

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Абдуллина Вильдана Вильдановича
на тему: «Управление тепловым режимом здания с контуром отработки
быстропеременных воздействий» по специальности 05.13.06 –
«Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (промышленность)»
на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Актуальность избранной темы

В последние три десятилетия энергетика обеспечивала рост благосостояния в мире примерно в равных долях за счет увеличения производства энергоресурсов и улучшения их использования. В развитых странах меры по энергосбережению составляют существенную долю экономического роста и позволяют снизить энергоемкость национального дохода. Повышение энергетической эффективности экономики посредством принятия системных мер по энергосбережению является центральной задачей Энергетической стратегии России, которая предусматривает проведение целенаправленной энергосберегающей политики. Для этого Россия располагает большим потенциалом организационного и технологического энергосбережения. Реализация освоенных в отечественной и мировой практике мер по экономии энергоресурсов осуществляется в соответствии с Федеральным законом от 23.11.2009 №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...». При этом свыше четверти потенциала энергосбережения сосредоточено в коммунально-бытовом секторе, а основным энергоресурсом в ЖКХ России является тепловая энергия, что обеспечивает высокую актуальность исследований и разработок в области повышения энергоэффективности коммунальной инфраструктуры в целом и систем отопления зданий в частности.

Снижение стоимости вычислительных ресурсов и электронной техники обеспечивает техническую возможность применения более сложных и эффективных алгоритмов управления системами теплоснабжения даже на уровне отдельно взятых тепловых пунктов. А повышающиеся требования к комфорту жилых, офисных и производственных помещений создают необходимость повышения качества регулирования теплоснабжения.

Рассматриваемая диссертационная работа посвящена разработке новых теоретических, методологических и технических решений, позволяющих повысить энергоэффективность и потребительское качество систем теплоснабжения зданий. А выдвинутые автором требования к высокой

степени автоматизации процессов настройки и эксплуатации, использованию доступных на практике данных, высокой автономности и низкой стоимости разрабатываемого решения позволяют рассчитывать на возможность массового внедрения. Тем самым можно отметить высокую актуальность выбранной темы диссертации.

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

Изучение технических требований к системам управления температурным режимом зданий и особенностей таких систем, а также глубокое изучение и анализ отечественной (103 источника) и зарубежной (45 источников) литературы по теплоснабжению и автоматическому управлению позволили автору диссертации получить объективное представление о состоянии современных исследований по теме работы, определить цель, задачи и методы исследования.

На основании результатов проведенного комплексного поэтапного исследования с применением современных методов, соответствующих каждому этапу исследования, были разработаны выносимые на защиту: двухконтурная структура системы управления отоплением здания, метод получения упреждающей оценки обобщенного возмущения на температуру воздуха в помещениях, прямая и обратная модели динамики теплового режима здания, а также блочная имитационная модель теплового пункта здания. Также на защиту вынесены результаты внедрения разработанной системы управления.

Метод получения упреждающей оценки обобщенного возмущения на температуру воздуха в помещениях обоснован корректным использованием уравнения теплового баланса при построении динамической модели теплового режима здания, а также применением динамических операторов для учета тепловой инерции процессов в отапливаемом здании с их последующей идентификацией и верификацией.

Корректность получения обратной модели динамики теплового режима здания обоснована глубоким и детальным исследованием синтеза обратных операторов на базе прогнозирующих экспоненциальных фильтров в полиномиальном базисе. Так, в работе приводятся детальные математические выкладки синтеза экспоненциальных фильтров с требуемыми характеристиками, предложены различные структуры обратных операторов на их основе. Также автором проведено исследование зависимости ошибки на выходе обратного оператора от различных параметров фильтра, модели и объекта и условий моделирования. Кроме того, выполнено сравнение

обратных операторов на базе фильтров в полиномиальном и полигармоническом базисах и показана существенно более высокая эффективность фильтров в полиномиальном базисе при работе с негармоническими сигналами процесса.

Блочная имитационная модель теплового пункта здания обоснована соответствием каждого из ее блоков конкретному оборудованию, устанавливаемому в тепловых пунктах: насосам, клапанам различного вида, делителям и смесителям потока, трубопроводам, теплообменникам и др. При этом блоки модели содержат математические выражения происходящих в них физических процессов. Связи между блоками представлены трехэлементными векторами, характеризующими состояние теплоносителя на границе блоков. Указанный подход к моделированию считаю в достаточной мере соответствующим возложенной на данную модель задачу отработки алгоритмов предложенной в работе системы управления.

Двухконтурная структура системы управления отоплением здания с базовым каналом управления по температуре наружного воздуха и упреждающим корректирующим контуром по температуре воздуха в помещениях обоснована корректным построением моделей прямой и обратной динамики, математическим моделированием с использованием данных эксплуатации реального объекта и последующей тестовой эксплуатацией и доводкой на объекте внедрения.

Результаты внедрения обоснованы достигнутым экономическим эффектом, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Результаты диссертационного исследования основаны на достаточном для получения достоверных результатов и выводов количестве материала. Обоснованность научных положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнения. Основные положения, выносимые на защиту, сформулированы четко. Методически правильный подход и тщательная проверка теоретических выводов математическим моделированием позволяют считать обоснованными выводы, которые полностью соответствуют сформулированным задачам. Практические рекомендации опираются на данные диссертационного исследования и являются обоснованными.

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

Научную новизну данной диссертационной работы составляют предложенные им двухконтурная структура системы управления тепловым режимом здания, метод получения упреждающей оценки обобщенного

возмущения на температуру воздуха в помещениях в реальном времени и модель обратной динамики теплового режима здания.

Разработанная автором двухконтурная структура системы управления тепловым режимом здания представлена в диссертации на рисунке 2.2 и содержит канал управления по температуре наружного воздуха и корректирующий контур с обратной связью по упреждающей оценке температуры воздуха в помещениях здания, формируемой по модели объекта в реальном времени с использованием сигнала обобщенного теплового возмущения. Корректирующий контур в предложенной структуре компенсирует влияние быстропеременных внутренних и внешних возмущающих воздействий на температуру воздуха в помещениях. Данная структура не является тривиальным решением и обладает необходимой научной новизной. Упоминание в литературе об использовании аналогичных структур систем управления тепловыми процессами с сигналом обобщенного теплового возмущения не найдено.

Предложенный в работе метод получения упреждающей оценки обобщенного возмущения на температуру воздуха в помещениях в реальном времени основан на использовании моделей прямой и обратной динамики теплового режима здания. Компенсация тепловой инерции отапливаемого здания в обратной модели динамики осуществляется с использованием прогнозирующих экспоненциальных фильтров в полиномиальном базисе. Прогнозирующие свойства экспоненциального сглаживания известны в науке и преимущественно применяются для фильтрации сложных шумов и выявления тенденций в стохастических процессах, что открыто указано в работе. Однако предложенная автором постановка задачи управления тепловыми процессами с использованием экспоненциальной фильтрации является новой, а ее реализация в виде предложенного метода – успешной и оригинальной, то есть данный метод также обладает достаточной научной новизной.

Разработанная модель обратной динамики теплового режима здания используется для формирования в реальном времени упреждающей оценки обобщенного возмущения и удельного расхода тепловой энергии на отопление здания в реальном времени. Модель использует только доступные на практике измеренные значения параметров теплового режима здания и содержит в своем составе обратные динамические операторы на базе экспоненциальных цифровых фильтров. Степень детализации позволяет относить данную модель к макромоделям и является достаточной для решения задачи модельной оценки параметров теплового режима здания. В модели применена декомпозиция процессов по скорости влияния на

температуру воздуха в помещении. Экспоненциальная фильтрация сигналов, применение декомпозиции в моделировании, моделирование в реальном времени сами по себе являются известными в науке, однако их использование автором для управления отоплением здания является новым, в результате чего была получена модель, обладающая достаточной научной новизной.

В своем исследовании автор опирается на достоверные данные приборных измерений, получаемые с изучаемого объекта посредством архивации в SCADA-систему. При использовании синтетических данных и сигналов на определенных этапах исследования автор приводит структуру таких сигналов и данных и объясняет свой выбор с точки зрения их соответствия конкретным обрабатываемым свойствам реального объекта. Приведенные в работе математические уравнения теплового режима здания даны со ссылками на авторитетные научные источники, их достоверность не вызывает сомнения. Сделанные в работе теоретические заключения обладают логикой и последовательностью изложения.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Авторские научные результаты теоретического, методологического, эмпирического и технического характера, полученные Абдуллиным В.В. в рамках его диссертационной работы, направлены на повышение качества регулирования и эффективности систем теплоснабжения. Полученные автором выводы, результаты и предложения могут найти широкое применение в области теплоснабжения жилищно-коммунального хозяйства, теплоснабжения промышленных зданий, а также вносят определенный вклад в развитие систем энергоэффективного управления теплоснабжением.

С научной точки зрения автором получены формулы и алгоритмы для оценки в реальном времени совокупного действия возмущений на тепловой режим здания, предложен метод их компенсации в системах управления теплоснабжением. Также значение для науки имеет использование экспоненциальной фильтрации для формирования упреждающих оценок сигналов и обращения динамических операторов.

С практической точки зрения полученные в ходе диссертационного исследования результаты позволяют улучшить температурный режим помещений и повысить энергоэффективность систем отопления зданий. Результаты авторских разработок реализованы в виде программно-технического комплекса, включающего имеющиеся на рынке технические средства серийного производства и прикладное программное обеспечение авторской разработки для промышленных контроллеров. Данный

программно-технический комплекс является законченным решением и готов к использованию на объектах теплоснабжения, в том числе в условиях массового внедрения.

В рамках диссертационной работы выполнено практическое внедрение разработанной системы управления тепловым режимом здания в 10-этажном учебно-лабораторном корпусе ЗБВ Южно-Уральского государственного университета, что является на наш взгляд достаточным для подтверждения достоверности полученных научных и практических результатов.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты и выводы, сформулированные в диссертационном исследовании Абдуллина В.В., могут быть использованы в практической деятельности специалистов по автоматизации технологических процессов при разработке новых методов и систем управления тепловым режимом зданий.

Формирование в реальном времени упреждающей оценки обобщенного возмущения теплового режима здания в соответствии с предложенным автором методом является основанием для использования данной оценки в качестве дополнительного критерия эффективности используемых на практике систем управления, а также в качестве пути выявления имеющихся проблем в системе отопления здания.

Разработанная автором блочная имитационная модель теплового пункта может быть использована при проектировании систем отопления зданий, автоматизированных тепловых пунктов, систем управления теплоснабжением в качестве удобного средства моделирования теплогидравлических процессов, инструмента подбора оборудования и инструмента отработки алгоритмов управления.

Результаты исследования прогнозирующих свойств экспоненциальных фильтров могут быть использованы при проектировании и разработке систем управления технологическими процессами и в ходе дальнейших исследований по данной тематике.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность

Структура диссертационной работы построена традиционно. Диссертация имеет: введение, шесть глав с собственными подразделами и выводами, основные выводы и результаты по итогам работы в целом, список цитируемой литературы из 148 наименований, 4 приложения. Диссертация изложена на 184 страницах машинописного текста (без учета приложений),

иллюстрирована 86 рисунками и 11 таблицами. Основные положения и выводы работы отражены в 25 публикациях, включая 4 статьи – в научных рецензируемых журналах, входящих в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК, 6 статей – в зарубежных изданиях с индексацией в международных системах цитирования Scopus и Web of Science, 1 написанную в соавторстве монографию.

Во введении приводится общая характеристика диссертации, включая актуальность, цели и задачи исследования, его новизну, научную и практическую значимость, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, и результаты апробации работы.

В первой главе автор формулирует технические требования к системам управления температурным режимом здания, производит обзор научной литературы на тему работы, показывает актуальность проблемы энергоэффективного управления температурным режимом зданий и помещений, формулирует цели и задачи диссертационного исследования. Обзор литературы включает современные исследования в области математического моделирования теплового режима здания, повышения эффективности систем отопления, автоматического управления параметрами микроклимата зданий. Кроме того, в обзор включены классические издания по теплотехнике, теплофикации и отоплению, равно как и по упреждающему управлению, управлению на базе прогнозных моделей (MPC), прогнозирующим фильтрам, оптимальной фильтрации.

Во второй главе диссертации разрабатывается структура системы упреждающего управления тепловым режимом здания, описан процесс синтеза обратных операторов для формирования упреждающих оценок сигналов на базе экспоненциальных фильтров, производится исследование свойств обратных операторов на базе экспоненциальных фильтров. Автором предлагаются различные варианты структуры обратных операторов для линейных и нелинейных динамических операторов и звеньев запаздывания, а также рассматривается возможность их комбинирования для повышения точности выходного сигнала. Данная глава снабжена большим количеством графического материала с наглядным представлением результатов моделирования и построенными автором экспериментальными зависимостями, что является несомненным достоинством работы. Другим достоинством является высокий уровень математических выкладок.

В третьей главе описан процесс синтеза модели теплового режима здания, включая синтез структуры модели, описание метода декомпозиции входных сигналов, параметрическую идентификацию модели и ее верификацию с использованием реальных данных эксплуатации. Для

полученной динамической модели синтезирована обратная модель динамики, содержащая обратные динамические операторы, синтез которых описан в главе 2. Соответствие прямой и обратной моделей подтверждено математическим моделированием. Кроме того, в данной главе автором разрабатывается блочная модель теплового пункта здания, имеющая достаточно высокую детализацию и применяемая в ходе диссертационного исследования для отработки разрабатываемой системы управления тепловым режимом здания. Блочная структура данной модели и соответствие блоков конкретному оборудованию являются ее достоинствами.

В четвертой главе рассматривается параметрическая настройка разработанной системы управления тепловым режимом здания. Процесс настройки осуществляется в пять этапов и включает выполняемые последовательно процедуры параметрической идентификации и настройки моделей и регуляторов. Каждый из описанных этапов может быть алгоритмизирован и выполняться в полностью автоматическом режиме, что является важным достоинством работы с учетом ориентирования ее результатов на возможность массового внедрения. Также в данной главе осуществляется эмпирический синтез температурного графика подачи, оптимального по критерию соответствия температуры воздуха в помещениях желаемому уровню.

В пятой главе рассмотрены технические аспекты реализации системы управления тепловым режимом здания. В данной главе приведены общая структура комплекса технических средств и пользовательский интерфейс системы управления тепловым режимом здания. Предложенные в главах 2, 3, 4 методы, модели и алгоритмы реализованы в виде управляющей программы для промышленного контроллера. Также в данной главе рассмотрен распределенный сбор данных о температуре воздуха в помещениях на базе проводных и беспроводных датчиков температуры. Результаты главы 5 показывают глубокую техническую проработку предлагаемых в работе решений и характеризуют автора не только как исследователя, но и как хорошего специалиста-практика, что является важным в технических науках.

В шестой главе автор описывает объект внедрения разработанной системы и особенности практической реализации результатов исследования, а также подтверждает достоверность полученных результатов модельными экспериментами на реальных данных эксплуатации. Кроме того, в данной главе производится расчет экономического эффекта внедренной системы. В качестве достоинства рассматриваемого диссертационного исследования следует отметить расчет экономического эффекта на основе достаточно длительного периода эксплуатации (2014–2017 гг.), что позволяет

практически нивелировать влияние случайных факторов на эффективность функционирования системы.

Замечания по работе:

1. В работе в качестве примера приведен ход разложения сигнала на входе обратного оператора до пятого порядка и показан полученный полином при $\tau_d \neq 0$ (2.16) и при $\tau_d = 0$ (2.17), что можно считать излишним, т.к. ранее в работе представлен общий вид (2.15) таких полиномов.

2. В описании научной новизны и значимости работы, приведенной во введении диссертации, и в аналогичном пункте реферата упоминается, что «модель обратной динамики теплового режима здания используется для формирования упреждающей оценки обобщенного возмущения и величины удельных теплотерь здания», однако исходя из содержания параграфа 3.1 диссертации модель обратной динамики теплового режима здания применяется для формирования двух величин: Q_z^* – упреждающей оценки обобщенного возмущения и q_h – удельного расхода тепловой энергии на отопление здания (стр. 84 – 86).

3. В ходе идентификации модели теплового режима здания предлагается переход от линейных операторов 3-го порядка к операторам 2-го порядка со звеном запаздывания: выражения (3.17) и (3.18) для оператора медленных процессов, выражения (3.21) и (3.22) для оператора быстрых процессов. При этом в тексте диссертации не показаны преимущества перехода от линейной системы к нелинейной.

4. В состав имитационной модели теплового режима здания, описанной в параграфе 3.3, включены элементы с распределенными параметрами (трубопроводы, эквивалент отопительного прибора). При этом в работе рассматривается управление тепловым режимом здания в целом. В этой связи использование элементов с распределенными параметрами видится излишним для решаемой данной моделью задачи отработки алгоритмов управления.

5. Разработанная автором двухконтурная структура системы управления тепловым режимом здания содержит канал управления по температуре наружного воздуха и корректирующий контур с обратной связью по упреждающей оценке температуры воздуха в помещениях здания. Однако в работе не рассматривается влияние на эффективность управления прогнозного (или упреждающего) значения температуры наружного воздуха, возможное колебание которого может быть в существенно большем диапазоне, чем возможное изменение температуры воздуха в помещениях здания.

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

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

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


01.12.2017

Султангузин Ильдара Аидарович
Подпись
удостоверяю
начальник управления по
работе с персоналом



Подпись Султангузина И.А. заверяю:

Начальник управления по работе с кадрами
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»



Савин Никита Георгиевич

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., 14
тел./факс (495) 362-72-17, email: sultanguzinia@mpei.ru