

На правах рукописи



Николаева Татьяна Владимировна

Модели и алгоритмы энергоэффективного функционирования  
информационной системы управления отоплением

Специальность 05.11.16 «Информационно-измерительные и управляющие  
системы (в промышленности)»

Автореферат диссертации на соискание  
учёной степени кандидата технических наук

Тула – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

**Научный руководитель:**

Доктор технических наук, профессор  
Лукашенко Анатолий Викторович

**Официальные оппоненты:**

Привалов Александр Николаевич,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», профессор кафедры «Информатика и информационные технологии»

Кузнецов Вячеслав Геннадьевич,  
кандидат технических наук, доцент,  
АО «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова», начальник бюро

**Ведущая организация:**

ООО «АТМ Технолоджи», г. Тула

Защита состоится «13» ноября 2018 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.07 при ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, 9 – 101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» ([http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-07/Nikolaeva\\_TV/](http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-07/Nikolaeva_TV/)).

Автореферат разослан «20» сентября 2018 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Иванов  
Юрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Отопление замкнутых помещений объектов теплотребления, к которым относятся жилые, офисные, производственные здания и иные сооружения социального и промышленного назначения, реализуется с помощью оборудования контура отопления. Процесс отопления происходит посредством обмена тепловой энергией между теплоносителем в радиаторах контура отопления с окружающей воздушной массой. Функционирование контура отопления регулируется контроллером информационно-измерительной системы автоматического управления (ИИСАУ). ИИСАУ предназначена для поддержания заданного перепада температуры и давления теплоносителя между подающим и обратным трубопроводами, в соответствии с нормами и нуждами объекта теплотребления.

Более 67 % всей производимой в мире электроэнергии потребляется электрическими двигателями. Основная часть (75 %) расходуемой в РФ энергии на создание необходимых условий жизнедеятельности человека идёт на нужды систем отопления, функционирование которых, в основном, обеспечено двигателями насосов. При этом удельный расход электроэнергии на отопление составляет  $430 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ , в то время как в развитых странах этот показатель в 2.5 раза ниже. Наличие такого разрыва в части потребления ресурсов указывает на большой потенциал экономии энергии. Повышение энергоэффективности работы ИИСАУ отоплением требует сокращения энергопотребления на обеспечение (создание и поддержание) в контуре отопления энергии, необходимой объекту теплотребления. В связи с этим, исследование возможностей и путей совершенствования существующих ИИСАУ, улучшение их технических, эксплуатационных и экономических характеристик имеет огромное значение для промышленности. Разработка новых принципов построения ИИСАУ, создание новых научно-обоснованных технических и технологических решений актуальна и имеет существенное значение, в целом, для развития страны.

В применяемых ИИСАУ обеспечение в контуре отопления энергии, требуемой объекту теплотребления, реализуется таким энергопотребляющим оборудованием, как отопительный насос и смесительный клапан. Насос предназначен для нагнетания горячей воды из котлового контура в контур отопления. Параметры функционирования насоса определяются заводскими настройками, они могут быть откорректированы в приборе управления (ПУ) насосом только до момента запуска и являются фиксированными в процессе его эксплуатации. Смесительный клапан необходим в случае превышения температуры воды в подающем трубопроводе заданного значения, и выполняет подмешивание в него теплоносителя из обратного трубопровода. Такие принципы работы насоса и клапана отрицательно сказывается на функционировании существующих ИИСАУ контуром отопления в части уменьшения срока службы трубопроводов, а также теплотехнического и электрического оборудования по причине излишней циркуляции теплоносителя, и приводят к проблеме постоянно высокого и нерационального потребления электроэнергии оборудованием контура отопления. Причина существующей проблемы заключается в том, что алгоритмы управления на основе получения, обработки и анализа измерительной информации, заложенные в применяемые сегодня ИИСАУ, являются, во-первых, недостаточно гибким инструментом регулирования тепловой и электрической энергии, а во-вторых, не оптимизированы в части рационального их использования.

В контексте рассмотренной проблемы высокого и нерационального потребления электроэнергии оборудованием контура отопления, задача построения моделей и

алгоритмов энергоэффективного функционирования ИИСАУ отоплением на основе измерительной информации о состоянии системы теплоснабжения является актуальной для промышленности. Решение такой задачи требует комплексного подхода, опирающегося на современные методы получения, обработки, анализа информации и принятия решений. Оптимизация работы ИИСАУ исключает недостатки существующих систем посредством отказа от использования смесительного клапана, снижения потребления электроэнергии отопительным насосом и обеспечения объекта теплоснабжения только требуемым ему количеством тепловой энергии, что значительно повышает энергоэффективность работы контура отопления при обеспечении объекта теплоснабжения необходимой тепловой энергией.

**Объектом исследования** является контур отопления. **Предметом исследования** являются модели функционирования информационной системы управления отоплением и алгоритмы управления количеством тепловой энергии и потребляемой отопительным насосом электроэнергии.

**Степень разработанности.** Решению задачи повышения энергоэффективности работы ИИСАУ НА (насосными агрегатами, далее – насосами) посвящены исследования Д.М. Таранова, О.Ю. Кауна, П.В. Гуляева, Д.П. Гаврилова, В.Г. Барабанова и А.В. Лыткина. Учёными построен алгоритм управления преобразователем частоты вращения ротора двигателя НА посредством широтно-импульсной модуляции амплитуды напряжения, питающего двигатель насоса. Применение алгоритма позволяет снизить потребление электроэнергии приводом насоса на 7–10% при поддержании заданного давления теплоносителя в гидравлической сети водоснабжения.

Задача сокращения энергопотребления при создании ИИСАУ водоснабжением решается в работах Б.С. Лезнова, Н.Ф. Ильинского, В.В. Москаленко, Ю.В. Сербина, А.А. Прокопова и В.П. Бугрова. Исследования заключаются в создании алгоритмов каскадно-частотного регулирования приводов НА за счёт попеременного запуска параллельно установленных насосов, частота вращения каждого из которых регулируется своим преобразователем частоты. Такие алгоритмы обеспечивают равномерный износ оборудования и заданную величину давления теплоносителя при сокращении энергопотребления ИИСАУ водоснабжением до 10 %.

Анализ современных исследований позволил определить способы повышения энергоэффективности ИИСАУ отоплением и установить, что в литературе по теме работы не решён вопрос оптимизации существующих алгоритмов функционирования ИИСАУ отоплением по теплопередаче и энергопотреблению на основе сокращения циркуляции теплоносителя. Неисследованная возможность создания и применения алгоритмов переопределения в режиме реального времени параметров работы насоса на основе измерительной информации о текущем состоянии системы теплоснабжения с автоподстройкой к климатическим изменениям имеет огромный энергетический потенциал. В связи с этим сформулированы цель и задачи исследования.

**Цель и задачи.** Целью работы является повышения энергоэффективности работы системы отопления по обеспечению объекта теплоснабжения необходимой тепловой энергией с автоподстройкой к климатическим изменениям посредством создания и применения оптимизированных по энергопотреблению и теплопередаче алгоритмов работы ИИСАУ контуром отопления на основе создания моделей его функционирования.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. построение информационной модели ИИСАУ контуром отопления и разработ-

- ка математической модели функционирования системы отопления, учитывающей ее теплотехнические параметры, проведение исследования моделей;
2. получение зависимостей электроэнергии, потребляемой насосом, и тепловой энергии теплоносителя в контуре отопления от параметров работы насоса для решения задачи оптимизации энергозатрат отопительным насосом;
  3. разработка алгоритма сбора, обработки, анализа измерительных данных на контроллере ИИСАУ контуром отопления о состоянии системы теплоснабжения и алгоритма принятия решений по управлению отопительным насосом и котловым контроллером, оптимизированного по энергопотреблению и теплопередаче;
  4. построение модели ИИСАУ контуром отопления на основе созданной информационной модели и математической модели функционирования, проведение исследования разработанных алгоритмов энергоэффективной работы системы;
  5. анализ результатов применения разработанных алгоритмов функционирования ИИСАУ контуром отопления на реальном объекте.

#### **Научная новизна.**

1. Разработана математическая модель функционирования системы отопления, отличающаяся от классических применением коммутационного режима работы системы. Параметры коммутационного режима работы переопределяются по истечении периода оптимизации энергозатрат отопительным насосом.
2. Получены функциональные зависимости электроэнергии, потребляемой отопительным насосом, и тепловой энергии теплоносителя в контуре отопления от параметров коммутации насоса: интервала работы на полную мощность и частоты коммутации, отличающиеся от существующих зависимостей учётом периодической смены естественной и принудительной циркуляции.
3. Разработан алгоритм функционирования ИИСАУ, оптимизированный по энергопотреблению и теплопередаче, с автоподстройкой к климатическим изменениям, отличающийся от применяемых алгоритмов учётом скорости теплоносителя при естественной и принудительной циркуляции в режиме периодической коммутации отопительного насоса контура отопления.

**Теоретическая и практическая значимость.** Исследования, выполненные в диссертационной работе, позволили создать новые модели и оптимальные по энергопотреблению и теплопередаче алгоритмы коммутационного функционирования теплотехнического оборудования контура отопления.

Практическая значимость заключается в разработке алгоритма энергоэффективного функционирования ИИСАУ отоплением, применение которого на практике позволяет оптимизировать теплопередачу и энергозатраты на теплоснабжение любого объекта. Кроме этого, практическая значимость состоит в применении результатов работы в учебном процессе, а именно, в методических пособиях для студентов вуза с целью углубления знаний в части создания моделей и энергоэффективных алгоритмов работы ИИСАУ отоплением.

Результаты работы использованы при выполнении НИОКР по гранту РФФИ № ГР 01201358610 «Методы математического моделирования и идентификации электротермических процессов по доступной косвенной информации для целей управления».

**Методология и методы исследования.** При выполнении исследования использовались методы теории информационно-измерительных систем, оптимизации, автоматического управления, а также теории математического моделирования.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. математическая модель коммутационного функционирования системы отопления с параметрами режима работы, переопределяемыми по истечении периода оптимизации;
2. функциональные зависимости электроэнергии, потребляемой отопительным насосом, и тепловой энергии теплоносителя в контуре отопления от параметров периодической коммутации насоса;
3. алгоритм работы ИИСАУ контуром отопления в режиме периодической коммутации насоса, оптимизированный по энергопотреблению и теплопередаче.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Теоретические результаты диссертационной работы, в том числе разработанные модели и алгоритмы функционирования ИИСАУ контуром отопления, а также полученные функциональные зависимости ключевых характеристик работы системы от параметров периодической коммутации отопительного насоса, подтверждены аналитическими расчётами, результатами моделирования и экспериментальными исследованиями.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 1-ая Всероссийская научно-практическая конференция «Разработки, достижения, творчество студентов Тульской области в различных областях знаний» (г. Тула, 2011 г.), VII Магистерская научно-техническая конференция (г. Тула, 2012 г.), XXV, XXVII, XXIX Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (г. Волгоград, 2012 г., г. Тамбов, 2014 г., г. Саратов, 2016 г.), VI Региональная молодёжная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодёжные инновации» (г. Тула, 2012 г.), 7-я Всероссийская научно-практическая конференция «Системы управления электротехническими объектами» (г. Тула, 2015 г.), Международная научно-техническая конференция «АПИР-21» (г. Тула, 2016 г.), Всероссийская научно-техническая конференция «Интеллектуальные и информационные системы» (г. Тула, 2016 г.), Региональная научно-практическая конференция, посвящённая «Дню Российской науки» (г. Тула, 2018 г.).

Результаты исследований в части оригинальных алгоритмических и технических решений в сфере информационно-измерительных и управляющих систем в промышленности использованы на ведущих предприятиях г. Тулы, что подтверждено 3 Актами о внедрении. В частности, результаты исследовательской работы в виде основы для принятия проектных решений в части автоматизации теплового пункта были использованы специалистами при создании раздела «АТМ» рабочей документации по проекту «Офисно-выставочный центр».

**Личный вклад автора.** Представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором. В публикациях, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежат основные результаты.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, и 6 тезисов докладов в сборниках трудов международных, всероссийских и региональных конференций. Выполнен отчёт по НИОКР.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 разделов с выводами, заключения, списка литературы из 129 наименований. Общий объем диссертации составляет 133 страницы машинописного текста, содержит 22 рисунка, 7 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность разработки и исследования моделей и алгоритмов функционирования контура отопления в задаче построения энергоэффективной информационно-измерительной системы автоматического управления (ИИСАУ) отоплением помещений офисно-выставочного центра (ОВЦ), сформулированы цель и задачи исследовательской работы, охарактеризована её научная новизна и практическая значимость, кратко описано содержание диссертации.

В первом разделе представлены результаты анализа способов повышения энергоэффективности ИИСАУ отоплением, как инструмента регулирования процесса передачи тепловой энергии из котла воздушной массе помещений. Обоснована актуальность задачи сокращения потребления электроэнергии отопительным оборудованием, связанная с необходимостью разработки и исследования моделей и алгоритмов энергоэффективного функционирования ИИСАУ отоплением.

Представлена технико-эксплуатационная характеристика теплового пункта (ТП) и установленного в нем теплотехнического оборудования. Рассматриваемый ТП представляет собой систему теплоснабжения с двумя котлами, работающими на газе и обеспечивающими отоплением, приточной вентиляцией и горячим водоснабжением ОВЦ интегрально, по всем помещениям. На основе анализа функционирования системы теплоснабжения определена структура ИИСАУ отоплением (рис. 1) и на примере работы одного из котлов показан процесс теплообмена в общем виде.

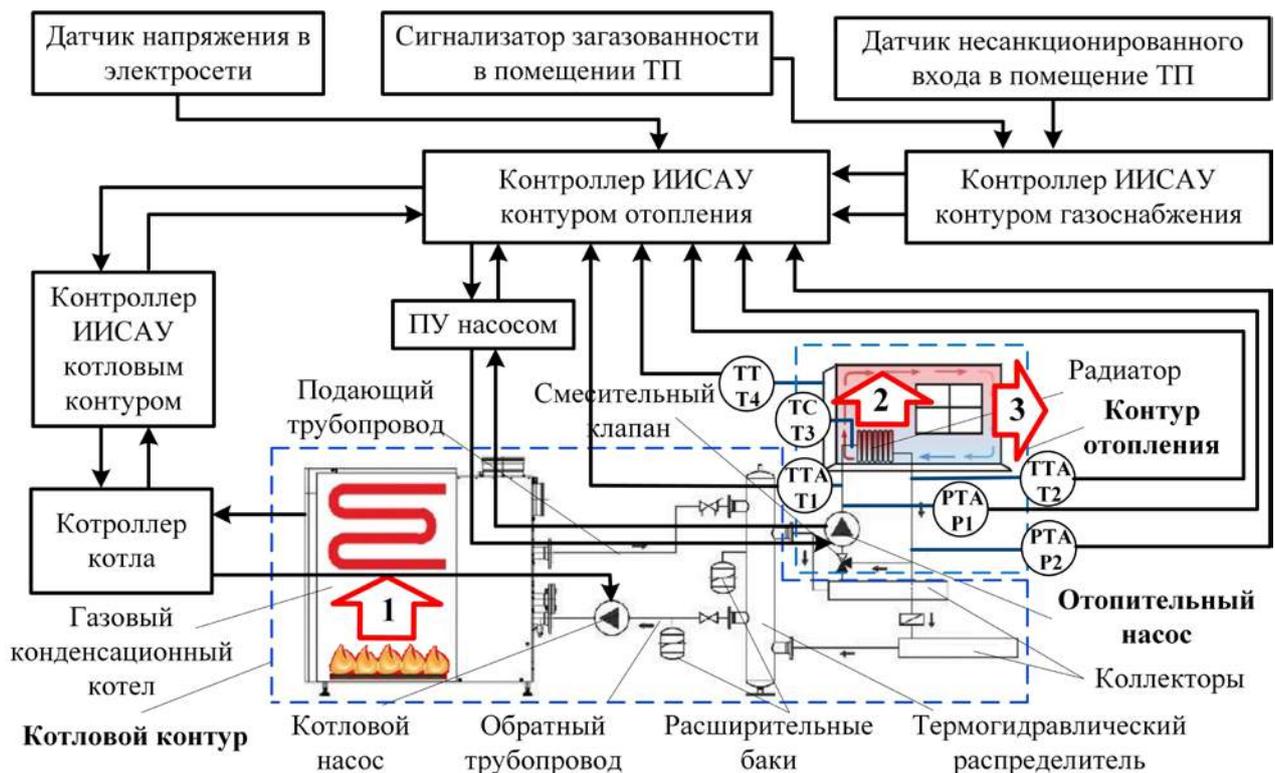


Рисунок 1 – Структура ИИСАУ отоплением. 1 – теплопередача от сжигания топлива теплоносителю внутри котла; 2 – теплопередача из контура отопления воздушной массе отапливаемых помещений; 3 – теплотери при теплопередаче

В системе отопления работой первичного (котлового) контура управляет специализированный контроллер котла, поставляемый комплектно, а вторичного (контура отопления) – контроллер ИИСАУ контуром отопления, который является центром принятия решений в системе отопления. Взаимосвязь контуров реализована посредством передачи от контроллера ИИСАУ контуром отопления на контроллер

котла сигнала изменения температуры теплоносителя в подающем трубопроводе для соблюдения температурного графика отопления и повышения эффективности работы конденсационного котла, а при возникновении неисправностей в системе теплоснабжения – сигнала отключения котлового оборудования.

Выполнен анализ вариантов оптимизации работы системы отопления в части сокращения объёма электроэнергии, потребляемой оборудованием контура отопления, при поддержании в системе необходимой тепловой энергии. На основе анализа выявлена возможность уменьшения энергетических затрат посредством периодической коммутации отопительного насоса, входящего в состав контура отопления. В связи с этим, насос выбран в качестве ключевого объекта регулирования в ИИСАУ.

Работа ИИСАУ контуром отопления основана на использовании информации от датчиков и сигнализаторов с дистанционной передачей сигнала (рис. 1): ТТА – прибор с сигнализацией для измерения температуры теплоносителя в контуре отопления (Т1 – в подающем трубопроводе; Т2 – в обратном трубопроводе); ТТ – прибор для измерения внешней температуры (Т4); РТА – прибор с сигнализацией для измерения давления теплоносителя в контуре отопления (Р1 – в подающем трубопроводе Р2 – в обратном трубопроводе). В работе ИИСАУ контуром отопления также задействованы регуляторы без дистанционной передачи сигнала: ТС – прибор для измерения и регулирования температуры воздушной массы в отапливаемом помещении, устанавливаемый непосредственно на радиаторах (Т3).

Разработка и исследование моделей и алгоритмов оптимизированного по энергопотреблению и теплопередаче функционирования ИИСАУ контуром отопления является комплексной задачей, решение которой возможно путём декомпозиции. На основании вышеизложенного сформулированы цель и задачи работы.

**Во втором разделе** создана информационная модель ИИСАУ контуром отопления, описывающая поступающие информационно-измерительные и исходящие управляемые потоки данных и ресурсов при взаимодействии системы с внешней средой (рис. 2).



Рисунок 2 – Детализированная информационная модель ИИСАУ контуром отопления

А также во втором разделе построена математическая модель функционирования системы отопления в режиме периодической коммутации отопительного насоса, обобщённая для режимов прерывания комфорта (РПК) и непрерывного комфорта (РНК) нахождения в помещении.

Функционирование отопительного насоса в режиме коммутации реализует поставляемый комплектно с ним ПУ посредством периодической подачи на двигатель напряжения  $U_{насоса}$ , В. Продолжительность работы насоса регулируется параметрами его периодической коммутации:  $t_{вкл}$ , с – интервалом работы насоса на полную мощность  $P_{ном} = 1100$ , Вт и  $f$ ,  $c^{-1}$  – частотой коммутации насоса, получаемыми ПУ от контроллера ИИСАУ контуром отопления.

Установлено, что при периодической коммутации насоса происходит изменение таких переменных состояния системы отопления (рис. 3), как: показателя избыточной тепловой энергии  $L_{комф}(t)$ , Дж, отражающего превышение энергии теплоносителя в контуре отопления, поступающей на нагрев помещений  $Q_{факт}(t)$ , Дж, над энергией, требуемой объекту теплопотребления  $Q_{треб}(t)$ , Дж, с учётом потерь энергии в трубопроводах при транспортировке теплоносителя от котла к объекту теплопотребления  $Q_{ном}(t)$ , Дж, тепловой энергии в котловом контуре  $Q_{котла}(t)$ , Дж и энергии, передаваемой теплоносителю в котле при сгорании топлива  $Q_{топл}(t)$ , Дж. Внешняя температура  $T_{внеш}$  является возмущающим воздействием и считается варьируемой в диапазоне  $[+8; -27]$   $^{\circ}C$  для расчётов параметров системы отопления.

Выявлено, что при периодической коммутации насоса, система отопления в процессе работы может переходить в режим прерывания комфорта. РПК возникает из-за инерционности и существующих в течение времени  $t_{nn}$  переходных процессов в системе, характеризующихся недостаточным для объекта теплопотребления в этот временной интервал количеством тепловой энергии теплоносителя в контуре отопления. Эта особенность учтена при создании моделей и алгоритмов функционирования ИИСАУ контуром отопления для обеспечения постоянной работы системы только в режиме непрерывного комфорта (РНК).

Для создания математической модели функционирования системы отопления проведён анализ процессов теплопередачи на каждом из интервалов непрерывного функционирования насоса на периоде коммутации  $\tau$ , с:  $t_{nn}$  – интервал переходного процесса, состоящий из интервалов:  $t_{пуск}$ , с – запуска двигателя и  $t_{разгон}$ , с – выхода насоса на рабочий режим и нагнетание необходимого давления;  $t_{вкл}$ , с – интервал работы насоса на полную мощность и  $t_{откл}$ , с – интервал, в течение которого насос отключён. Интенсивность передачи тепла отапливаемым помещениям зависит от типа циркуляции воды в системе, при этом значительный нагрев происходит на интервале  $t_{вкл}$  принудительной циркуляции, когда скорость теплоносителя максимальна, а наименьший – на интервале  $t_{откл}$  естественной циркуляции.

Математическая модель функционирования системы отопления получена в виде системы дифференциальных уравнений посредством создания и объединения уравнений для каждого из интервалов в общую систему на основе единства базиса переменных состояния. Обобщённая для РПК и РНК математическая модель описы-

вает процессы теплопередачи в произвольный момент времени  $t$  и отражает такие свойства системы отопления, как инерционность и теплопотери. Такая модель необходима для проведения исследований алгоритмов работы ИИСАУ отоплением.

По результатам исследования модели в среде MATLAB проведён анализ адекватности разработанной математической модели функционирования системы отопления объекту исследований, сделан вывод о достаточной полноте отражения моделью основных характеристик системы, обработке динамики их изменения и выполнении закона сохранения энергии, а также установлена пригодность модели для исследования алгоритмов работы ИИСАУ и оценки их энергоэффективности.

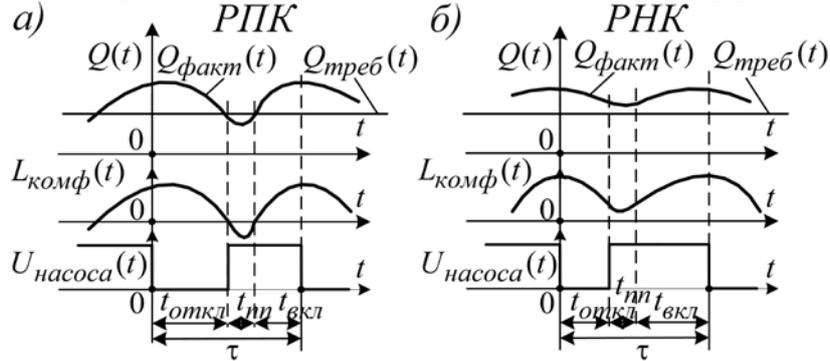


Рисунок 3 – Диаграммы изменения переменных состояния системы отопления в процессе коммутации отопительного насоса

$$\begin{cases}
 \frac{dQ_{монл}(t)}{dt} = K_1 \cdot \rho_{газа} \cdot G \cdot q_{газа}, \\
 \frac{dQ_{факт}(t)}{dt} = S \cdot c_V \cdot \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot (T_{менл1} - T_{менл2}) \cdot f \cdot (\sqrt{P_{ест}} \cdot t_{откл} + \sqrt{P_{пн}} \cdot t_{пн} + \sqrt{P_{прин}} \cdot t_{вкл}), \\
 \frac{dQ_{комла}(t)}{dt} = \frac{dQ_{монл}(t)}{dt} - \frac{dQ_{факт}(t)}{dt}, \\
 \frac{dQ_{ном}(t)}{dt} = \beta \cdot (q_{под} \cdot L_{под} + q_{обр} \cdot L_{обр}), \\
 \frac{dQ_{треб}(t)}{dt} = \alpha \cdot q_{отоп} \cdot V_{наружн} \cdot k_{потери} \cdot (T_{вн} - T_{внеш}), \\
 \frac{dL_{комф}(t)}{dt} = \frac{dQ_{факт}(t)}{dt} - \frac{dQ_{ном}(t)}{dt} - \frac{dQ_{треб}(t)}{dt}.
 \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho_{газа}$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $G$  – удельная теплота сгорания топлива, Дж/кг;  $q_{газа}$  – расход газа, м<sup>3</sup>/ч;  $S$  – площадь поперечного сечения трубопровода, м<sup>2</sup>;  $c_V$  – удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C);  $T_{менл1}$  и  $T_{менл2}$  – температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, °C;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $P_{прин}$ ,  $P_{ест}$  и  $P_{пн}$  – давление теплоносителя в подающем трубопроводе при принудительной циркуляции, естественной циркуляции и в переходном процессе, м в. ст.;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий район строительства здания;  $q_{отоп}$  – удельная отопительная характеристика здания, Вт/(м<sup>3</sup>·°C);  $V_{наружн}$  – объем отапливаемого здания по наружному обмеру выше отметки ±0.000, м<sup>3</sup>;  $k_{потери}$  – коэффициент для учёта потерь теплоты теплопроводами, проложенными в неотапливаемых помещениях;  $T_{вн}$  – средняя расчётная температура внутреннего воздуха отапливаемого здания, °C;

$\beta$  – коэффициент, учитывающий тепловой поток через изолированные опоры труб, фланцевые соединения и арматуру;  $q_{nod}$  и  $q_{обр}$  – нормы плотности теплового потока через поверхность изоляции подающего и обратного трубопроводов, Вт/м;  $L_{nod}$  и  $L_{обр}$  – длины подающего и обратного трубопроводов, м;  $K_1$  – коэффициент передачи тепловой энергии от сжигания топлива теплоносителю внутри котла.

**В третьем разделе** описана разработка двух алгоритмов: алгоритма сбора, обработки, анализа измерительной информации о текущем состоянии системы теплоснабжения и алгоритма принятия решений по управлению отопительным насосом и контроллером котла, оптимизированного по энергопотреблению и теплопередаче. Алгоритмы основаны на созданной информационной модели ИИСАУ контуром отопления. Алгоритм принятия решений предназначен для выдачи на ПУ отопительным насосом управляющих воздействий, которыми являются параметры периодической коммутации насоса, и управляющих сигналов на котловой контроллер. В алгоритме реализована автоподстройка к текущим климатическим изменениям.

Для энергоэффективного функционирования контура отопления в алгоритм принятия решений заложена идея определения соотношения продолжительности принудительной (на интервалах  $t_{nn}$  и  $t_{вкл}$ ) и естественной (на интервале  $t_{откл}$ ) циркуляции теплоносителя, с точки зрения минимального энергопотребления отопительным насосом при достаточном количестве тепловой энергии в контуре отопления.

Решение задачи оптимизации энергозатрат насосом сопряжено с рядом ограничений, в том числе связанных с теплотехническими параметрами контура отопления (инерционностью, геометрическими размерами трубопровода, физическими параметрами теплоносителя, скоростью принудительной и естественной циркуляции). Для формализации ограничений получена функциональная зависимость тепловой энергии в контуре отопления от параметров коммутации насоса:

$$Q_{факт}(t_{вкл}, f) = S \cdot c_V \cdot \Delta T_{менл} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot P_{ест}} - S \cdot c_V \cdot \Delta T_{менл} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot (t_{нук} + t_{разгон}) \times \\ \times (\sqrt{P_{ест}} - \sqrt{P_{nn}}) \cdot f + S \cdot c_V \cdot \Delta T_{менл} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot (\sqrt{P_{прин}} - \sqrt{P_{ест}}) \cdot t_{вкл} \cdot f$$

Количество тепловой энергии, достаточное объекту теплосъёма, регламентируется отопительным графиком и нормативными документами по отоплению объектов, в соответствии с текущими климатическими изменениями, а также габаритами отапливаемых помещений и отражается в величине теплосъёма. Норма теплосъёма, рассчитываемая как разность нормативных значений температуры теплоносителя в подающем  $T_{менл1}$  и обратном  $T_{менл2}$  трубопроводах, определена для рассматриваемого объекта теплосъёма и климатической зоны его размещения и составляет  $\Delta T_{менл} = T_{менл1} - T_{менл2} = 20$  °С. Если теплосъём за рассматриваемый временной интервал ниже нормы, работа системы отопления является не энергоэффективной по тепловой энергии, передаваемой объекту.

Для поддержания теплосъёма на заданном уровне  $\Delta T_{менл} = 20$  °С при минимальных затратах насосом электроэнергии в режиме коммутации  $E_{ком}$ , Вт·с решена задача однокритериальной, двухпараметрической оптимизации в условиях ограничений, заключающаяся в нахождении вектора проектных переменных  $X = \{x_1, x_2\}^T$ ,  $x_1 = t_{вкл}$ ;  $x_2 = f$ ;  $X \in E^2$ , обеспечивающего минимальное значение целевой функции:

$$E_{ком}(X) = \frac{P_{ном} \cdot K_U}{\eta} \cdot \frac{I_{пуск}}{I_{раб}} \cdot (t_{пуск} + t_{разгон}) \cdot \tau_{раб} \cdot x_2 + \frac{P_{ном} \cdot K_U}{\eta} \cdot \tau_{раб} \cdot x_1 \cdot x_2 \Rightarrow \min$$

где  $K_U$  – коэффициент использования мощности оборудования;  $\eta$  – КПД двигателя насоса;  $I_{раб}$  – ток двигателя в рабочем режиме, А;  $I_{пуск}$  – пусковой ток двигателя, А;  $\tau_{раб}$  – интервал оптимизации, с (временной интервал, на котором выполняется оптимизация целевой функции), при выполнении системы функциональных и геометрических неравенств:

$$\begin{cases} A - B \cdot T_{внеш} - C \cdot x_1 \cdot x_2 + D \cdot x_2 \leq 0, \\ (t_{пуск} + t_{разгон} + t_{задер}) \cdot x_2 + x_1 \cdot x_2 - 1 \leq 0, \text{ для } x_1 > 0, x_2 > 0, \\ (L_{под} + L_{обр}) \cdot x_2 - \sqrt{2 \cdot P_{прин}} / \sqrt{\rho} \geq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $t_{задер}$  – интервал задержки от повторного запуска двигателя, с,

$$A = \alpha \cdot q_{отоп} \cdot V_{наружн} \cdot k_{потери} \cdot T_{вн} + \beta \cdot (q_{под} \cdot L_{под} + q_{обр} \cdot L_{обр}) - S \cdot c_V \cdot \Delta T_{менл} \cdot \sqrt{2 \cdot P_{ест} \cdot \rho}$$

$$B = \alpha \cdot q_{отоп} \cdot V_{наружн} \cdot k_{потери}, \quad C = S \cdot c_V \cdot \Delta T_{менл} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot (\sqrt{P_{прин}} - \sqrt{P_{ест}}),$$

$$D = S \cdot c_V \cdot \Delta T_{менл} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot (t_{пуск} + t_{разгон}) \cdot (\sqrt{P_{ест}} - \sqrt{P_{прин}}) - \text{коэффициенты.}$$

Для граничных значений диапазона внешних температур общая система функциональных и геометрических неравенств (2) записана в таблице 1.

Таблица 1 – Системы ограничений в виде неравенств (2) для граничных значений диапазона внешних температур  $T_{внеш} \in [+8^{\circ}\text{C}; -27^{\circ}\text{C}]$

$T_{внеш} = -27^{\circ}\text{C}$	$T_{внеш} = +8^{\circ}\text{C}$
$\begin{cases} 82489 - 93744 \cdot x_1 \cdot x_2 - 2343600 \cdot x_2 \leq 0, \\ 150 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_2 - 1 \leq 0, \\ 740,4 \cdot x_2 - 0,22 \geq 0, \text{ для } x_1 > 0, x_2 > 0 \end{cases} \quad (3)$	$\begin{cases} 5629 - 93744 \cdot x_1 \cdot x_2 - 2343600 \cdot x_2 \leq 0, \\ 150 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_2 - 1 \leq 0, \\ 740,4 \cdot x_2 - 0,22 \geq 0, \text{ для } x_1 > 0, x_2 > 0 \end{cases}$

На интервале оптимизации  $\tau_{раб} = 1\text{ч}$  величина  $T_{внеш}$  принимается равной среднему значению внешней температуры за время  $\tau_{раб}$ , а целевая функция имеет вид:

$$E_{ком}(X) = 542\,217\,600 \cdot x_2 + 4\,525\,200 \cdot x_1 \cdot x_2 \Rightarrow \min$$

Применение алгоритма принятия решений в рамках алгоритма функционирования ИИСАУ контуром отопления необходимо в случае удовлетворения температуры теплоносителя в подающем трубопроводе и падения давления теплоносителя нормативному значению и в отсутствие теплосъёма объектом теплоснабжения.

**В четвёртом разделе** решена задача оптимизации электроэнергии, потребляемой насосом, в условиях ограничений, рассмотрены и обсуждаются результаты моделирования и внедрения в автоматизацию теплового пункта офисно-выставочного центра разработанных алгоритмов функционирования ИИСАУ контуром отопления, оптимизированных по энергопотреблению и теплопередаче, с автоподстройкой к климатическим изменениям на основе получения, обработки и анализа измерительной информации с датчиков системы теплоснабжения.

Задача оптимизации решена (таблица 2) методом обобщённых приведённых градиентов. В таблице 2  $d_{вкл}$ ,  $d_{пр}$  – относительные длительности интервалов не-

прерывного функционирования насоса, рассчитываемые по формулам:  $d_{вкл} = t_{вкл} / \tau$ ,  $d_{nn} = t_{nn} / \tau$ .

Таблица 2 – Решения задачи оптимизации для граничных значений диапазона внешних температур в отопительный период  $T_{внеш} \in [+8^{\circ}C; -27^{\circ}C]$

Внешняя температура	$T_{внеш} = -27^{\circ}C$	$T_{внеш} = +8^{\circ}C$
Вектор проектных переменных	$X = \{0.82 \text{ ч}; 1.07 \text{ ч}^{-1}\}^T$	$X = \{0.05 \text{ ч}; 1.07 \text{ ч}^{-1}\}^T$
Минимальное потребление электроэнергии насосом	$E_{ком}(X) = 1141 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$	$E_{ком}(X) = 111 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$
Период коммутации насоса	$\tau = 0,94 \text{ ч}$	$\tau = 0,94 \text{ ч}$
Относительная длительность работы насоса	$d = d_{nn} + d_{вкл} = 88\%$	$d = d_{nn} + d_{вкл} = 6\%$

На рисунке 4 представлена зависимость  $E_{ком}(x_1, x_2)$  и область допустимых значений целевой функции, построенная для выделенных ограничениями (3) значений проектных переменных  $x_1$  и  $x_2$ . Графически показан выбор минимального значения целевой функции из области допустимых значений.

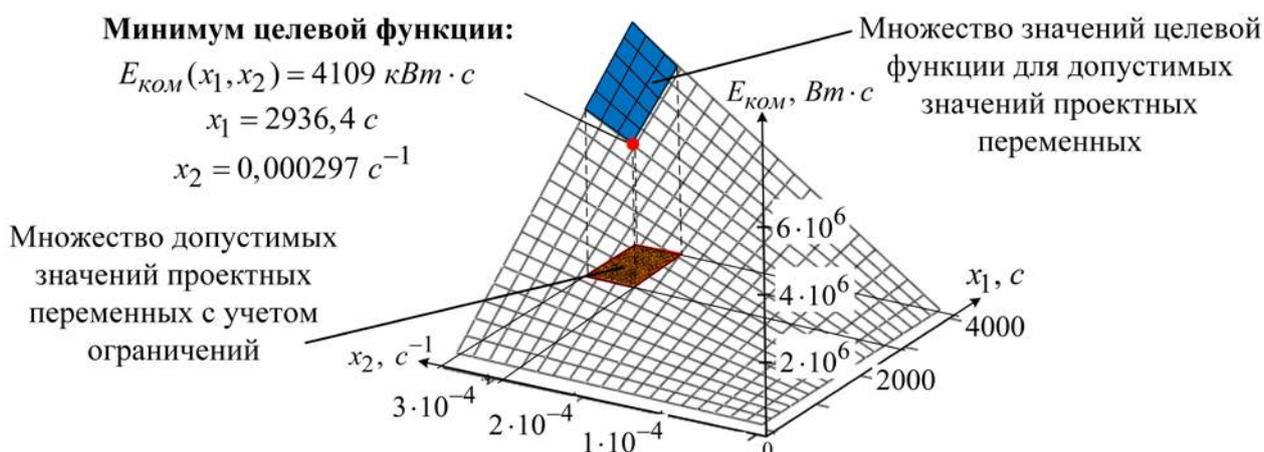


Рисунок 4 – Определение минимума целевой функции при  $T_{внеш} = -27^{\circ}C$

В среде MATLAB разработана модель на основе математической модели функционирования системы отопления, полученной в виде дифференциальных уравнений (1). Выполнено исследование алгоритмов управления отопительным насосом в ходе их применения на модели. По итогам моделирования работы системы отопления с рассчитанными в результате решения задачи оптимизации параметрами коммутации насоса получена зависимость теплосъёма объектом теплоснабжения, относительной длительности работы и потребляемой насосом электроэнергии от внешней температуры для режима коммутации насоса в сравнении с режимом его непрерывной работы (рис. 5).

Исследование на модели выполнено в условиях падения внешней температуры на  $4^{\circ}C$  каждый час эксперимента, таким образом моделируется весь диапазон внешних температур  $T_{внеш} \in [+8^{\circ}C; -27^{\circ}C]$  за отопительный период. Результаты моделирования демонстрируют переопределение контроллером ИИСАУ контуром отопления при необходимости оптимальных параметров коммутации отопительного насоса и изменение настроек прибора управления с периодичностью в час. Внесение таких

изменений ведёт к корректировке относительной длительности работы насоса для постоянного поддержания теплосъёма на заданном уровне в режиме непрерывного комфорта. При такой работе ИИСАУ в целом значительно сокращается потребление электроэнергии контуром отопления (таблица 4) и повышается энергоэффективность его работы, в том числе при самых низких внешних температурах.

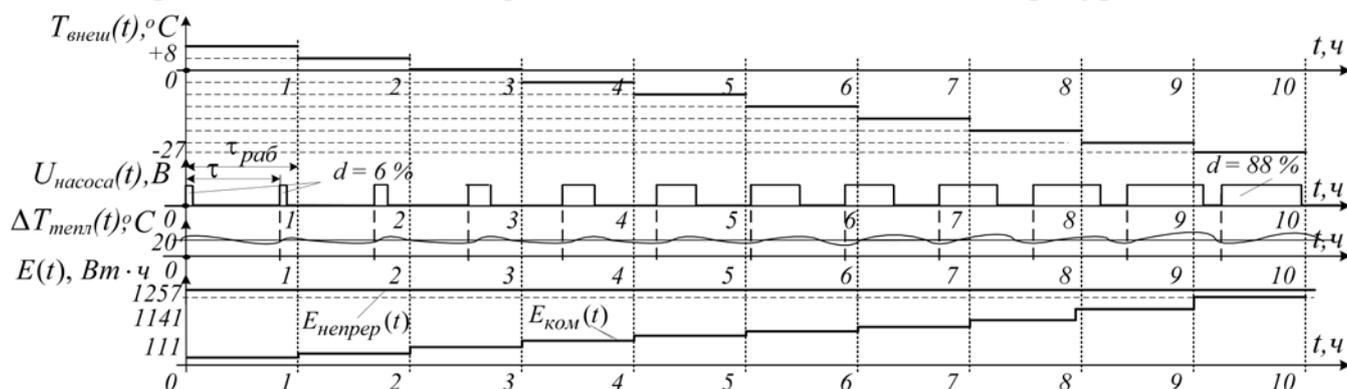


Рисунок 5 – Результаты моделирования энергоэффективной работы ИИСАУ

Таблица 4 – Анализ энергоэффективности разработанных алгоритмов

Анализируемый параметр в зависимости от режима	Непрерывный режим	Режим коммутации	Непрерывный режим	Режим коммутации
Внешняя температура	$T_{внеш} = -27 \text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_{внеш} = +8 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Потребление электроэнергии насосом	1257 Вт·ч	1141 Вт·ч	1257 Вт·ч	111 Вт·ч
Экономия электроэнергии	116 Вт·ч (9,2 %)		1146 Вт·ч (91 %)	
Время работы насоса	1 ч	0,89 ч	1 ч	0,12 ч

Функционирование ИИСАУ в оптимизированном режиме, коррелированном с сезонными потребностями тепла и перепадами температур, реализуется благодаря использованию при внедрении на реальном объекте теплоснабжения круглосуточного мониторинга работы датчиков ИИС для своевременного автоматического изменения параметров периодической коммутации отопительного насоса с учётом всех полученных и обработанных данных.

Применение при создании раздела «АТМ» рабочей документации по проекту «Офисно-выставочный центр» рекомендаций по практической реализации на современной элементной базе разработанных оптимизированных алгоритмов функционирования ИИСАУ позволило с высокой степенью надёжности управлять контуром отопления и наиболее рационально использовать энергоресурсы для обеспечения объекта теплотребления необходимой тепловой энергией.

**В заключении** диссертационной работы изложены основные выводы и результаты, полученные в ходе исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итоги исследования.** В результате исследования увеличена энергоэффективность функционирования ИИСАУ отоплением посредством разработки, анализа с помощью созданных моделей и внедрения в систему алгоритма получения, обработки и обобщения измерительной информации и оптимизированного алгоритма выдачи управляющих воздействий. На примере работы теплового пункта ОВЦ получены основные теоретические и практические результаты:

1. построена информационная модель ИИСАУ контуром отопления и разработана математическая модель функционирования системы отопления, доказана достоверность информационной модели для получения измерительных данных и математической модели функционирования для отражения характеристик переменных состояния системы;
2. получены зависимости электроэнергии, потребляемой насосом, и тепловой энергии теплоносителя в контуре отопления от параметров функционирования насоса (интервала работы на полную мощность и частоты периодической коммутации) для решения задачи оптимизации энергозатрат отопительным насосом в условиях ограничений;
3. разработан алгоритм сбора, обработки, анализа измерительной информации на контроллере ИИСАУ контуром отопления о текущем состоянии системы и энергоэффективный алгоритм принятия решений по выдаче управляющих воздействий на отопительный насос в режиме периодической коммутации и котловой контроллер с автоподстройкой к климатическим изменениям;
4. проведено исследование на разработанных моделях алгоритмов функционирования ИИСАУ контуром отопления и экспериментально подтверждена энергоэффективность и целесообразность их использования;
5. в результате внедрения в ПО контроллера ИИСАУ контуром отоплением ОВЦ алгоритмов энергоэффективного функционирования построена система, обладающая новыми, с научной точки зрения, возможностями и обеспечивающая улучшение технических, эксплуатационных и экономических характеристик системы отопления (уменьшение потребления электроэнергии оборудованием контура отопления при обеспечении объекта теплоснабжением необходимой тепловой энергией в соответствии с его нуждами и температурным графиком).

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.** Применение разработанных моделей и алгоритмов энергоэффективного функционирования ИИСАУ отоплением не ограничивается тепловыми пунктами, их адекватность и корректность очевидна и для оптимизации по энергопотреблению и теплопередаче работы котельных. Сфера применения результатов научно-исследовательской работы позволяет охватить широкий спектр объектов теплоснабжения, благодаря гибкости выбранных подходов к формализации и построению моделей и алгоритмов работы системы.

К перспективам дальнейшей разработки темы относятся такие направления, как создание и исследование моделей и алгоритмов оптимизированного функционирования ИИСАУ по каналам регулирования давления газа и теплоносителя; температуры теплоносителя в системах: вентиляции, кондиционирования и ГВС; а также сбор, накопление и анализ статистики; создание методического комплекса рекомендаций для проектировщиков ИИСАУ теплоснабжением по возможностям программирования контроллера и принципам настройки элементов управления.

#### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Николаева, Т. В. Формирование алгоритмов управления ИИСАУ теплоснабжения по каналу изменения температуры теплоносителя / Т. В. Николаева // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 12. – С. 15-18.
2. Николаева, Т. В. Разработка модели контура отопления в информационно-

- измерительной САУ теплоснабжением / Т. В. Николаева, А.В. Лукашенко // Известия Тульского государственного университета. Серия : Технические науки. Вып. 11. Ч. 1 / ТулГУ. – Тула, 2016. – С. 218-229.
3. Николаева, Т. В. Адаптивные обобщённые математические модели импульсного преобразователя напряжения / Т. В. Николаева // Известия Тульского государственного университета. Серия : Технические науки. Вып. 4 / ТулГУ. – Тула, 2016. – С. 167-172.
  4. Минина (Николаева), Т. В. Система повышения коэффициента мощности импульсного преобразователя напряжения / Т. В. Минина (Николаева), И. В. Капустин, А. В. Лукашенко // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25: сборник трудов XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. / Волгогр. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2012. – Т. 8. Секция 12. – С. 190-193.
  5. Методы математического моделирования и идентификации электротермических процессов по доступной косвенной информации для целей управления : отчёт о НИОКР: / ФГБОУ ВПО ТулГУ; рук. Лукашенко А. В. – Тула, 2013. – 72 с. – Исполн.: Лукашенко А. В., Фомичёв А. А., Минина (Николаева) Т. В. [и др.]. № ГР 01201358610. – Инв. № 215041350020.
  6. Минина (Николаева), Т. В. Построение обобщённых математических моделей импульсного преобразователя напряжения / Т. В. Минина (Николаева), И. В. Капустин, А. В. Лукашенко // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27: сборник трудов XXVII Междунар. науч. конф.: в 12 т. / Тамбовск. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2014. – Т. 4. Секция 11. – С. 141-144.
  7. Николаева, Т. В. Разработка энергоэффективной ИИС управления технологическим процессом в тепловом пункте / Т. В. Николаева // VII Всероссийская научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Системы управления электротехническими объектами»: сборник докладов. – Тула, 2015. – Секция 1. – С. 48-51.
  8. Николаева, Т. В. Разработка и исследование имитационной модели контура отопления ИИС теплоснабжения / Т. В. Николаева // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-29: сборник трудов XXIX Междунар. науч. конф.: в 12 т. / Саратовск. гос. техн. ун-т им. Гагарина Ю.А. – Саратов, 2016. – Т. 12. Секция 6. – С. 202-206.
  9. Николаева, Т. В. Автоматизация ИИС управления теплоснабжением на основе анализа данных о состоянии контура отопления / Т. В. Николаева // Автоматизация: проблемы, идеи, решения – АПИР-21: сборник трудов Междунар. заочн. науч.-техн. конф. – Тула, 2016. – С. 249-253.
  10. Николаева, Т. В. Разработка алгоритма определения оптимальных параметров управления ИИС теплоснабжения с учётом динамики изменения тепловой энергии / Т. В. Николаева // Всероссийская научно-техническая конференция Тульского государственного университета «Интеллектуальные и информационные системы»: сборник докладов. – Тула, 2016. – С. 203-207.

Подписано в печать 2018.

Формат бумаги 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Заказ

Тульский государственный университет 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ 300012, г. Тула, пр. Ленина, 97, а