacho, C. Bordons. – Berlin : Springer-Verlag, 1998.

117. Clarke, D. W. *Advances in Model-Based Predictive Control* [Текст] / D. W. Clarke. – Oxford : Oxford University Press, 1994.

118. Corriou, J.-P. *Model Predictive Control* [Текст] / J.-P. Corriou // *Process Control : Theory and Applications* / J.-P. Corriou. – London : Springer-Verlag, 2004. – Chapter 16. – pp. 631–680.

119. De Keyser, R. M. C. et al. A comparative study of self-adaptive long-range predictive control methods [Текст] / R. M. C. De Keyser, Ph. G. A. Van de Velde, F. A. G. Dumortier // *Automatica*. – 1988. – Vol. 24. – No. 2. – pp. 149–163.

120. Dounis, A. I. et al. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review [Текст] / A. I. Dounis, C. Caraiscos // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2009. – No. 13. – pp. 1246–1261.

121. Dovrtel, K. et al. Multi-objective optimization of a building free cooling system, based on weather prediction [Текст] / K. Dovrtel, S. Medved // *Energy and Buildings*. – 2012. – 52. – pp. 99–106.

122. Frederiksen, S. et al. Thermostatic control of instantaneous water heaters in district heating substations [Текст] / S. Frederiksen, J. Wollerstrand // *5-th International Symposium on Automation of District Heating Systems*, 20–23 August 1995, Otaniemi, Espoo, Finland.

123. Frederiksen, S. et al. District heating house station for optimum operation [Текст] / S. Frederiksen, D. Nikolic, J. Wollerstrand // *25th Unichal Congress VIII-IDHC*, 4–6 June 1991, Budapest, Hungary.

124. Froisy, J. B. *Model predictive control : Past, present and future* [Текст] / J. B. Froisy // *ISA '93 International Conference, Exhibition & Training Program. Part 3 (of 3)*; 19–24 September, 1993, Chicago, USA. – Volume 48. – No. 2. – 1993, pp. 1249–1264.

125. Jang, J.-S. R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System [Текст] / J.-S. R. Jang // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. – 1993. – Volume 23. – Issue 3. – pp. 665–685.

126. Jazwinsky, A. H. Stochastic Processes and Filtering Theory [Текст] / A.H. Jazwinsky. – New York: Academic Press, 1970.

127. Mayne, D. Nonlinear Model Predictive Control: Challenges and Opportunities [Текст] / D. Mayne // Nonlinear Model Predictive Control. – Basel : Birkhäuser, 2003. – pp. 23–44.

128. Mayne, D. Q. Robust and stochastic model predictive control. Are we going in the right direction. [Текст] / D. Q. Mayne // Annual Reviews in Control. – 2016. – Vol. 41. – pp. 184–192.

129. Mayne, D. Q. Model predictive control: Recent developments and future promise [Текст] / D. Q. Mayn // Automatica. – 2014. – Vol. 50. – No. 12. – pp. 2967–2986.

130. Medved, S. et al. Parametric study on the advantages of weather-predicted control algorithm of free cooling ventilation system [Текст] / S. Medved, M. Babnik, B. Vidrih, C. Arkar // Energy. – 2014. – No. 73. – pp. 80–87.

131. Morari, M. et al. Model Predictive Control. Past, Present and Future [Текст] / M. Morari, J. H. Lee // Computers and Chemical Engineering. 1999. – No. 23. – pp. 667–682.

132. Moroşan, P.-D. et al. A distributed MPC strategy based on Benders' decomposition applied to multi-source multi-zone temperature regulation [Текст] / P.-D. Moroşan, R. Bourdaisa, D. Dumurb, J. Buissona // Journal of Process Control. – 2011. – 21. – pp. 729–737.

133. Oldewurtel, F. et al. Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control [Текст] / F. Oldewurtel, A. Parisio, C. N. Jones, D. Gyalistras, M. Gwerder, V. Stauche, B. Lehmannf, M. Morari // Energy and Buildings. – 2012. – 45. – pp. 15–27.

134. Oppenheim, A. V. et al. Discrete-time signal processing [Текст] / A. V. Oppenheim, R. W. Schafer, J. R. Buck. – Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 1999.

135. Prívará, S. et al. Building modeling as a crucial part for building predictive control [Текст] / S. Prívará, J. Cigler, Z. Váňa, F. Oldewurtel, C. Sagerschnig, E. Žáčková // Energy and Buildings. – 2013. – vol. 56. – pp. 8–22.

136. Qin, S. J. et al. An Overview of Nonlinear Model Predictive Control Applications [Текст] / S. J. Qin, T. A. Badgwell // Nonlinear Model Predictive Control. – Basel : Birkhäuser, 2003. – pp. 369–392.

137. Qin, S. J. et al. A survey of industrial model predictive control technology [Текст] / S. J. Qin, T. A. Badgwell // Control Engineering Practice. – 2003. – Vol. 11. – No. 3. – pp. 733–764.

138. Rawlings, J. B. Tutorial. Model predictive control technology [Текст] / J. B. Rawlings // Proceedings of the American Control Conference. – 1999. – Vol. 1. – pp. 662–676.

139. Sanchez, J. M. M. et al. Adaptive Predictive Control [Текст] / J. M. M. Sanchez, J. Rodellar. – Englewood Cliffs, N. J. : Prentice Hall, 1996.

140. Shestakov, A. L. Dynamic error correction method [Текст] / A. L. Shestakov // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1996. – Vol. 45. – No. 1. – pp. 250–255.

141. Shnayder, D. A. et al. A WSN-based system for heat allocating in multi-flat buildings [Текст] / D. A. Shnayder, V. V. Abdullin // 2013 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP) Proceedings. – 2–4 July, 2013. Rome, Italy. – pp. 181–185.

142. Shnayder, D. A. et al. Building Heating Feed-forward Control Based on Indoor Air Temperature Inverse Dynamics Model [Текст] / D. A. Shnayder, V. V. Abdullin, A. A. Basaláev // Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science 2014. Volume II. – 22–24 October, 2014. San Francisco, USA. – pp. 886–892.

143. Shnayder, D. A. et al. Building Heating Feed-Forward Control Method and Its Application in South Ural State University Academic Building [Текст] / D. A. Shnayder, V. V. Abdullin, A. A. Basaláev // Transactions on Engineering Technologies.

World Congress on Engineering and Computer Science 2014. – Springer Science+Business Media Dordrecht, 2015. – pp. 69–84.

144. Soeterboek, A. R. M. On the unification of predictive control algorithms [Текст] / A. R. M. Soeterboek, H. B. Verbruggen, P. P. J. van den Bosch, H. Butler // Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control. Part 6 (of 6). – 5–7 December 1990, Honolulu, Hawaii, USA. – Volume 3. – pp. 1451–1456.

145. Sorenson, H. W. Kalman Filtering Techniques, Advances in Control Systems. Vol. 3 [Текст] / H. W. Sorenson, C. T. Leondes (Ed.). – New York : Academic Press, 1966.

146. Wescott, T. PID Without a PhD [Текст] / T. Wescott // Embedded Systems Programming. 2000. – October. – pp. 86–108.

147. Zhou, R. W. et al. POPFNN : A pseudo outer-product based fuzzy neural network [Текст] / R. W. Zhou, C. Quek, // Neural Networks. – 1996. – Vol. 9. – Issue 9. – pp. 1569–1581.

148. IEC 61131-3:2013. Programmable controllers. Part 3. Programming languages [Электронный ресурс]. – Publ. date 2013–02–20. – Geneva: IEC, 2013. – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/4552>, платный. – Загл. с экрана. – Англ.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор
по административно-хозяйственной
работе и строительству
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»
В.А. Трофимычев
2017 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
Абдуллина Вильдана Вильдановича:

**«Управление тепловым режимом здания
с контуром отработки быстропеременных возмущений»**
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе исполняющего обязанности главного инженера Басарыгина Андрея Геннадьевича, начальника управления энергетики Циулина Александра Николаевича, заведующего кафедры автоматике и управления, д.т.н., проф. Казаринова Льва Сергеевича, созданная распоряжением проректора по административно-хозяйственной работе и строительству Трофимычева Вадима Александровича, рассмотрела результаты диссертационной работы Абдуллина В.В. на тему: «Управление тепловым режимом здания с контуром отработки быстропеременных возмущений».

Комиссия отмечает, что основные результаты диссертационной работы были получены Абдуллиным В.В. в рамках приоритетного направления развития «Энергосбережение в социальной сфере» (ПНР-1) Программы развития Национального исследовательского университета ЮУрГУ и Программы «5-100».

Комиссия утвердила следующие выводы и результаты работы:

1. Разработана и введена в эксплуатацию автоматизированная система управления теплопотреблением учебно-лабораторного корпуса ЗБВ ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». Разработанная система осуществляет:

- автоматическое управление потреблением тепловой энергии системой отопления здания по основному возмущающему воздействию – температуре наружного воздуха – с использованием температурного графика, с автоматической идентификацией параметров объекта управления и автоматической настройкой коэффициентов регулятора;
- автоматическое управление потреблением тепловой энергии системой отопления здания с учетом температуры воздуха в помещениях здания, тепловой мощности, подаваемой системой отопления, и упреждающей оценки обобщенного возмущения,

учитывающего комплексное влияние воздействующих на здание внешних и внутренних возмущающих факторов;

– автоматизированное дистанционное диспетчерское управление и контроль потребления тепловой энергии;

– контроль качества отопления здания по модели с использованием данных 25 датчиков температуры воздуха, установленных в различных помещениях здания.

2. В результате внедрения автоматизированной системы управления теплотреблением учебно-лабораторного корпуса ЗБВ с компенсацией тепловой инерции здания и действующих на него быстропеременных внешних и внутренних возмущений были достигнуты следующие показатели экономии энергоресурсов:

– на первом этапе внедрения при использовании базового канала управления по основному возмущающему воздействию экономия в первом отчетном периоде (отопительный период 2013–2014 г.) по сравнению с базовым периодом (отопительный период 2012–2013 г.) составила 10,35%, что соответствует 249,231 Гкал.

– на втором этапе внедрения во втором отчетном периоде дополнительная экономия от применения метода модельно-упреждающего управления, по сравнению с первым отчетным периодом (отопительный период 2013–2014 г.) составила:

- в отопительном периоде 2014–2015 г. – 12,89% (278,235 Гкал);
- в отопительном периоде 2015–2016 г. – 7,43% (160,518 Гкал);
- в отопительном периоде 2016–2017 г. – 8,35% (180,277 Гкал).

И.О. главного инженера ЮУрГУ



А.Г. Басарыгин

Начальник Управления энергетики ЮУрГУ



А.Н. Циулин

Заведующий кафедрой автоматики
и управления ЮУрГУ, проф., д.т.н.



Л.С. Казаринов

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ МАТЕРИАЛОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ КАНДИДАТСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ



об использовании в учебном процессе
материалов и результатов кандидатской диссертации

Абдуллина Вильдана Вильдановича:

«Управление тепловым режимом здания

с контуром отработки быстропеременных возмущений»

Комиссия в составе председателя – директора Высшей школы электроники и компьютерных наук, к.ф.-м.н., доцента Радченко Глеба Игоревича, членов комиссии: заведующего кафедрой автоматики и управления, д.т.н., профессора Казаринова Льва Сергеевича, профессора кафедры автоматики и управления, д.т.н., доцента Шнайдера Дмитрия Александровича составила настоящий акт о нижеследующем:

1. Материалы и результаты диссертационной работы старшего преподавателя кафедры автоматики и управления Абдуллина В.В. на тему: «Управление тепловым режимом здания с контуром отработки быстропеременных возмущений», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» в учебном процессе при подготовке:

– бакалавров по направлению 27.03.04 «Управление в технических системах»,

– магистров по направлению 27.04.04 «Управление в технических системах».

2. Результаты исследований, полученных Абдуллиным В.В. используются в курсах лекций и на практических занятиях по следующим дисциплинам: «Технические средства автоматизации и управления»; «Автоматизированные информационно-управляющие системы»; «SCADA-системы»; «Автоматизированные системы диспетчеризации и управления инженерной инфраструктурой ЖКХ».

Председатель комиссии:
Директор ВШЭКН, к.ф.-м.н., доц.

Г.И. Радченко

Члены комиссии:
Заведующий кафедрой АиУ, д.т.н., проф.

Л.С. Казаринов

Профессор кафедры АиУ, д.т.н., доц.

Д.А. Шнайдер

3. Установлена система контроля температуры воздуха в помещениях учебно-лабораторного корпуса ЗБВ. Производится контроль температуры в 25 точках (по 25 датчикам, установленным в помещениях учебно-лабораторного корпуса ЗБВ).

4. Разработаны алгоритмы анализа и обработки показаний датчиков температуры и параметров ИТП, алгоритмы коррекции уставок контура отопления по данным, получаемым от узла учета, ИТП и системы контроля температуры воздуха в помещениях.

5. Произведен подбор оборудования балансировки стояков отопления учебно-лабораторного корпуса ЗБВ. Монтаж оборудования запланирован на III квартал 2014 года.

Председатель комиссии:

Е.И. Леухин

Члены комиссии:

Р.Н. Ибрафилов

А.В. Скоробогатов

Л.С. Казаринов

Д.А. Шнайдер

ПРИЛОЖЕНИЕ 4 (СПРАВОЧНОЕ). ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ МИКРОПРОГРАММА КОНТРОЛЛЕРА

Микропрограмма контроллера Segnetics SMH-2Gi составлена на технологическом языке FBD (стандарт IEC 61131-3) в среде программирования SMLogix. В таблице П-4 представлены структуры отдельных блоков микропрограммы.

Таблица П-4. Блоки микропрограммы контроллера

№ п/п	Название блока	Описание	Рисунки
1	«Алгоритм коррекции»	контур компенсации	П-4.1
1.1	«Building_Ident»	алгоритм идентификации параметров q_h , T_z , T'_{ind} модели теплового режима здания	П-4.2
1.1.1	«L0 ⁻¹ »	оператор обратной динамики	П-4.3
1.1.1.1	«Фвх»	формирующий фильтр моментов входного сигнала (обращение инерционного звена)	П-4.4
1.1.1.1.1	« $\mu_i(k)$ »	формирование вектора моментов входных сигналов	П-4.5
1.1.1.2	«[P]x[μ]»	оператор умножения векторов / матриц (обращение инерционного звена)	П-4.6
1.1.1.3	«A»	матрица коэффициентов (обращение инерционного звена)	П-4.7
1.1.1.4	«y(t+tau _z)»	матрица коэффициентов (обращение чистого запаздывания)	П-4.8
1.2	«Building_Model»	модель теплового режима здания	П-4.9
1.2.1	«L0»	динамический оператор теплового режима здания	П-4.10
1.2.1.1	« $1 / (1 + T s)$ »	апериодическое звено	П-4.11
1.2.1.2	« $e^{-\tau s}$ »	звено чистого запаздывания	П-4.12
1.2.1.2.1	«PureDelay»	блок задержки во времени сигнала	П-4.13
1.3	«Sync + Contr»	блок управления синхронизацией и тактированием	П-4.14
1.3.1	«SyncGen»	генератор импульсов тактирования дискретной модели	П-4.15
1.3.2	«DelayedStart»	блок задержки запуска моделирования	П-4.16
1.4	«ПИД-регулятор»	блок регулятора корректирующего контура	П-4.17
1.4.1	«Filter_e»	фильтр входного сигнала регулятора (из библиотеки макрокоманд SMLogix)	П-4.18
1.4.2	«pid»	цифровой ПИД-регулятор с ограничением выхода и защитой от переполнения интегратора (из библиотеки макрокоманд SMLogix)	П-4.19
2	–	дискретные входные сигналы контроллера	П-4.20
3	–	аналоговые входные сигналы контроллера	П-4.21
4	–	формирование управляющих команд (аналоговых и дискретных выходов контроллера) исполнительным устройствам	П-4.22, П-4.23

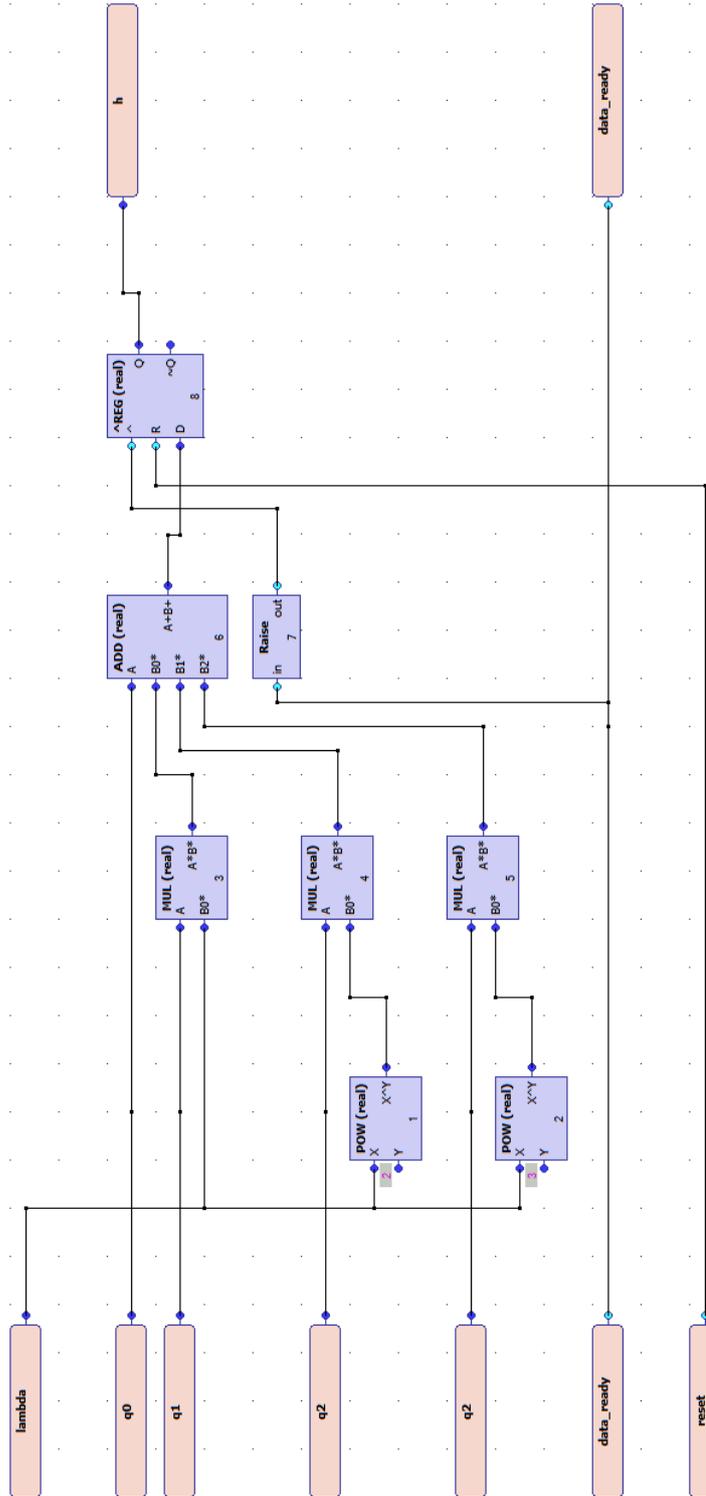


Рисунок П-4.2 – Блок «Building_Ident»

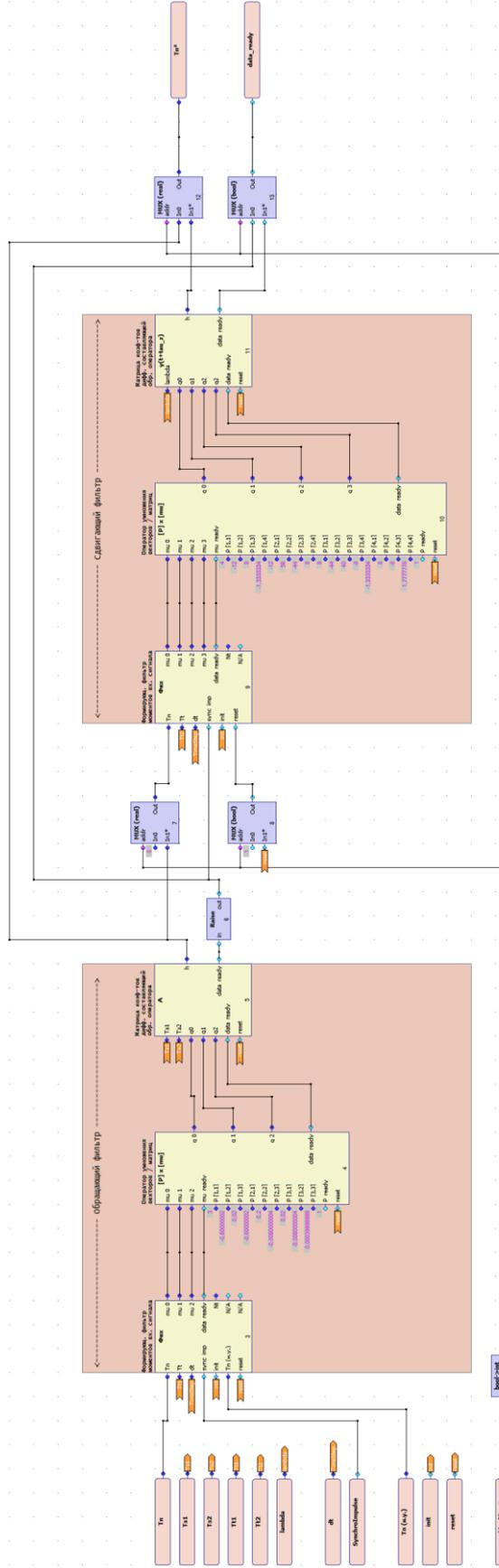


Рисунок П-4.3 – Блок «L0[^](-1)»

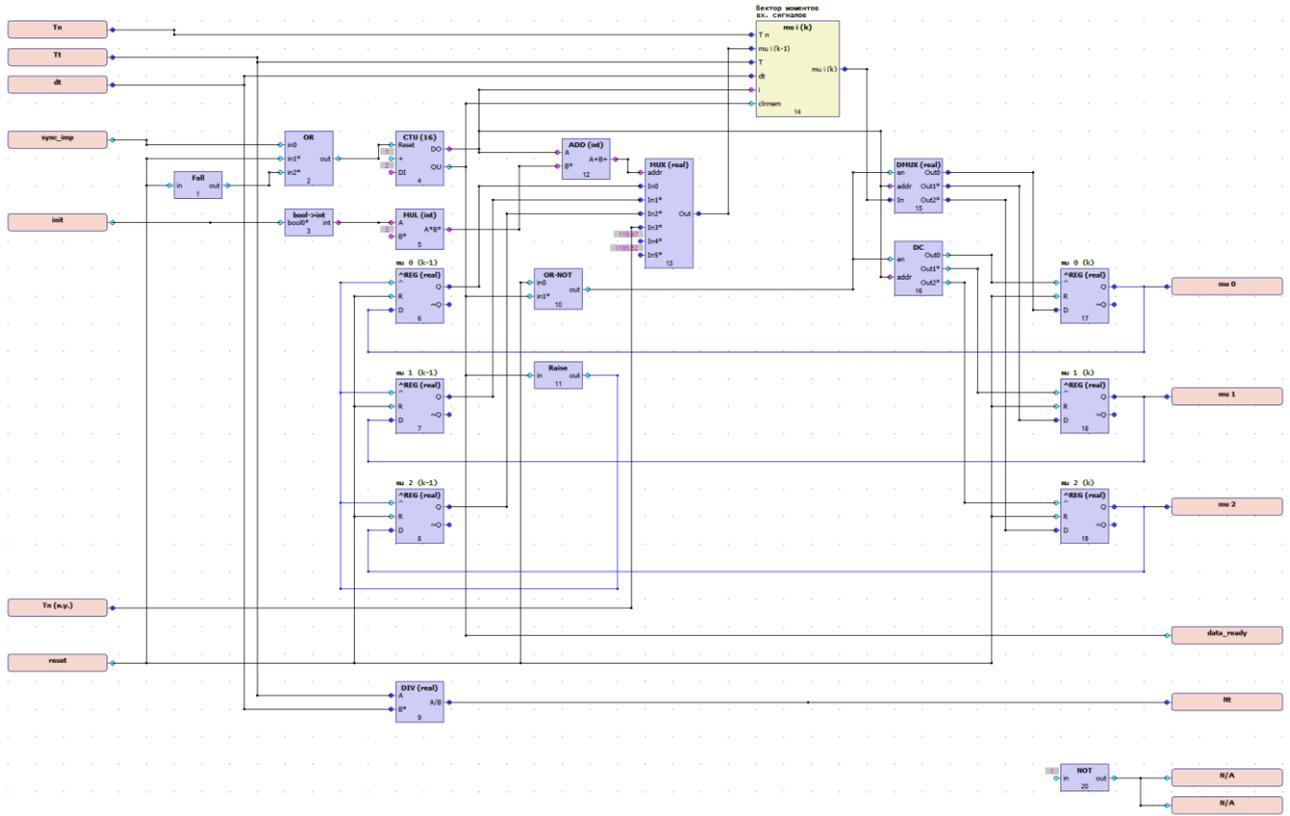


Рисунок П-4.4 – Блок «Фвх»

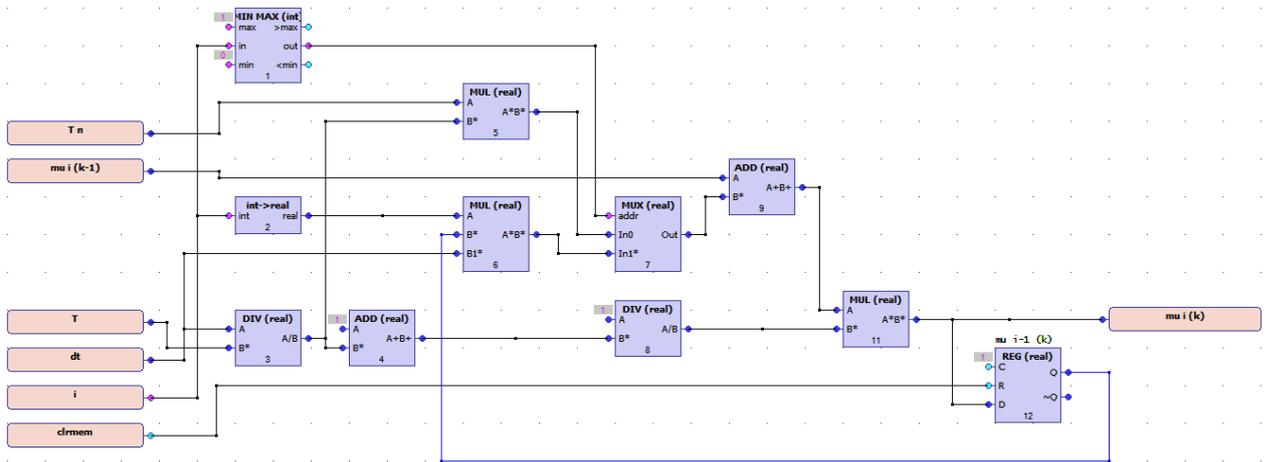


Рисунок П-4.5 – Блок « $\mu_i(k)$ »

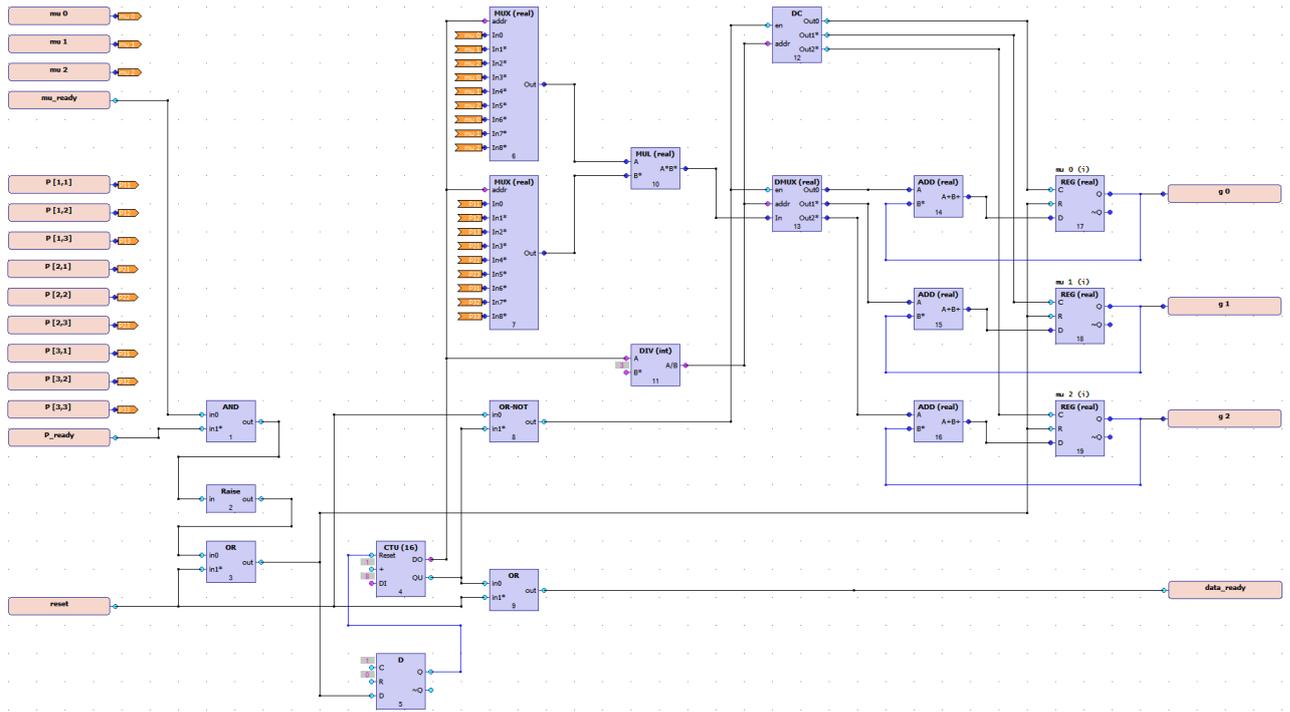


Рисунок П-4.6 – Блок «[P]x[mu]»

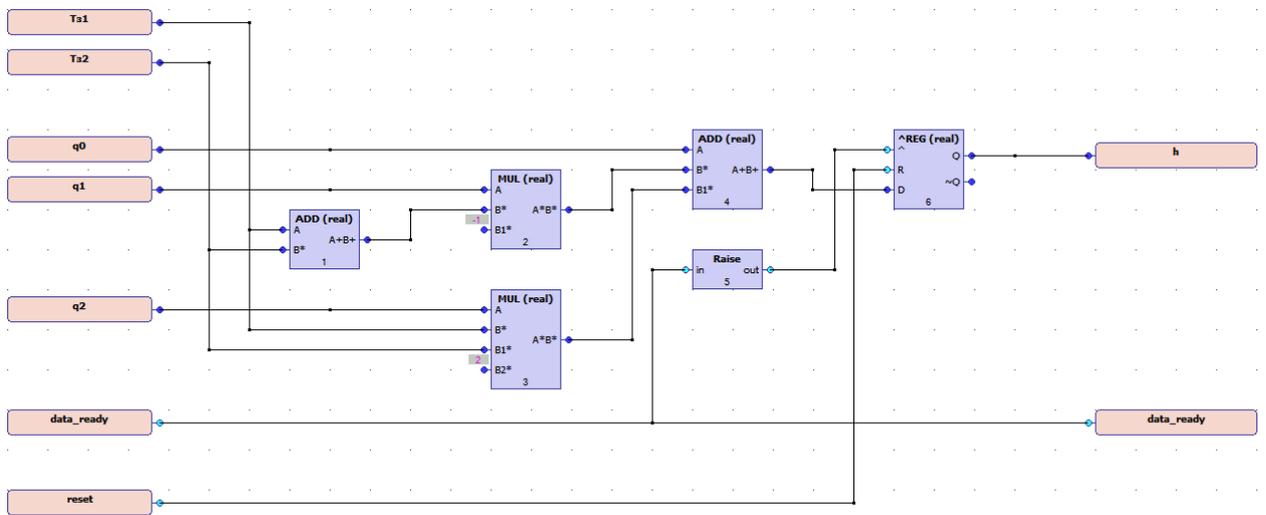


Рисунок П-4.7 – Блок «A»

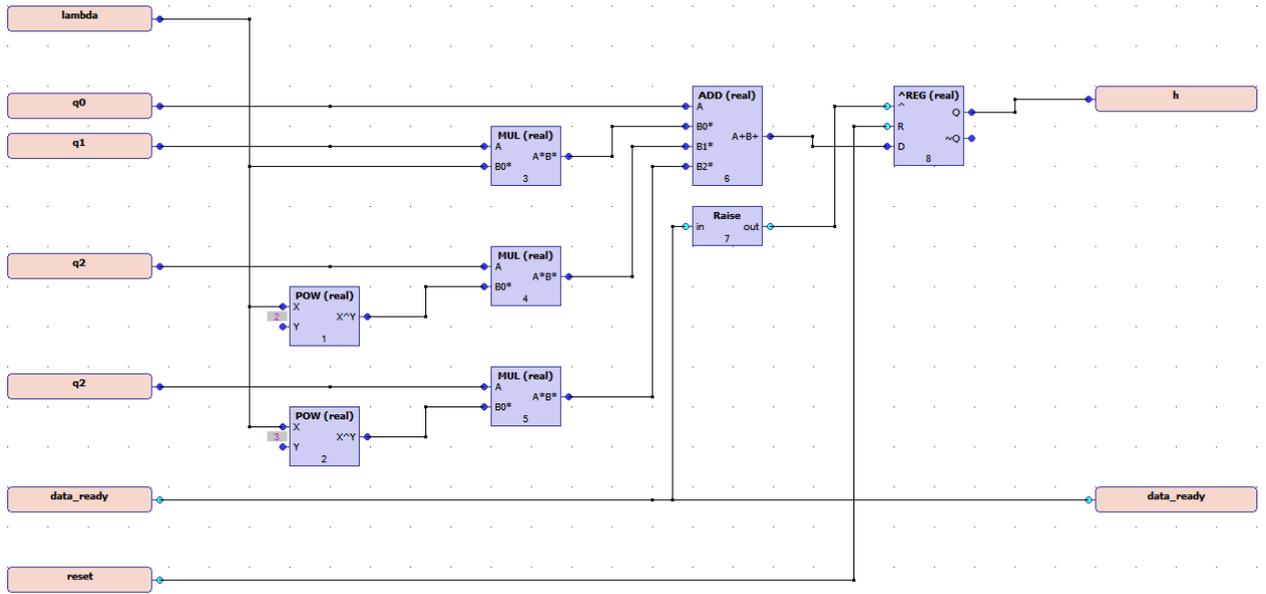


Рисунок П-4.8 – Блок « $y(t+\tau_z)$ »

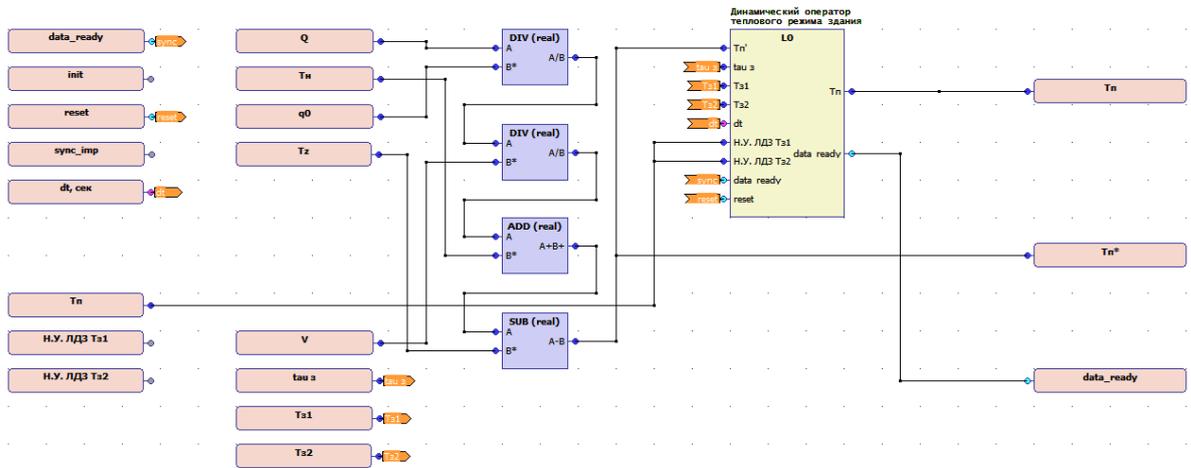


Рисунок П-4.9 – Блок «Building_Model»

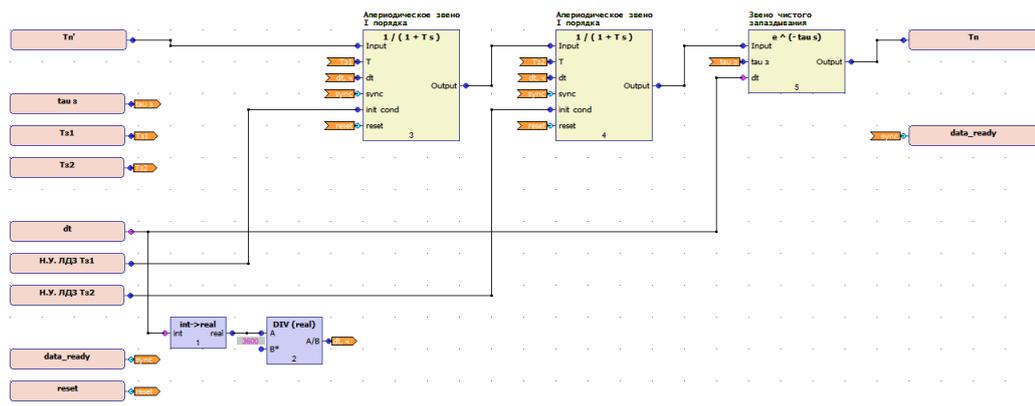


Рисунок П-4.10 – Блок «L0» из состава блока «Building_Model»

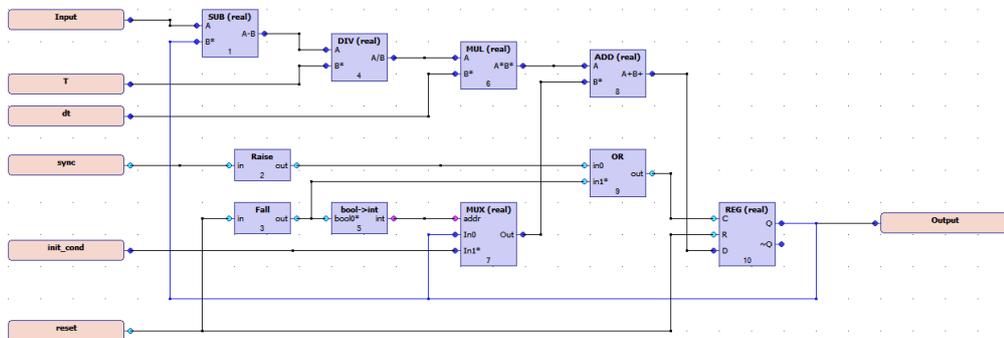


Рисунок П-4.11 – Блок « $1 / (1 + T s)$ » из состава блока «L0»

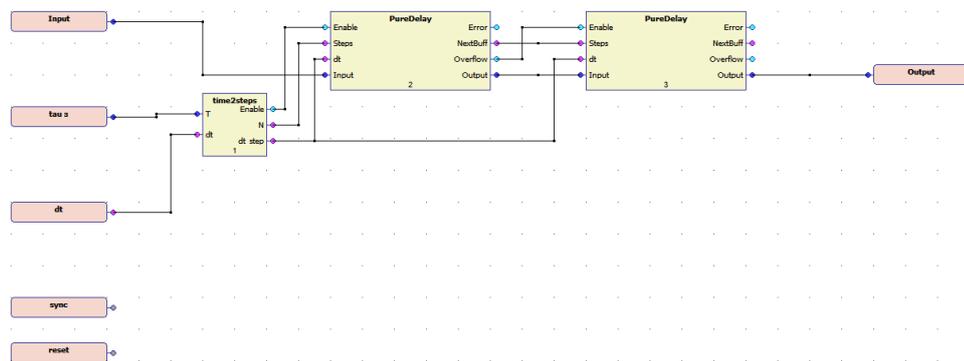


Рисунок П-4.12 – Блок « $e ^ (- tau s)$ » из состава блока «L0»

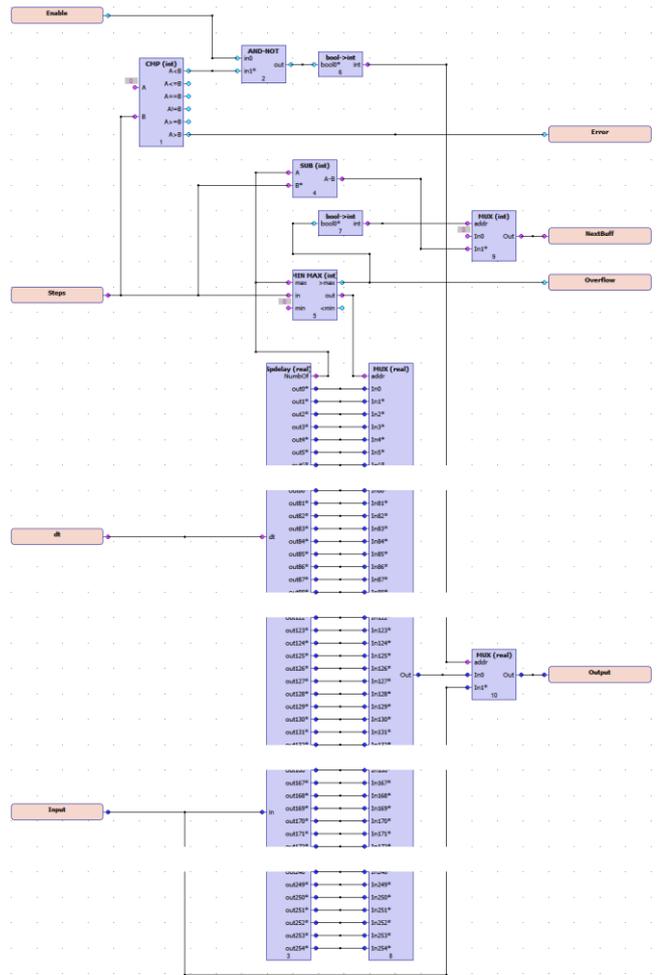


Рисунок П-4.13 – Блок «PureDelay» из состава блока «e ^ (- tau s)»

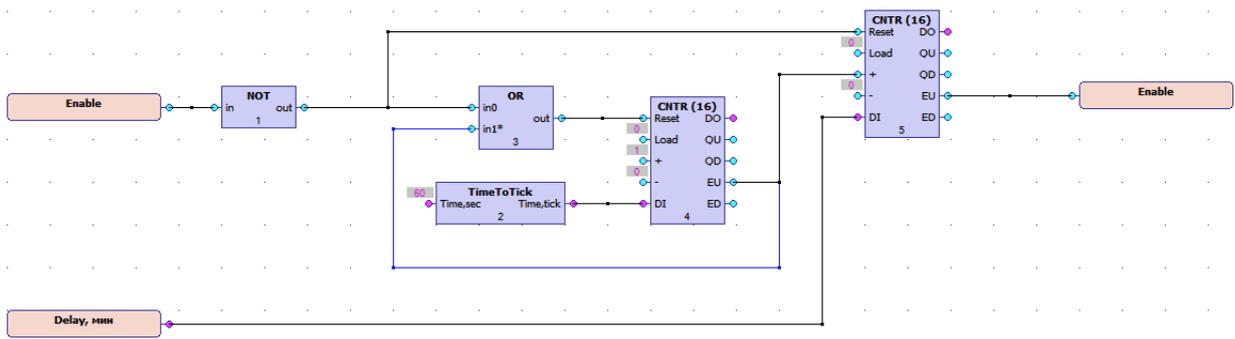


Рисунок П-4.16 – Блок «DelayedStart» из состава блока «Sync + Contr»

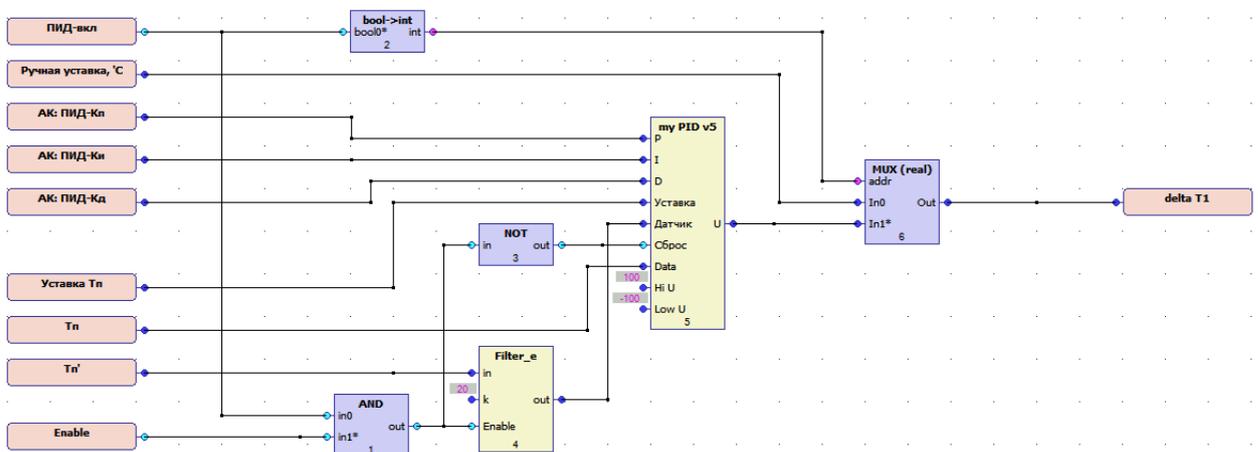


Рисунок П-4.17 – Блок «ПИД-регулятор»

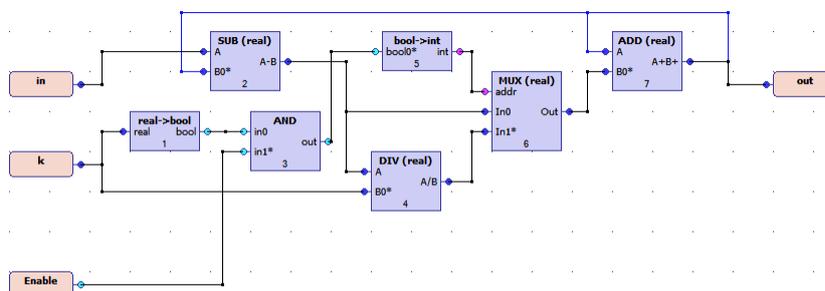


Рисунок П-4.18 – Блок «Filter_e» из состава блока «ПИД-регулятор»

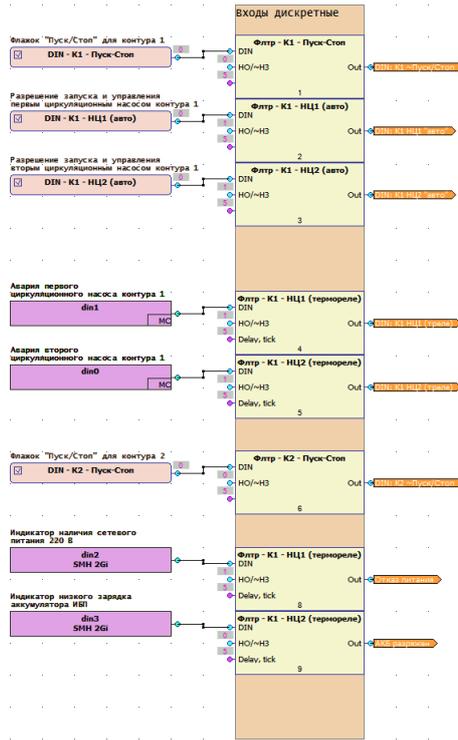


Рисунок П-4.20 – Дискретные входные сигналы контроллера

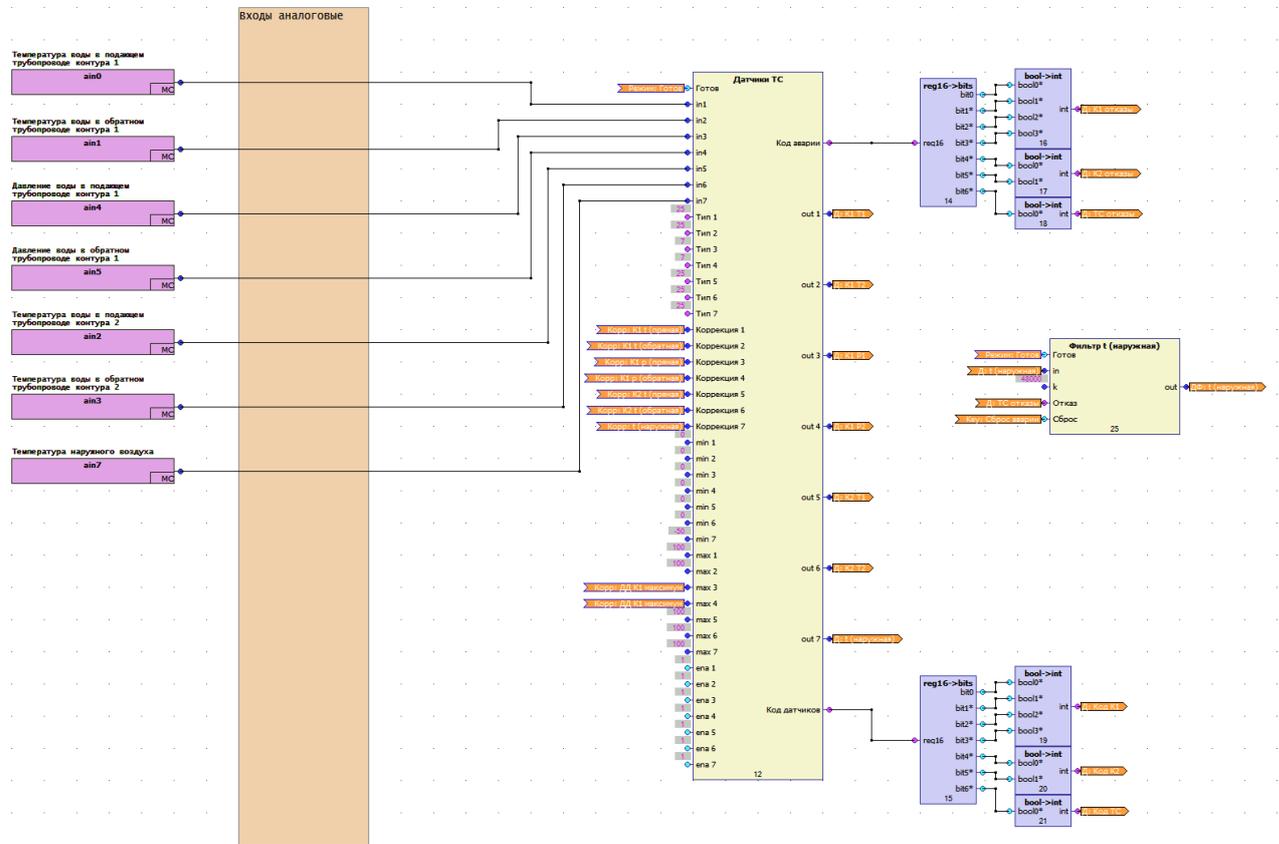


Рисунок П-4.21 – Аналоговые входные сигналы контроллера

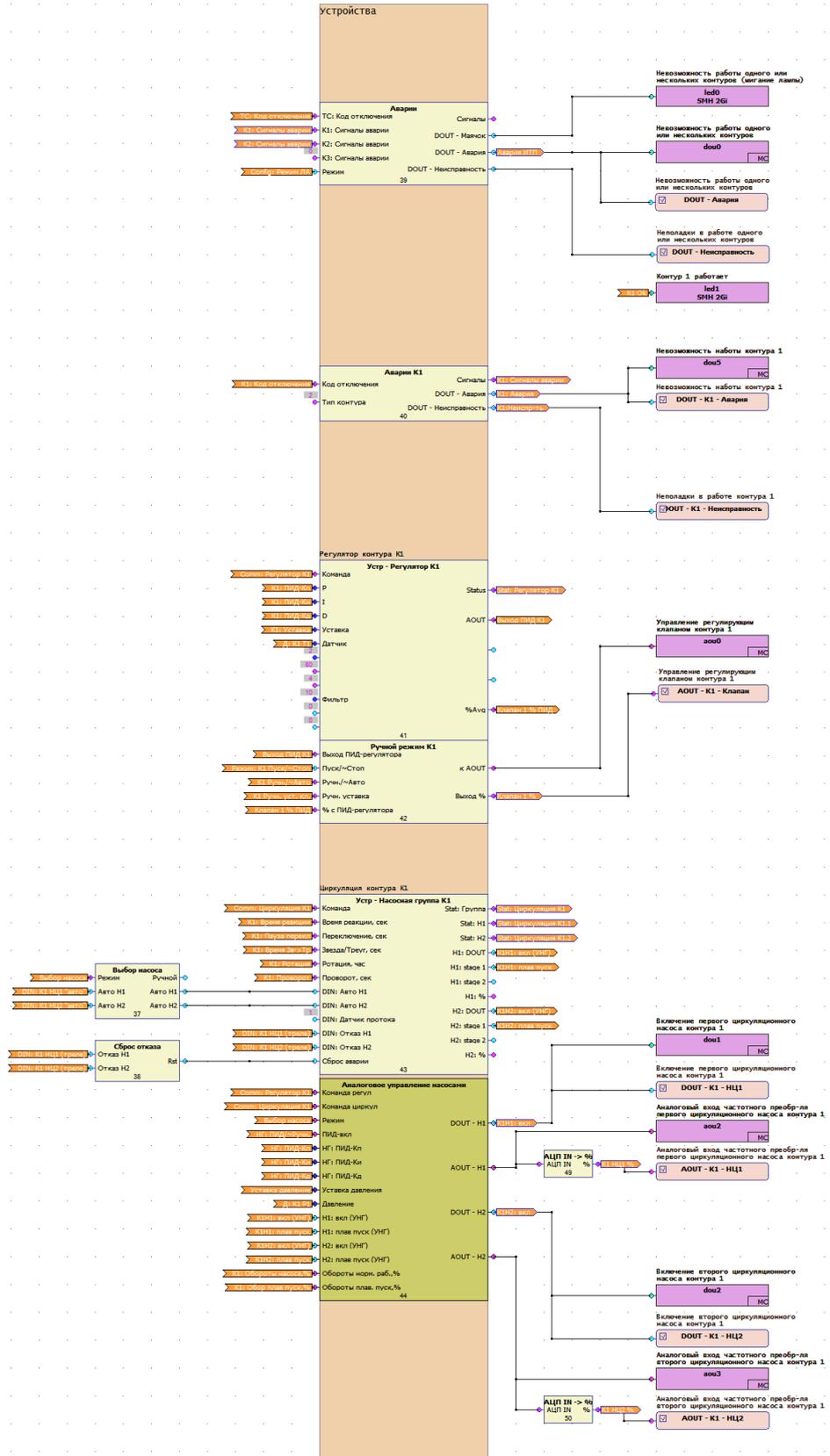


Рисунок П-4.22 – Аналоговые и дискретные выходы контроллера

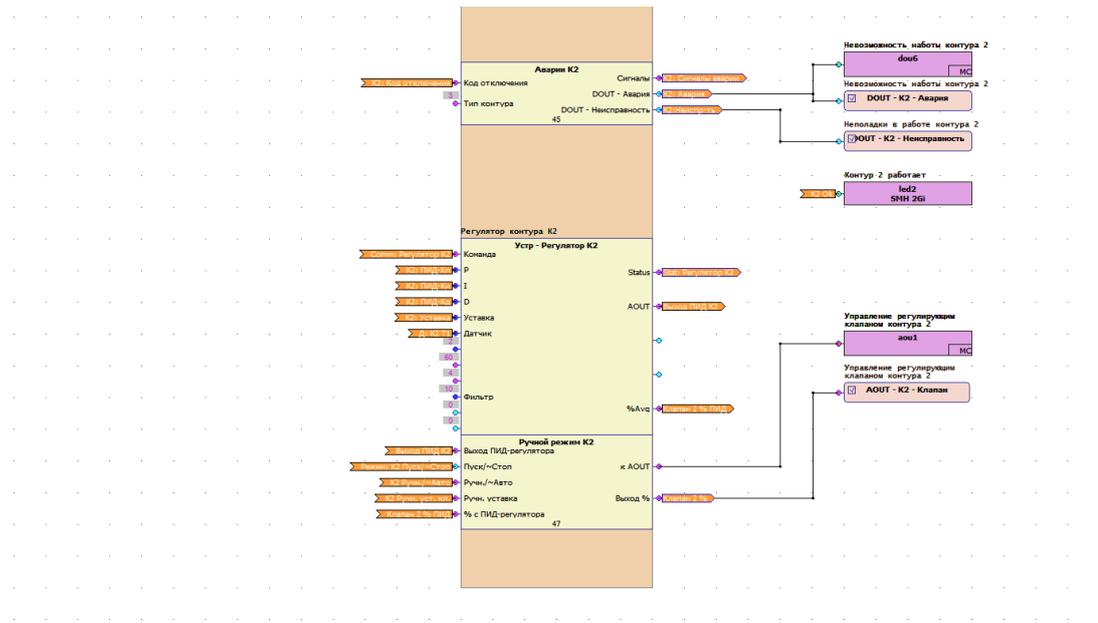


Рисунок П-4.22 – Аналоговые и дискретные выходы контроллера (продолжение)