

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

**Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»**

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

Панченко Дмитрий Евгеньевич

**Разработка каскадной системы регулирования автоматизированной водогрейной
котельной**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7M07101 – Автоматизация и роботизация

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

УДК 681.515.8

На правах рукописи

Панченко Дмитрий Евгеньевич

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

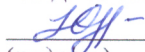
Название диссертации	Разработка каскадной системы регулирования
Направление подготовки	автоматизированной водогрейной котельной 7M07101 – Автоматизация и роботизация

Научный руководитель
канд. техн. наук, ассоц. проф.

 Ширяева О. И.
(подпись)
«2» июня 2025 г.

Рецензент

канд. техн. наук, доц.

 Юничева Н. Р.
(подпись)
«16» июня 2025 г.

Нормоконтроль

магистр техн. наук

 Манатов К. А.
(подпись)
«13» июня 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой АиУ

канд. техн. наук

 Сарсенбаев Н. С.

(подпись)

«16» 06 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий
Кафедра Автоматизации и управления

7M07101 – Автоматизация и роботизация

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой АиУ
канд. техн. наук

Сарсенбаев Н.С.

(подпись)

«16» 06. 2025 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Панченко Д. Е.

Тема Разработка каскадной системы регулирования автоматизированной водогрейной котельной

Утверждена приказом Б. Жаутикова № 548-П/Ө от «04» декабря 2023 г.

Срок сдачи законченной работы «09» июня 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: технологический регламент водонагревательной установки, исходные данные параметров температуры воды, подачи пара в теплообменник.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) литературный обзор каскадного управления;
- б) описание технологического процесса водонагревательных котлов;
- в) разработка схемы автоматизации процессом водонагревательного котла;
- г) анализ и синтез каскадной системы управления;
- д) синтез модального регулятора;
- е) реализация управления через систему Honeywell PKS и протокол OPC.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

схема автоматизации процесса водонагревательного котла.

Рекомендуемая основная литература:

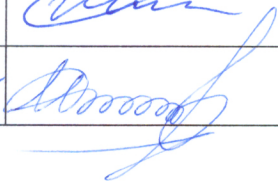
- 1 Нгуен Т. Т., Финошин А. В. Непрямое адаптивное управление каскадными системами на основе метода скоростного биградиента // Мехатроника, автоматизация, управление. – Москва: «Новые технологии» 2025. – Т. 26, № 4. – С. 167–177.
- 2 Поляков С. И. Каскадное управление отопительной системой «умного дома» // Современные аспекты моделирования систем и процессов: материалы конференции – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова. 2021. С. 112–118.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

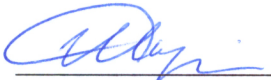
Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Аналитический раздел Литературный обзор методов каскадных систем управления	12 апреля 2024 г.	
Технологический раздел Описание процесса водонагревательной установки	20 ноября 2024 г.	
Расчетный раздел Разработка схемы автоматизации процесса водогрейной котельни	10 марта 2025 г.	
Расчетный раздел Анализ и синтез системы каскадной системы управления процесса водонагревательного котла	25 мая 2025 г.	

Подписи

консультантов и нормоконтролёра на законченную магистерскую диссертацию с
указанием относящихся к ним разделов диссертации

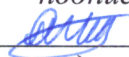
Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Аналитический раздел	О. И. Ширяева канд. техн. наук	2.06.25	
Технологический раздел	О. И. Ширяева канд. техн. наук	2.06.25	
Расчетный раздел	О. И. Ширяева канд. техн. наук	2.06.25	
Нормоконтролер	Қ. А. Манатов магистр техн. наук	13.06.2025	

Научный руководитель


подпись

Ширяева О. И.

Задание принял к исполнению обучающийся


подпись

Панченко Д. Е.

Дата

«20» 12 2023 г.

АНДАТПА

Бұл магистрлік диссертацияда Honeywell Experion PKS платформасы негізінде модельдік-бағдарланған ПИД-реттеуді қолдана отырып, автоматтандырылған су жылыту қазандығын басқарудың каскадты жүйесін әзірлеу және іске асыру ұсынылған. Ұсынылған тәсіл жүйенің дәлдігін, тұрақтылығы мен бейімделуін едәуір жақсартуға, сондай-ақ объектінің сандық моделін пайдалану және OPC арқылы MATLAB-пен интеграциялау арқылы іске қосу уақытын азайтуға мүмкіндік берді. Каскадты басқаруды практикалық қолдану реттеудің жақсартылған динамикасын, қондырғының энергия тиімділігі мен сенімділігін арттыруды қамтамасыз етті. Нәтижелер инерциялық және сызықтық емес динамикасы бар басқа нысандарды автоматтандыруда пайдаланылуы мүмкін, бұл цифрлық егіздер мен интеллектуалды басқару жүйелерін одан әрі зерттеуге перспективалар ашады.

АННОТАЦИЯ

В данной магистерской диссертации представлена разработка и реализация каскадной системы управления автоматизированной водогрейной котельной с применением модельно-ориентированного ПИД-регулирования на базе платформы Honeywell Experion PKS. Предложенный подход позволил значительно повысить точность, устойчивость и адаптивность системы, а также снизить время пусконаладочных работ за счёт использования цифровой модели объекта и интеграции с MATLAB через OPC. Практическое применение каскадного управления обеспечило улучшенную динамику регулирования, повышение энергоэффективности и надёжности установки. Результаты могут быть использованы при автоматизации других объектов с инерционной и нелинейной динамикой, открывая перспективы для дальнейших исследований в области цифровых двойников и интеллектуальных систем управления.

ABSTRACT

This master's thesis presents the development and implementation of a cascade control system for an automated hot water boiler using model-oriented PID control based on the Honeywell Experion PKS platform. The proposed approach has significantly improved the accuracy, stability and adaptability of the system, as well as reduced the start-up time by using a digital model of the facility and integrating with MATLAB via OPC. The practical application of cascade control has provided improved regulation dynamics, increased energy efficiency and reliability of the installation. The results can be used in the automation of other objects with inertial and nonlinear dynamics, opening up prospects for further research in the field of digital twins and intelligent control systems.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Аналитическая часть	9
1.1 Литературный обзор	9
1.2 Основы теории работы и управления котлами	11
1.3 Традиционные методы управления	14
1.4 Продвинутое методы управления	15
2 Технологическая часть	18
2.1 Технологический процесс водонагревательного котла	18
3 Расчётная часть	25
3.1 Построение математической модели водогрейного котла и параметрическая идентификация модели	25
4 Анализ и синтез каскадной системы управления котельной	38
4.1 Синтез системы управления в пространстве состояний	42
4.2 Синтез модального регулятора	50
5 Разработка системы управления MD PID с системой Honeywell PKS	56
5.1 Интеграция модели объекта в среду Honeywell PKS	57
Заключение	65
Список использованной литературы	66
Приложение А	67
Приложение Б	68

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация водогрейных котельных – динамичная и развивающаяся область, привлекающая все большее внимание благодаря своему потенциалу повышения эффективности, снижения энергопотребления и минимизации ошибок в работе. Данное исследование посвящено важнейшему вопросу в этой области – необходимости создания надежной и эффективной системы управления.

Существующие системы управления, применяемые в водогрейных котельных, часто оказываются неэффективными, что приводит к неэффективности работы, повышенному потреблению энергии и увеличению эксплуатационных расходов. Признавая эти проблемы, данное исследование ставит своей целью внести вклад в эту область путем разработки сложной каскадной системы управления, предназначенной для оптимизации работы автоматизированных водогрейных котельных.

Основной целью данной работы является всестороннее изучение разработки каскадной системы управления для автоматизированной водогрейной котельной. Рассматривается значение автоматизации в данном конкретном контексте, необходимость создания передовой системы управления, а также подробно описываются цели исследования. На протяжении всей статьи мы вникаем в тонкости методологии, использованной при разработке каскадной системы управления, представляем полученные результаты и делаем глубокие выводы.

Цель работы. Основной целью данной диссертации является внесение существенного вклада в область автоматизации водогрейных котельных установок путем удовлетворения потребности в усовершенствованной системе управления. Благодаря тщательному исследованию и разработке, основной целью является повышение эффективности, снижение энергопотребления и смягчение эксплуатационных проблем, связанных с существующими системами управления в автоматизированных водогрейных котельных установках.

Основные задачи диссертации:

- Разработка каскадной системы управления, специально разработанную для водогрейных котельных, уделяя особое внимание оптимизации производительности и минимизации неэффективности.
- Постановка задачи оптимального управления для водонагревательной котельни.
- Исследовать роль каскадной системы управления в минимизации потребления энерго ресурсов автоматизированной водогрейной котельной при эксплуатации водогрейных котельных.
- Синтезировать каскадную систему управления с использованием новых алгоритмов управления.

Объектом исследования является. В центре внимания данного исследования – разработка и внедрение каскадной системы управления в контексте автоматизированных водогрейных котельных. Исследование посвящено тонкостям проектирования системы управления, направленной на оптимизацию работы водогрейной котельной за счет повышения уровня автоматизации и точности.

Новизна исследования. В данном исследовании представлен новый подход к автоматизации водогрейных котельных путем разработки каскадной системы управления, специально разработанной для этой среды. Новизна заключается в интеграции передовых алгоритмов управления и тщательном проектировании, направленном на решение уникальных задач, которые ставят перед собой водогрейные котельные установки. Данное исследование призвано заполнить пробел в существующей литературе, представив инновационные решения для повышения эффективности, снижения энергопотребления и минимизации человеческих ошибок при эксплуатации автоматизированных водогрейных котельных. Вклад данного исследования заключается в том, что оно способно пересмотреть отраслевые стандарты и проложить путь к развитию автоматизированных систем управления для аналогичных промышленных приложений.

1 Аналитическая часть

Данный раздел посвящён анализу современных подходов к управлению технологическими процессами в теплотехнических системах, в частности, водогрейными котельными. Рассматриваются теоретические основы работы котлов, методы автоматического регулирования, а также существующие технические решения в области промышленной автоматизации. Особое внимание уделяется сравнению традиционных и современных методов управления, включая одноконтурное ПИД-регулирование и более сложные каскадные и оптимальные алгоритмы.

Анализируется научная литература, нормативные документы и инженерные практики, позволяющие обосновать выбор наиболее эффективной структуры системы управления. Проведённая аналитическая работа формирует основу для разработки автоматизированной системы, обеспечивающей высокую стабильность, надёжность и адаптивность в условиях переменных технологических нагрузок и внешних возмущений.

1.1 Литературный обзор

Каскадные системы управления представляют собой одну из классических схем многоуровневого регулирования, широко применяемую в промышленных процессах для повышения качества регулирования и подавления возмущений. Основная идея каскадного управления состоит в разбиении системы на внешний (медленный) и внутренний (быстрый) контуры: внутренний контур работает на более «быстром» процессе и служит для компенсации возмущений до их передачи во внешний контур, тогда как внешний контур обеспечивает более точное и медленное слежение за заданием [1]. Как отмечается во многих источниках, каскадная структура позволяет эффективно подавлять возмущения и улучшать быстродействие регулирования. По словам Бошковича и др., цель такого деления – чтобы возмущения во внутреннем контуре подавлялись вторичным регулятором до того, как они достигнут внешнего контура [2]. Соответственно, каскадные системы широко используются там, где требуется высокая точность, устойчивость к помехам и отдельный контроль за параметрами с различными динамическими характеристиками.

Исторически развитие каскадного регулирования тесно связано с отраслью паровых котлов и судостроением. При повышении давления в котлах уменьшение объёма паровых барабанов привело к необходимости более сложных стратегий управления. В современных котельных установках нередко используется так называемая трёхзвенная схема управления, рисунок 1.1: регуляторы уровня воды в барабане, расхода питательной воды и расхода пара работают совместно, причём приоритетом остаётся поддержание уровня воды в узком допустимом диапазоне.

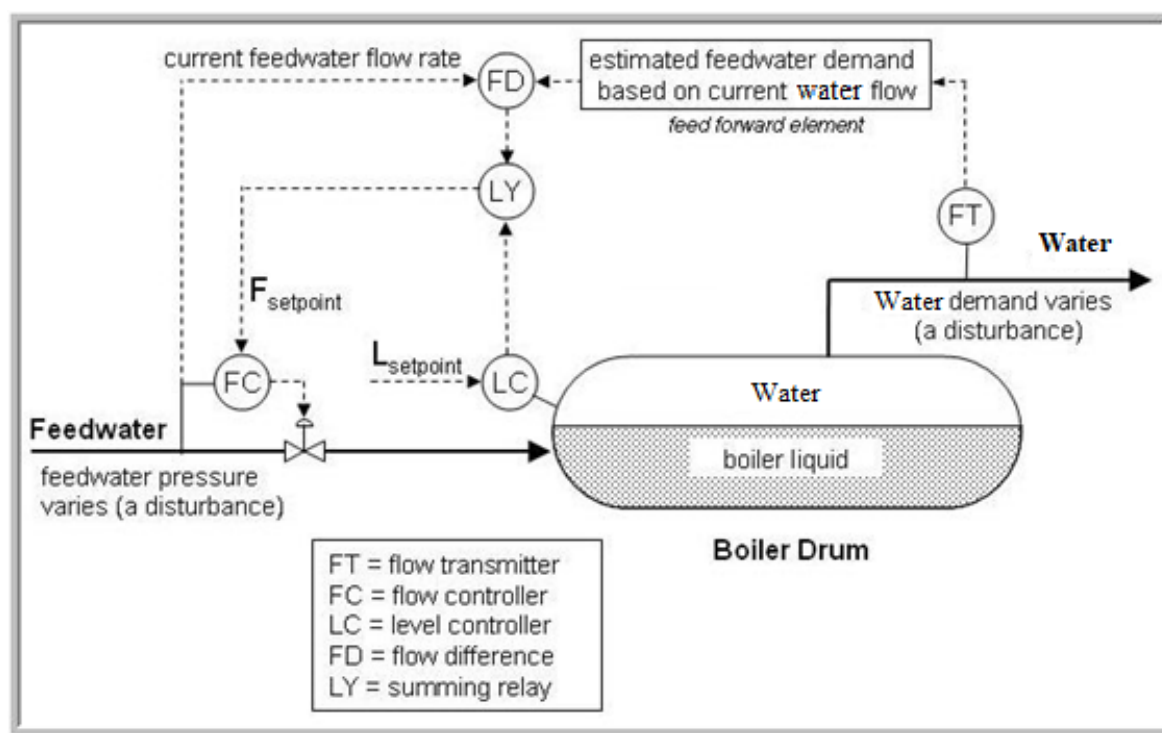


Рисунок 1.1 – Применение трёхзвенной системы управления бойлера

Трёхзвенная система (3-element control) является частным случаем каскадной структуры с дополнительными каналами и присутствует в литературе как пример эффективного управления паровыми котлами [4]. Похожая концепция – каскадного управления – может применяться и в системах теплоснабжения с горячей водой, когда внутренний контур поддерживает скорость отклика системы (например, быстрый регулятор расхода топлива или топлива/воздуха), а внешний – температуру теплоносителя.

Современные исследования предлагают различные методы проектирования каскадных систем управления и настройки регуляторов. Например, разрабатываются алгоритмы автоматической настройки параметров PID-регуляторов во внешнем и внутреннем контурах. В работе Бошковича с соавторами описан аналитический метод проектирования PI/PID-регуляторов для двухконтурных каскадных процессов, учитывающий ограничение по устойчивости и производительности [6]. Они показывают, что благодаря такой настройке достигается эффективное подавление возмущений, что выражается в уменьшении интегральной абсолютной ошибки (IAE) при переходных процессах. Другие исследования посвящены использованию методов адаптивного управления, оптимальных регуляторов и моделей предиктивного управления в контексте многоуровневых систем.

В литературе отмечается, что каскадный контроль остаётся одним из наиболее эффективных «продвинутых» элементов промышленного управления, несмотря на прогресс в области MPC и интеллектуальных систем [7].

Кроме того, для котельных систем рассматриваются различные алгоритмы управления. Традиционно в котельных устанавливаются ПИД-регуляторы, поскольку они обеспечивают простую реализацию и достаточную надёжность. Однако классические методы настройки ПИД (например, по Зиглеру–Николсу) порой не учитывают взаимодействие контуров и сложность динамики котла [9]. Поэтому в современных исследованиях всё чаще применяются методы оптимального и адаптивного управления. Например, LQR-регуляторы и полюсное размещение в пространстве состояний позволяют более гибко управлять динамикой системы, минимизируя заданный критерий качества.

Методы прогнозирующего управления (МРС) и релейно-нейросетевые подходы также изучались для отопительных систем, однако их подробное описание выходит за рамки данной работы. В целом можно отметить, что сочетание каскадной структуры и современных методов настройки (в том числе с применением численных методов и вычислительных средств) дает лучшие результаты по сравнению с одиночными ПИД-системами [11].

1.2 Основы теории работы и управления котлами

Водогрейная котельная – это термодинамическая система, предназначенная для передачи тепла от источника (например, сжигания топлива, электроэнергии или пара) к воде. Основной задачей управления является поддержание температуры воды на выходе на желаемом заданном уровне независимо от возмущений. К основным нарушениям относятся изменения в источнике тепла (например, колебания давления пара), колебания температуры поступающей холодной воды и изменения потребности в горячей воде (нагрузки). Эффективная система управления должна уметь быстро и эффективно противостоять этим возмущениям, чтобы поддерживать стабильную работу и минимизировать потери энергии.

Особенно актуальной эта задача становится в условиях переменной нагрузки, когда потребление горячей воды может резко изменяться, требуя оперативной корректировки подачи теплоносителя. Поэтому разработка робастной системы управления, способной адаптироваться к изменяющимся условиям, является ключевым аспектом обеспечения надежности и экономичности работы водогрейной котельной. Это достигается за счет внедрения адаптивных алгоритмов управления и оптимизационных стратегий, которые позволяют не только парировать текущие возмущения, но и предвидеть изменения нагрузки, обеспечивая проактивное регулирование и дальнейшее снижение энергопотребления.

На рисунке 1.2, представлена схема промышленной установки для нагрева горячей воды.

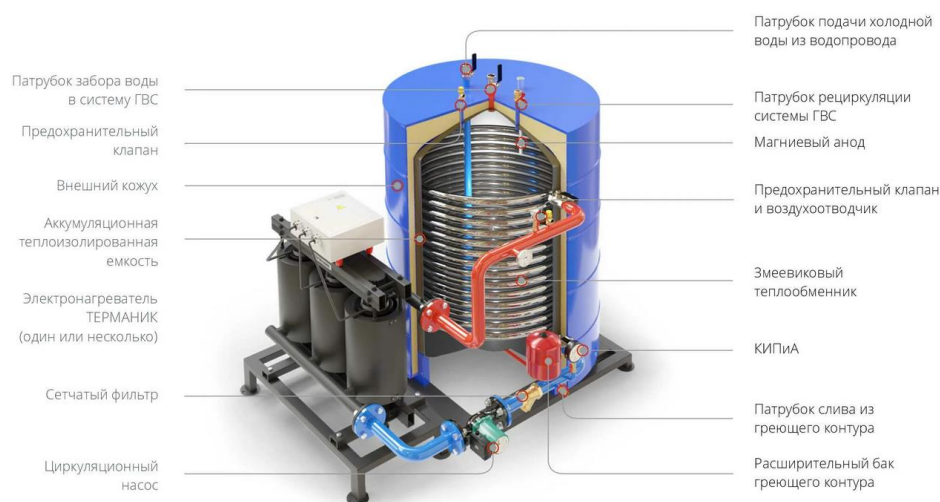


Рисунок 1.2 – Промышленная установка для нагрева горячей воды

Когда возникает потребность в горячей воде, холодная подпиточная вода поступает в накопительный бак, понижая его общую температуру. Система управления реагирует на это, активируя насос и открывая клапан конденсата, который циркулирует воду через теплообменник. В теплообменнике пар передает свое скрытое тепло циркулирующей воде. Затем нагретая вода возвращается в накопительный бак через диффузные трубки, которые помогают поддерживать тепловую градиентность. Этот процесс обеспечивает эффективную подачу горячей воды до тех пор, пока температура в баке не восстановится до заданного значения.

Процесс нагрева воды в котле протекает в условиях, подверженных множеству эксплуатационных возмущений, включая колебания температуры и давления питательной воды, изменения расхода теплоносителя, а также нестабильность подачи энергоресурса. Эти факторы значительно влияют на устойчивость и точность регулирования температуры, что требует надёжной и адаптивной системы автоматического управления. Именно поэтому выбор стратегии регулирования и её точная настройка играют решающую роль в обеспечении эффективной и безопасной работы водогрейного котла.

В данной работе рассматривается водогрейный котёл, использующий в качестве источника тепловой энергии насыщенный или перегретый пар. Такой тип котельной установки широко применяется в промышленных объектах, где уже присутствует централизованное пароснабжение, либо где пар вырабатывается в других технологических циклах и может быть эффективно использован для вторичного нагрева воды. На рисунке 1.3, приведена схема работы данной установки.

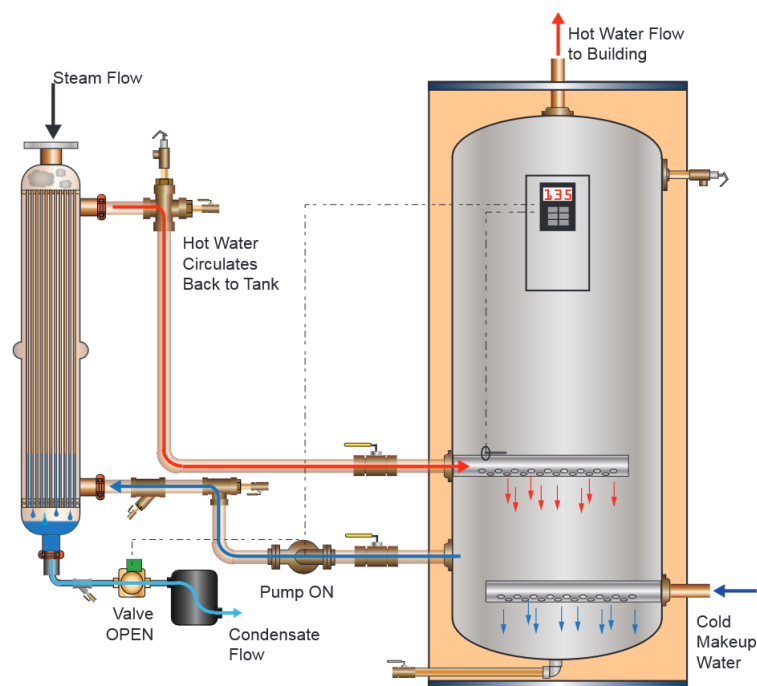


Рисунок 1.3 – Промышленная водонагревательная установка

Преимущество использования пара заключается в его высокой теплопередающей способности и возможности быстрого регулирования температуры теплоносителя. Пар поступает в теплообменник, где передаёт свою энергию воде, повышая её температуру до заданного уровня. Однако процесс нагрева с использованием пара подвержен множеству динамических факторов, таких как колебания давления и температуры пара, изменения расхода воды и инерционность теплопередачи. Это создаёт определённые сложности для системы автоматического управления, поскольку для поддержания стабильных параметров на выходе требуется точная настройка регуляторов, способных быстро реагировать на изменения условий работы.

Когда возникает потребность в горячей воде, холодная подпиточная вода поступает в накопительный бак, понижая его температуру. Система управления активирует насос и открывает клапан конденсата, циркулируя воду через теплообменник, где пар передает тепло воде. Затем нагретая вода возвращается в накопительный бак через диффузорные трубки для поддержания процесса градации, обеспечивая эффективную подачу горячей воды до тех пор, пока температура в баке не восстановится [10].

Основой системы является теплообменник, в котором происходит передача тепловой энергии. Динамика этого процесса, как правило, медленная и регулируется принципами теплопередачи и тепловой массой воды и оборудования. Эффективность теплопередачи зависит от скорости потока пара, скорости потока воды и физических свойств теплообменника.

Парорегулирующий клапан является последним элементом управления (приводом), которым управляет система управления. Он регулирует поток пара в теплообменник.

Динамика клапана обычно намного быстрее, чем тепловая динамика теплообменника. Он имеет свои собственные характеристики, такие как время отклика, характеристики потока (например, линейные или пропорциональные) и потенциальные нелинейности, такие как сопротивление или гистерезис.

Для реализации эффективной системы управления используются датчики, измеряющие ключевые параметры технологического процесса. Наибольшее значение имеет измерение температуры воды на выходе из котла, так как именно она является основной управляемой величиной, определяющей качество функционирования всей системы. Также важную роль играет измерение расхода или давления пара, который используется в качестве источника тепла и контролируется во внутреннем контуре каскадной системы. Надёжность, точность и быстродействие этих датчиков имеют критическое значение, поскольку от их корректной работы зависит своевременность реакции системы управления на изменения условий, а следовательно – стабильность и безопасность функционирования водогрейного котла.

Проблема заключается в том, что первичное возмущение (давление пара) является быстродействующим, а процесс, которым мы хотим управлять (температура), – медленнодействующим. Это несоответствие в динамике – именно та проблема, которую призвано решить каскадное управление.

1.3 Традиционные методы управления

Одной из наиболее широко применяемых стратегий автоматического регулирования в промышленных системах является ПИД-регулятор. В одноконтурной схеме управления котлом измерение выходной температуры воды осуществляется с помощью температурного датчика, после чего полученное значение сравнивается с заданным (уставкой). На основе разности между текущим значением и заданием регулятор формирует управляющее воздействие, которое подаётся на исполнительный механизм чаще всего паровой регулирующий клапан. Работа ПИД-регулятора основывается на трёх составляющих: пропорциональная часть обеспечивает реакцию на величину текущей ошибки, интегральная – устраняет остаточное отклонение в установившемся режиме, а дифференциальная – позволяет предсказать направление и скорость изменения ошибки, способствуя упреждающему воздействию. Такой подход позволяет достичь приемлемого уровня точности, устойчивости и быстродействия системы при относительно простой реализации.

В простейшей конфигурации котел использует базовый контур управления с обратной связью для поддержания температуры воды на выходе путем манипулирования потоком пара используя паровой клапан.

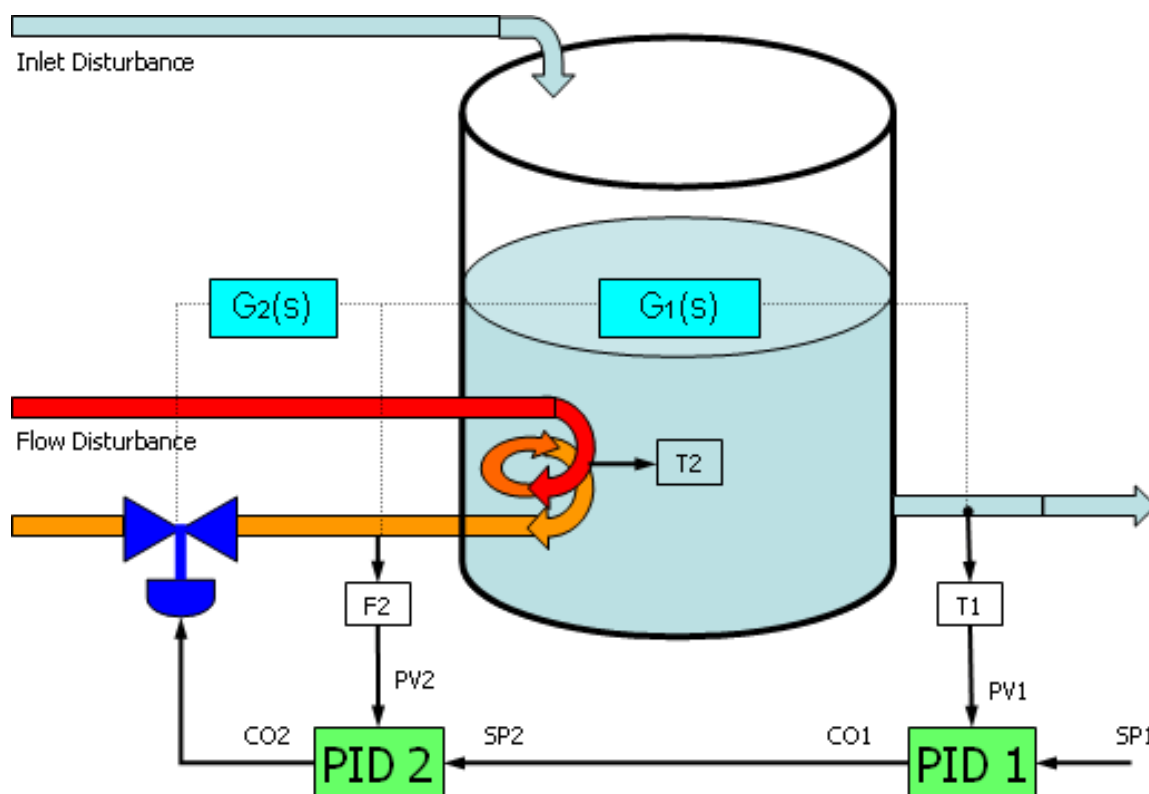


Рисунок 1.5 – Функциональная схема управления, включающая первичный (внешний) контур и вторичный (внутренний) контур

Первичный контур, также известный как внешний контур, играет важнейшую роль в регулировании температуры воды на выходе (T_1). Его основная функция заключается в поддержании требуемого теплового равновесия в системе котла путем определения оптимального расхода пара. Этот контур работает в более медленном масштабе времени, поскольку он управляет общей стабильностью температуры, которая по своей сути является постепенным процессом. Сосредоточившись на поддержании теплового равновесия, он обеспечивает соответствие температуры подаваемой воды заданному значению в системе даже при наличии внешних возмущений.

Вторичный контур, или внутренний контур, предназначен для более быстрого реагирования и точности. Он непосредственно управляет положением парового клапана для регулирования расхода пара, поступающего в теплообменник. Его основная задача – быстро реагировать на резкие колебания, вызванные нарушениями в системе снабжения, например, изменениями давления пара. Стабилизируя эти быстрые колебания, внутренний контур позволяет внешнему контуру сосредоточиться на более медленной и масштабной задаче регулирования температуры, обеспечивая эффективность и оперативность работы котельной системы.

Эта взаимодополняющая связь между внутренним и внешним контурами является сутью каскадного регулирования.

Благодаря разделению задач управления между этими двумя контурами, каскадная система управления достигает максимальной производительности.

Вторичный контур быстро компенсирует возмущения, в то время как первичный контур обеспечивает соответствие температуры на выходе заданному значению (SP). Такой иерархический подход повышает устойчивость и минимизирует взаимодействие между быстрой и медленной динамикой процесса.

Использование каскадного управления вносит определенные сложности, например, необходимость независимой настройки двух ПИД-регуляторов. Однако это компенсируется значительным улучшением отбраковки возмущений и общей устойчивости системы. Кроме того, система может быть расширена за счет включения дополнительных уровней каскадного управления для более сложных приложений, хотя практические реализации редко превышают три уровня из-за уменьшения отдачи и увеличения сложности настройки.

2 Технологическая часть

2.1 Технологический процесс водонагревательного котла

В основе рассматриваемой установки лежит паровой водонагреватель. Компактный, промышленного исполнения агрегат, собранный на заводской раме и полностью готовый к подключению. Это решение представляет собой самодостаточную систему для эффективного производства горячей воды, интегрирующую все необходимые компоненты на единой платформе, что значительно упрощает монтаж и ввод в эксплуатацию. Промышленное исполнение гарантирует высокую надежность и долговечность оборудования в условиях интенсивной эксплуатации, а также соответствие строгим стандартам безопасности, предъявляемым к подобным системам.

Ключевой особенностью данной установки, рисунок 2.1, является то, что она использует горячий пар, поступающий как побочный продукт из другой установки или технологического процесса, например, от турбин или когенерационных систем. Такой подход позволяет значительно повысить общую энергоэффективность предприятия, утилизируя тепло, которое в ином случае было бы потеряно. Этот принцип является основой для создания интегрированных энергетических циклов, сокращающих потребление первичных энергоресурсов и снижающих эксплуатационные расходы.

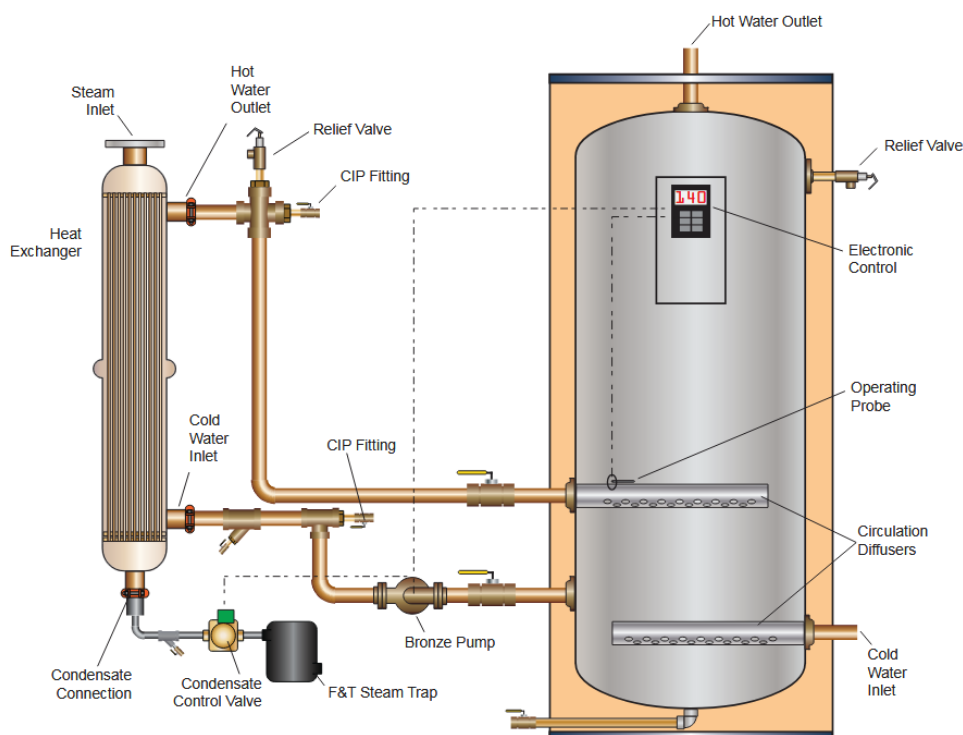


Рисунок 2.1 – Схема устройства и подключения водонагревателя на основе парового теплообменника

Сердцем установки является кожухотрубный теплообменник с медно-бронзовыми трубами, выполненный по схеме противотока. Пар, подаваемый в один контур теплообменника, передаёт тепло воде, протекающей по другому контуру в противоположном направлении, обеспечивая эффективность передачи тепла, точность контроля температуры и быстрый отклик системы.

Важной особенностью конструкции является использование медно-бронзовых труб в теплообменнике, что обеспечивает высокую теплопроводность и коррозионную стойкость, необходимые для длительной и эффективной работы в условиях постоянного нагрева и контакта с водой. Применение противоточной схемы значительно увеличивает коэффициент теплопередачи, позволяя достигать максимально возможного температурного напора по всей длине теплообменника. Это, в свою очередь, способствует высокой энергетической эффективности установки и минимизации потерь тепла. Кроме того, данная конструкция обеспечивает быстрое достижение требуемой температуры воды благодаря интенсивной передаче тепла от пара к воде.

Сердцем установки является кожухотрубный теплообменник с медно-бронзовыми трубами, выполненный по схеме противотока. Пар, подаваемый в один контур теплообменника, передаёт тепло воде, протекающей по другому контуру в противоположном направлении, обеспечивая эффективность передачи тепла, точность контроля температуры и быстрый отклик системы, на рисунке 2.2 приведен элемент теплообменника водонагревателя.

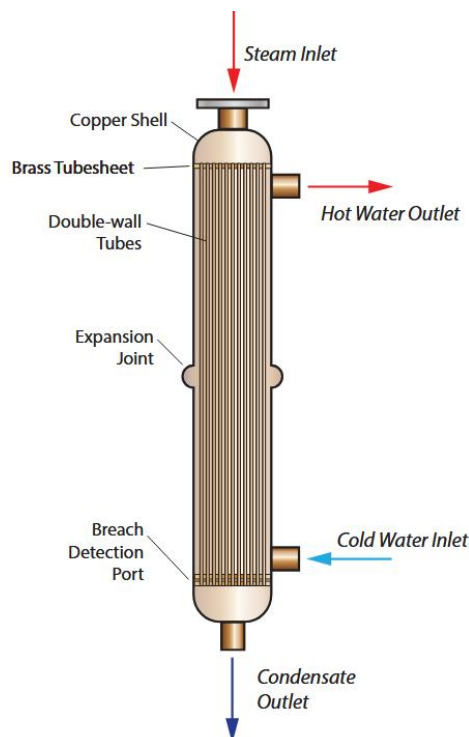


Рисунок 2.2 – Внешний вид и структурная схема элемента теплообменника

Установка полностью укомплектована – включая циркуляционный насос, управляемые клапаны, конденсатоотвод и систему электрических защит, встроенных на промышленной раме.

Технологический цикл начинается с подпиточной воды, поступающей из накопительного бойлера. Как только температура опускается ниже заданной точки, срабатывает система управления: включается циркуляционный насос, открывается клапан паровой линии, и пар поступает в теплообменник, мгновенно передавая тепло воде. Нагретая вода возвращается в нижний бак через диффузоры, обеспечивая гомогенность температуры. Охлаждённый пар конденсируется и выводится через конденсатоотвод, что способствует поддержанию термодинамического цикла и рациональному использованию ресурсов.

На рисунке 2.3 приведена структурная схема водонагревательной установки, иллюстрирующая взаимосвязь основных компонентов и потоков рабочей среды. Данная схема демонстрирует путь пара от входной линии (Steam In), проходящего через Y-образный фильтр (Y-Strainer) и редуцирующий клапан давления (Pressure Reducing Valve), который обеспечивает подачу пара под контролируемым давлением в теплообменник. Конденсат, образующийся после теплообмена, отводится в конденсатосборник (Condensate Receiver) для последующей утилизации или возврата в систему.

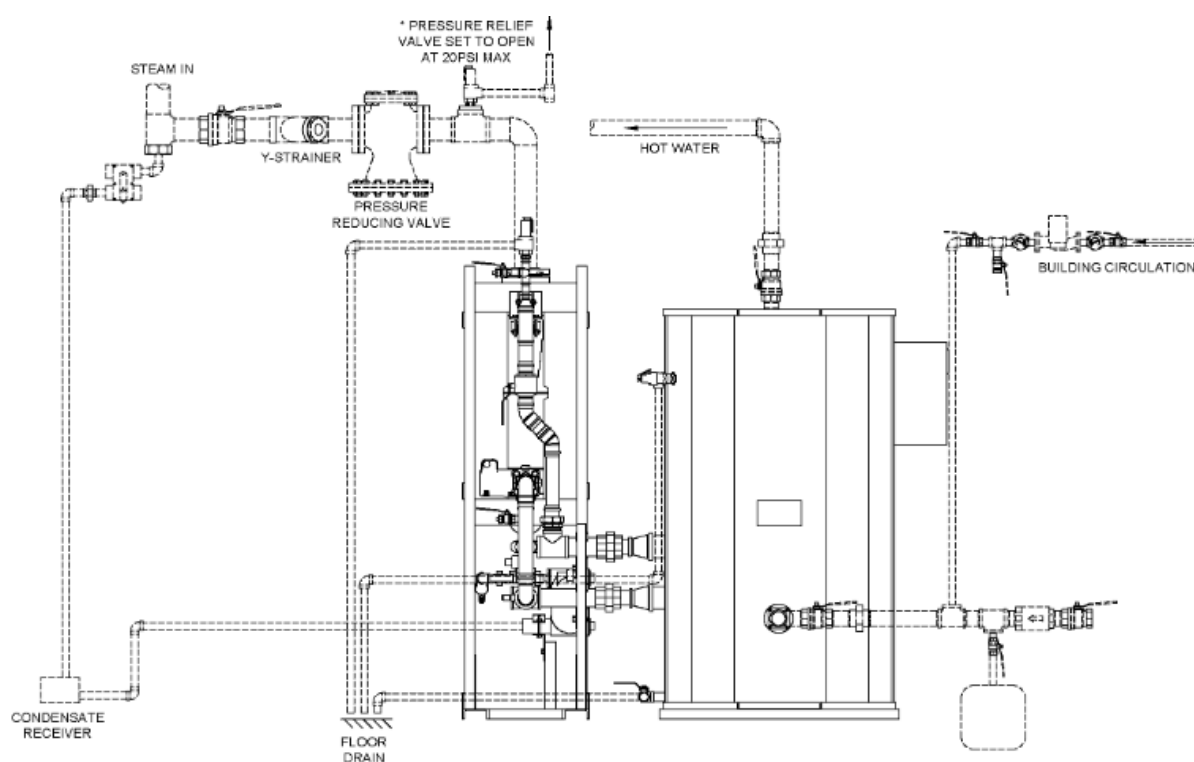


Рисунок 2.3 – Структурная схема водонагревательной установки

С другой стороны схемы показан контур воды: холодная вода поступает в накопительный бак, где происходит ее нагрев. Нагретая вода затем подается в контур горячего водоснабжения (Hot Water) и в систему циркуляции здания (Building Circulation), обеспечивая подачу горячей воды потребителям. На схеме также обозначены элементы безопасности, такие как предохранительный клапан давления (Pressure Relief Valve), а также дренажные линии (Floor Drain), необходимые для обслуживания и опорожнения системы. Такая наглядная схема позволяет детально проанализировать технологический процесс и принципы функционирования водонагревательной установки в целом.

Особое внимание уделено динамике процесса: подача пара и циркуляция воды – быстроизменяющиеся параметры, тогда как нагрев воды сопряжён с инерцией. Такая разница во времени реакций требует продуманной автоматизации и точной настройки системы регулирования. Встроенные датчики температуры и расхода/давления обеспечивают надёжное измерение контролируемых переменных, в том числе для каскадного управления, где внутренний контур стабилизирует подачу пара, а внешний – обеспечивает стабилизацию выходной температуры воды. Система безопасности включает защиту от перегрева, ограничители давления, а также температурные аварийные клапаны.

Для наглядного представления взаимодействия основных компонентов системы управления на базе парового водонагревателя рассмотрим функциональную схему автоматизации. Она отображает структуру системы, включая контуры регулирования, измерительные элементы, исполнительные механизмы и связи между ними. Схема позволяет понять, каким образом осуществляется сбор информации о параметрах процесса, её обработка системой управления и формирование управляющих воздействий, направленных на поддержание стабильной температуры нагреваемой воды. Особое внимание в этой системе уделяется организации каскадного регулирования, при котором внутренний контур обеспечивает контроль подачи пара, а внешний – а стабилизацию выходной температуры воды. Такая двухуровневая структура управления значительно повышает точность и динамические характеристики системы, минимизируя влияние возмущений. Эффективность этой схемы подтверждается её широким применением в промышленных системах, где требуется высокая степень автоматизации и надежности. Именно детальный анализ этой схемы позволяет не только понять логику работы системы, но и выявить потенциальные точки для оптимизации и улучшения показателей регулирования. Она служит основой для дальнейшего синтеза алгоритмов управления и выбора оптимальных настроек регуляторов. На рисунке 2.4 представлена функциональная схема автоматизации водонагревательного котла.

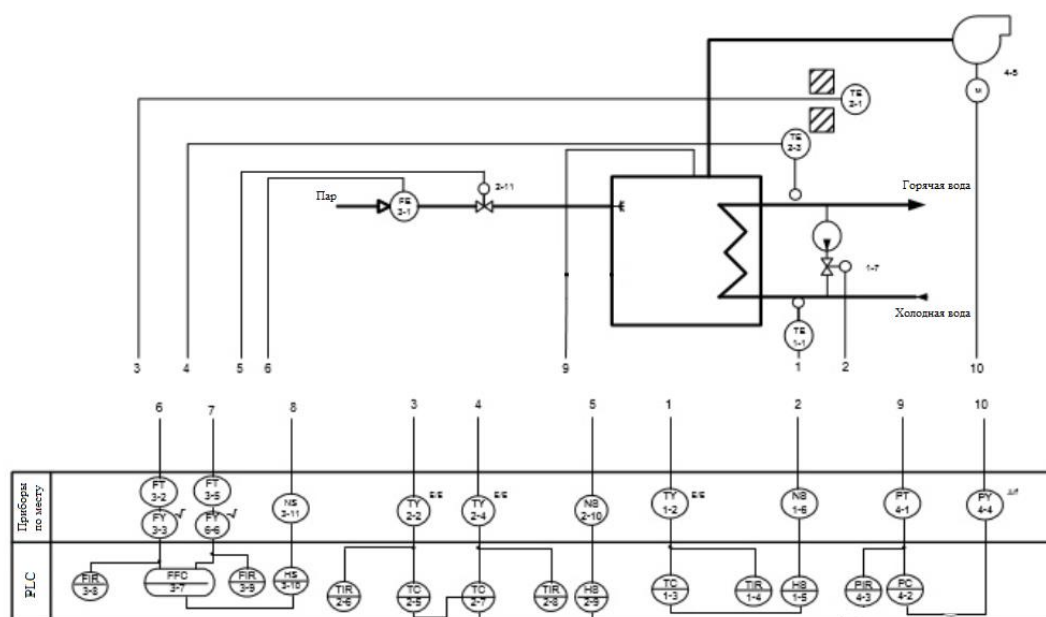


Рисунок 2.4 – Функциональная схема автоматизации водонагревательной установки

Функциональная схема автоматизации, детально иллюстрирует принцип работы системы управления водонагревательного котла. Центральное место в ней занимает контроллер, выполняющий роль управляющего центра установки. Он обрабатывает входную информацию от различных датчиков, установленных в ключевых точках системы: на входе и выходе теплообменника, в накопительном баке, а также в паровой линии. Температурные датчики фиксируют текущие значения температуры воды в разных зонах, что необходимо для реализации точного термического контроля. Датчики давления или расхода пара предоставляют данные, позволяющие оценить состояние теплового источника и своевременно реагировать на его колебания. Все эти измерения поступают в контроллер, где сравниваются с заданными значениями, и на основе выявленной ошибки формируются управляющие сигналы.

Контроллер передаёт управляющие команды исполнительным устройствам. Одним из ключевых исполнительных элементов является регулирующий клапан на паропроводе, обеспечивающий дозированную подачу пара в теплообменник в зависимости от текущей тепловой нагрузки. Его точная и быстрая работа критична для поддержания стабильности температуры нагрева. Не менее важен циркуляционный насос, отвечающий за непрерывное движение воды по системе, что гарантирует равномерность нагрева и отсутствие температурных зон. Также в систему могут быть включены вспомогательные устройства: электромагнитные клапаны, устройства смещения, сигнализаторы предельных значений и т.д. Все они формируют единый контур управления, направленный на обеспечение эффективности и надёжности работы котельной установки.

Особую роль в схеме играет реализация каскадного принципа регулирования, который позволяет справляться с различием во временных характеристиках между быстрым изменением давления пара и относительно медленным откликом температуры воды. Внутренний контур управления, работающий по сигналу от датчика давления пара, отвечает за быстрое реагирование системы на изменения источника тепла. Он обеспечивает устойчивость теплового потока, минимизируя влияние колебаний на процесс теплообмена. Внешний контур управления ориентирован на измерения температуры воды на выходе из системы и корректирует уставку внутреннего контура, тем самым обеспечивая согласованную работу обеих ветвей управления. Благодаря такому подходу достигается высокая точность регулирования, особенно в условиях динамически изменяющейся нагрузки, характерной для промышленных тепловых сетей. Каскадная структура позволяет минимизировать перерегулирование, повышает быстродействие системы и улучшает общее качество регулирования температуры.

Дополнительно функциональная схема отображает элементы системы безопасности, играющие критически важную роль в эксплуатации водогрейного оборудования. К ним относятся предохранительные клапаны, ограничители давления и температуры, датчики аварийных состояний, а также устройства отключения подачи пара в случае критического превышения заданных параметров. Все эти устройства связаны с контроллером, который непрерывно мониторит состояние системы и в случае выявления аварийной ситуации способен мгновенно инициировать защитные действия: отключить подачу пара, остановить насос, активировать аварийную сигнализацию или заблокировать работу оборудования. Такая архитектура повышает надёжность системы в целом и минимизирует риск выхода оборудования из строя или возникновения аварийных ситуаций.

Таким образом, представленная функциональная схема демонстрирует взаимосвязь всех компонентов автоматизированной системы управления паровым водогрейным котлом. Она обеспечивает не только высокую точность регулирования температуры воды, но и надёжность, гибкость адаптации к нагрузкам, а также безопасность эксплуатации. Использование каскадной структуры, продуманной архитектуры контуров управления и комплекса защитных устройств позволяет эффективно реализовать технологический процесс нагрева воды с использованием пара в промышленных условиях. На рисунке 2.5 представлен общий вид промышленной водонагревательной установки.



Рисунок 2.5 – Общий вид водонагревательной установки

3 Расчётная часть

3.1 Построение математической модели водогрейного котла и параметрическая идентификация модели

Для разработки эффективного регулятора на основе модели необходима точная математическая модель установки. В данном исследовании мы используем подход параметрической идентификации, который использует экспериментальные входные-выходные данные для получения модели. Этот метод часто является более практичным и точным, поскольку он по своей сути отражает истинную динамику построенной системы. Процесс включает в себя разработку эксперимента, сбор данных, предварительную обработку данных, выбор структуры модели, оценку параметров модели и валидацию окончательной модели.

Параметрическая идентификация является одним из важнейших этапов построения адекватных математических моделей сложных систем, таких как водонагревательные установки. Как показано на рисунке, суть этого процесса заключается в определении оптимального вектора параметров P для математической модели $Y = F(X, U, P)$, где X – вектор входных координат (возмущений), U – вектор варьируемых параметров, а Y – вектор выходных координат. Цель параметрической идентификации состоит в том, чтобы разработанная модель максимально точно (в наибольшей степени адекватно) описывала поведение реального объекта.



Рисунок 3.1 – Общая схема и задача параметрической идентификации

Формально задача параметрической идентификации сводится к минимизации расхождения между выходными данными, полученными от математической модели $Y_{mod}(P)$, и экспериментальными данными, измеренными на реальном объекте Y_{exp} .

Это выражается целевой функцией, представленной ниже

$$\|Y_{mod}(P) - Y_{exp} \rightarrow \min_{P \in P} \| \quad (3.1)$$

Здесь разница, насколько сильно модель ошибается по сравнению с реальностью, обозначает некоторую норму (например, сумму квадратов ошибок), а минимизация осуществляется по вектору параметров P в допустимом диапазоне P . Выбор оптимального вектора P позволяет модели воспроизводить поведение объекта с наименьшей возможной ошибкой. Для решения этой оптимизационной задачи, которая часто является нелинейной, используются различные методы минимизации функций многих переменных. К ним относятся градиентные методы, методы наискорейшего спуска, Монте-Карло, а также более современные алгоритмы нелинейного программирования и глобальной оптимизации. Выбор конкретного метода зависит от сложности модели, количества идентифицируемых параметров и доступных вычислительных ресурсов.

Для моделирования объекта управления (ОУ) с регулированием давления подаваемого пара в теплообменнике была проанализирована динамика нагрева воды и нарастания давления потока пара. Основное внимание уделяется тому, как тепло, поступающее от пара, передаётся воде через теплообменную поверхность, и как изменения входных параметров – в частности, давления пара и расхода воды – влияют на выходную температуру. Такой подход позволяет описать термодинамическое поведение системы в виде математической модели, пригодной для дальнейшего анализа и синтеза системы управления.

При построении модели предполагается, что теплообменник представляет собой сосредоточенную тепловую ёмкость, где теплопередача от пара к воде может быть описана уравнением теплового баланса. Вода циркулирует через теплообменник с определённой массой и теплоёмкостью, накапливая подводимое тепло и передавая его на выходе в виде повышения температуры. Пар, поступающий в змеевик или трубный контур, передаёт своё скрытое тепло конденсации, а его давление и температура влияют на интенсивность теплопередачи. Таким образом, система характеризуется как инерционный объект с запаздыванием, в котором изменение подачи пара не приводит к мгновенному изменению температуры воды на выходе, а проявляется с определённой задержкой и временной постоянной.

Для параметрической идентификации модели были использованы данные, полученные в результате моделирования или экспериментального наблюдения переходных процессов реакции температуры воды на ступенчатое изменение давления пара. На основе этих данных аппроксимация объекта была выполнена с помощью линейной динамической модели второго порядка или последовательного соединения апериодических звеньев.

В дальнейшем такая модель будет использоваться для расчёта параметров регуляторов, оценки устойчивости системы и проведения компьютерного моделирования в среде MATLAB/Simulink.

В ходе эксперимента котёл доводился до установившегося состояния и работал в режиме постоянной подачи пара в теплообменник при неизменном расходе воды.

Для исключения влияния внешних факторов на результаты измерений были замкнуты внутренние контуры регулирования уровня воды и температуры в самом котле: управляющие алгоритмы непрерывно поддерживали заданные значения уровня, давления и исходной температуры воды, действуя на подпиточный насос, регулирующий клапан подпитки и контур рециркуляции. Одновременно контур регулирования температуры теплообменника оставался открытым, что позволяло фиксировать динамику изменения выходной температуры в ответ на заранее заданные шаговые изменения давления пара. По каждому экспериментальному прогону регистрировались временные характеристики процесса – зависимость температуры и давления во внутреннем контуре от времени, что позволило собрать полный комплект данных для последующего анализа. Эти временные ряды были использованы в процедурах параметрической идентификации.

Идентификация системы представляет собой ключевой этап в разработке автоматизированного регулятора, поскольку позволяет получить точное эмпирическое описание динамического поведения котла под реальными эксплуатационными условиями. Без корректно определённых параметров модели любые расчёты по настройке ПИД-регулятора будут носить лишь приближённый характер и зачастую приводят к недостаточно точному или слишком консервативному управлению. В частности, знание истинных значений постоянных времени, коэффициентов передачи и порядка динамики системы даёт возможность прогнозировать реакцию котла на управляющие воздействия и оценивать устойчивость будущей замкнутой системы заранее, ещё до её внедрения на оборудовании.

Процедура идентификации включает несколько этапов. Сначала на оборудовании выполняются специально спланированные эксперименты – ступенчатые изменения подачи пара или расхода воды – при которых фиксируется временное изменение ключевых выходных величин (температуры и давления). Затем полученные переходные характеристики подвергаются математической обработке: с помощью методов наименьших квадратов или алгоритмов частотного анализа определяется априорная структура модели (например, апериодическое звено первого порядка с запаздыванием или более сложная модель второго порядка). После этого численные параметры модели уточняются путём минимизации ошибки между экспериментальными данными и откликом моделируемой системы.

В результате создаётся адекватная математическая модель, описывающая динамику котла с достаточной точностью для инженерных расчётов.

Такая модель позволяет не только подобрать оптимальные коэффициенты ПИД-регулятора, пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие, но и оценить запас устойчивости, минимизировать перерегулирование и обеспечить требуемую скорость переходного процесса.

В дальнейшем точность модели служит основой для проведения компьютерного моделирования и тестирования работы регулятора в виртуальной среде, что значительно снижает риски при выводе системы в эксплуатацию и экономит время на её наладку.

Опираясь на полученную в ходе идентификации математическую модель, следующим шагом является детальный анализ ключевых компонентов котельной установки, поскольку именно их динамические свойства во многом определяют поведение всей системы управления. Во-первых, это сам водонагреватель – кожухотрубный теплообменник, отвечающий за передачу теплоты конденсации пара циркулирующей воде. Его динамика, как правило, описывается апериодическим звеном первого или второго порядка с достаточно большой постоянной времени и, зачастую, с запаздыванием, вызванным накоплением тепловой энергии в массе металла труб и стенок. Именно из-за этой инерционности теплообменника изменение подачи пара не сразу отражается на выходной температуре воды, что требует применения систем с разделёнными временными шкалами управления. При аналитическом исследовании теплообменника мы оцениваем его передаточную функцию, определяем время запаздывания и величину коэффициента передачи пар-вода, а также учитываем нелинейные зависимости теплоотдачи от скорости потока и разности температур.

Вторым важнейшим элементом является клапан управления потоком пара, который непосредственно осуществляет дозирование рабочей среды в теплообменнике. Динамика этого клапана отличается существенно меньшей инерционностью, время открытия/закрытия и переходные процессы протекают гораздо быстрее, чем в самом теплообменнике, однако на его характеристику влияют такие факторы, как зависимость пропускной способности от положения штока, наличие гистерезиса и зоны нечувствительности, а также возможное воздействие вибраций и колебаний давления в паропроводе. При построении модели клапана мы выделяем его передаточную функцию, определяем коэффициент передачи управляющее воздействие-расход пара и оцениваем динамическую точность (время установки и перерегулирование). Совокупное исследование этих двух подсистем медленного теплообменника и быстродействующего клапана позволяет заложить основу для синтеза каскадного регулятора, в котором внутренний контур компенсирует быстрые возмущения потока пара, а внешний контур отвечает за медленное и точное слежение за температурой горячей воды.

Сбор и обработка экспериментальных данных для идентификации модели в MATLAB System Identification Toolbox начинались с подготовки временных рядов входных и выходных сигналов в формате, удобном для работы в среде MATLAB. Это включало импорт данных из различных источников, таких как датчики температуры, расхода пара и воды, с последующей синхронизацией, фильтрацией шумов и устранением возможных пропусков или аномалий.

Далее, эти очищенные данные преобразовывались в специализированные объекты данных (например, `iddata` или `idfrd`), что позволяло использовать мощные инструменты Toolbox, рисунок 3.2, для визуализации, предварительного анализа и выбора подходящих моделей.

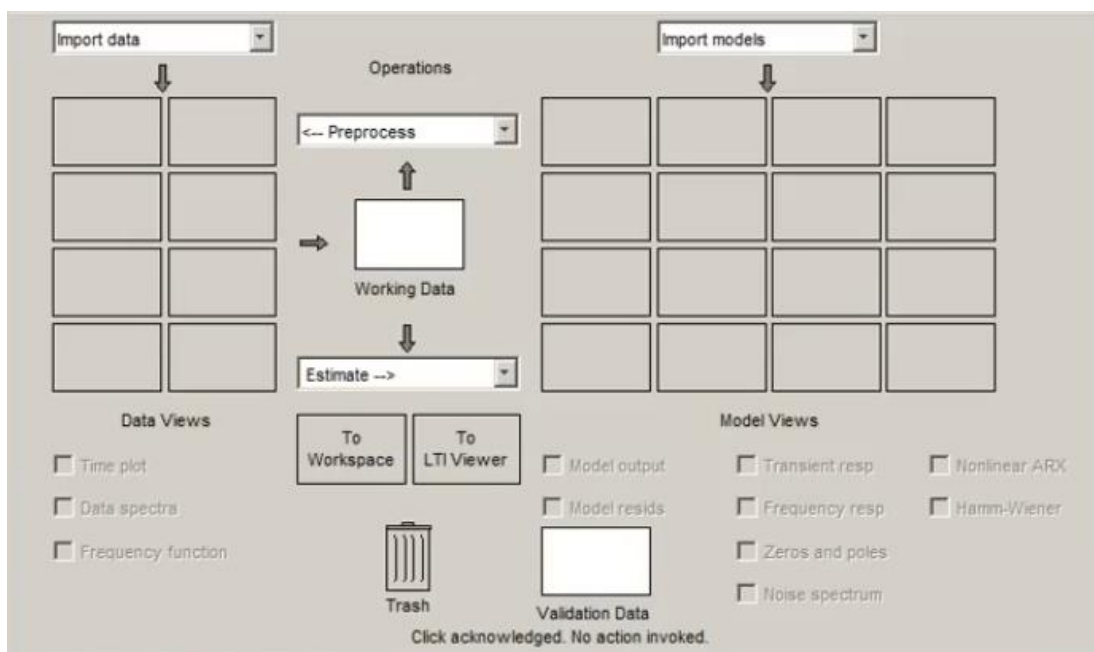


Рисунок 3.2 – Окно MATLAB System Identification Toolbox

Работа в MATLAB System Identification Toolbox начинается с импорта экспериментальных рядов расхода пара и температуры воды в виде объектов данных, готовых к анализу. При открытии раздела System Identification создаётся новый проект, рисунок 3.3, где пользователю предлагается загрузить файлы с измерениями.

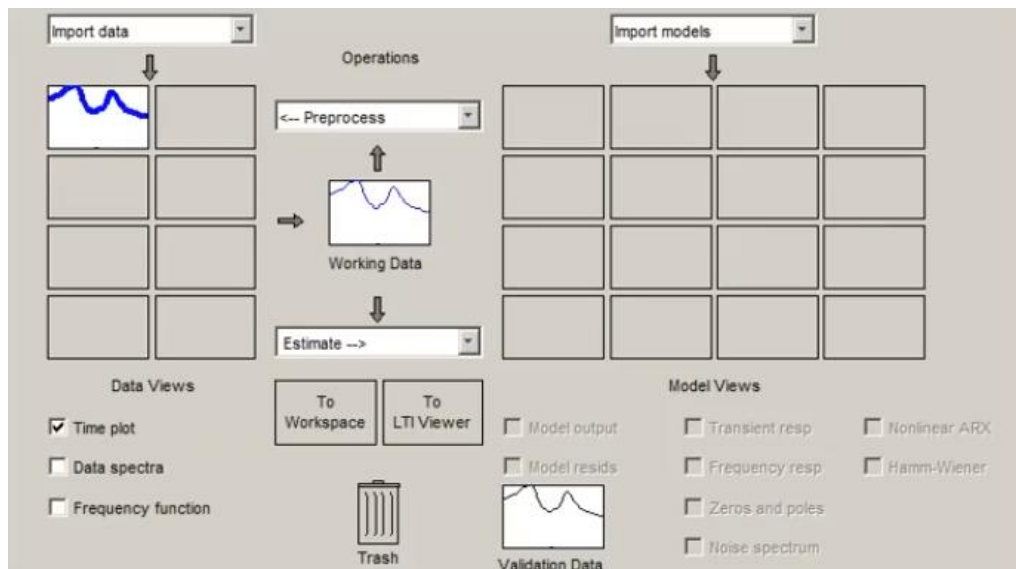


Рисунок 3.3 – Окно импортированных данных

Сразу после импорта сигналов они визуализируются на графиках, рисунок 3.4, что позволяет определить наличие аномальных выбросов и долгосрочных трендов.

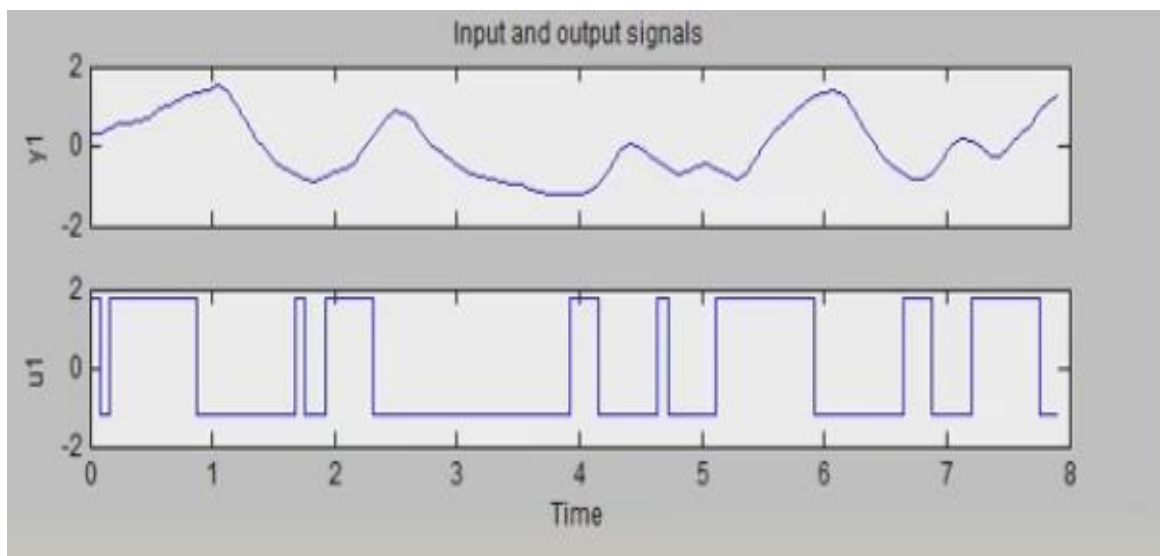


Рисунок 3.4 – Окно предпросмотра исходных данных

Для повышения качества будущей модели применяются встроенные команды очистки: автоматически удаляются выбросы, не соответствующие характерным переходным процессам, а медленные «фоновые» изменения удаляются с помощью встроенного фильтра высоких частот. Такая предварительная обработка гарантирует, что инструмент идентификации будет работать только с полезными динамическими компонентами, отражающими реакцию котла на управляющие воздействия.

При настройке параметров идентификации в System Identification Toolbox одним из ключевых шагов является выбор порядков полиномов числителя и знаменателя передаточной функции, которая будет аппроксимировать динамику исследуемого объекта. Этот процесс начинается с перехода во вкладку «Model Structure» в графическом интерфейсе Toolbox, где затем выбирается тип модели «Transfer Function». В появившемся диалоговом окне, рисунок 3.5, пользователю предстоит указать желаемые порядки: например, порядок числителя задаёт число коэффициентов при степенях s^i в полиноме числителя, а порядок знаменателя аналогично определяет число коэффициентов для полинома в знаменателе. Крайне важно помнить, что слишком низкий порядок может оказаться неспособным адекватно отразить всю сложность динамики системы, в то время как чрезмерно высокий, напротив, приведёт к нежелательному переобучению, когда модель начинает воспроизводить шум данных, теряя при этом свою способность к обобщению на новые, неизвестные данные.

Model name: tf1

Number of poles: 2

Number of zeros: 1

☒ Continuous-time ☐ Discrete-time (Ts = 0.08)

► I/O Delay

▼ Estimation Options

	Minimum	Maximum
Fit frequency range:	0	39.2699

☐ Display progress

☒ Estimate covariance

Initial condition: auto

Initialization method: iv

Estimate Close Help

Рисунок 3.5 – Окно выбора параметров системы

Помимо этого, в данном диалоговом окне предусмотрена возможность задать параметр «Input Delay», который позволяет априорно учесть известное запаздывание между моментом подачи управляющего воздействия и началом фактического отклика системы. Это помогает более точно идентифицировать внутреннюю динамику объекта, исключая из рассмотрения задержки, не связанные напрямую с его физическими процессами.

В процессе идентификации математической модели исследуемого объекта были применены различные комбинации параметров передаточной функции, такие как порядки полиномов числителя и знаменателя, а также значения транспортного запаздывания. Для каждой из этих комбинаций System Identification Toolbox оценивал соответствующие коэффициенты, стремясь наилучшим образом аппроксимировать динамику системы. В результате этой работы, рисунок 3.6, было получено несколько кандидатов на роль передаточной функции, каждый из которых представлял собой модель с определенной структурой и набором идентифицированных параметров.

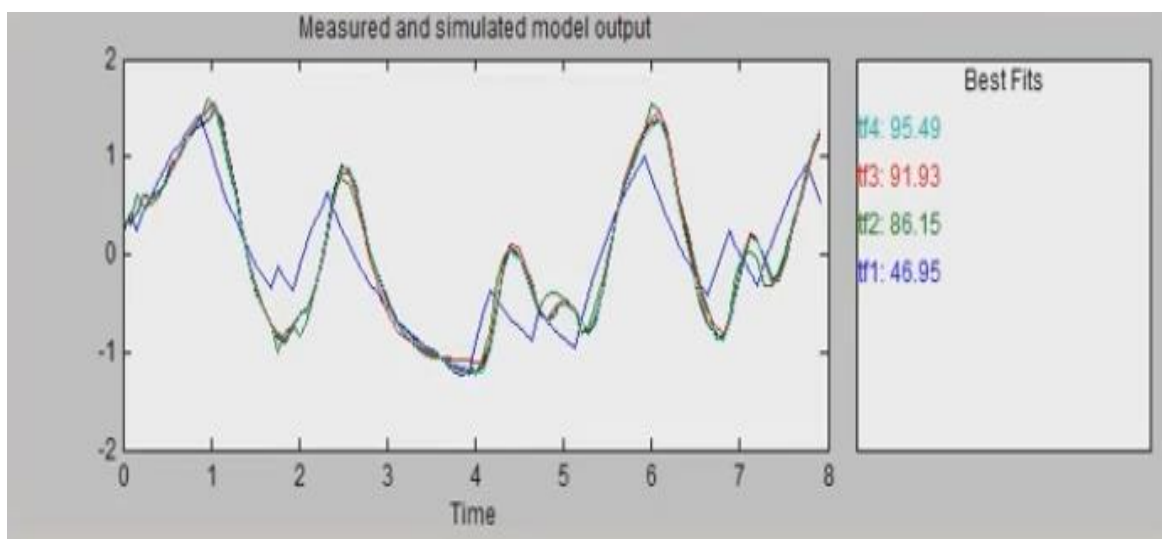


Рисунок 3.6 – Результаты параметрической идентификации

Динамика теплообменника в системе водогрейного котла определяется взаимосвязью между количеством тепловой энергии, подаваемой через пар (входной сигнал), и температурой нагреваемой воды на выходе (выходной сигнал). Поскольку процесс теплопередачи между паром и водой в теплообменнике характеризуется выраженной инерционностью, наличием тепловой ёмкости и возможным запаздыванием, его поведение не может быть адекватно описано простыми статическими соотношениями. Для точного воспроизведения динамики был проведён эксперимент, в рамках которого на систему воздействовали ступенчатым изменением расхода пара при фиксированном расходе воды. В результате были получены данные переходного процесса, отражающие, как система реагирует на скачкообразное изменение теплового потока.

В ходе подбора структуры модели было установлено, что наилучшее соответствие между экспериментальным и моделируемым откликом даёт передаточная функция второго порядка. Такая модель позволяет учитывать как инерционные свойства теплообменника, так и его способность накапливать и передавать тепло с определённой задержкой и скоростью. В результате процесса идентификации была получена следующая передаточная функция

$$G_{Heater}(s) = \frac{0.2101s + 0.01235}{s^2 + 0.06787s + 0.006284} \quad (3.2)$$

Числитель передаточной функции включает дифференциальную составляющую, что отражает влияние скорости изменения теплового потока на динамику нагрева. Это указывает на то, что не только абсолютное значение подаваемого пара, но и темп его изменения оказывает влияние на температуру на выходе. Второй порядок системы, и два коэффициента, определяющие амортизацию и скорость нарастания отклика. Такое представление системы свидетельствует о её апериодическом поведении с умеренным замедлением.

Важно подчеркнуть, что данная модель описывает исключительно тепловую динамику самого теплообменника и не включает в себя элементы управления, такие как клапан подачи пара. Она отражает поведение объекта при условии, что подача пара регулируется напрямую и без ограничения — то есть в условиях идеального воздействия. Таким образом, модель используется как основа для построения первичного (внешнего) температурного контура каскадной системы управления, в котором задача регулятора заключается в обеспечении стабильного выхода температуры воды при воздействии различных внешних возмущений. На следующем этапе данная передаточная функция будет использована для синтеза ПИД-регулятора внешнего контура, а также для оценки устойчивости и качества переходных процессов в имитируемой системе.

Эта модель отражает динамическое поведение системы и служит основой для разработки ПИД-регулятора. Полученные параметры передаточной функции позволяют точно настроить регулятор, обеспечивая эффективное регулирование и поддержание требуемых уровней давления в котле.

Для проверки получившейся модели соберем схему моделирования системы автоматического регулирования с помощью MATLAB и промоделируем для получения переходных характеристик разомкнутой САР, рисунок 3.7. А также импортируем экспериментальные данные в Simulink.

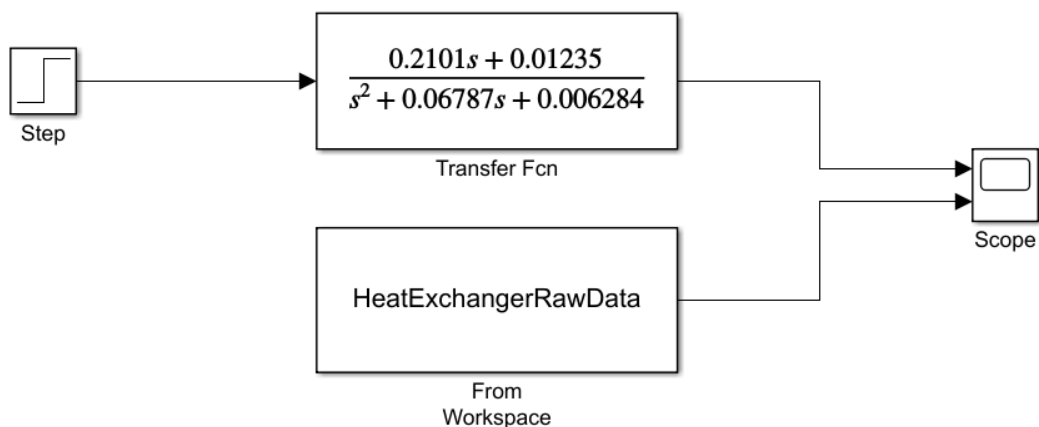


Рисунок 3.7 – Структурная схема разомкнутой САР нагревателя

На рисунке 3.8 приведен график сравнения данных из эксперимента и результатов моделирования водонагревателя, он иллюстрирует переходный процесс смоделированного теплообменника, демонстрируя его соответствие экспериментальным данным и подтверждая обоснованность идентифицированной модели.

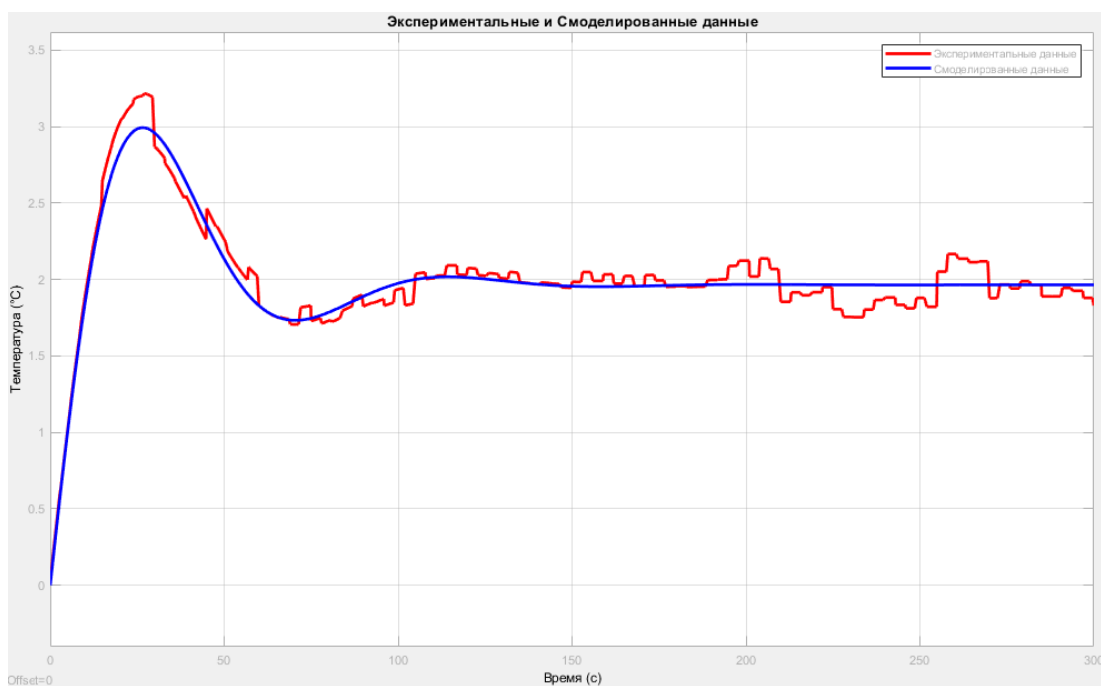


Рисунок 3.8 – Сравнение экспериментальных и смоделированных данных нагревателя

Отдельно стоящий регулирующий клапан управления потоком пара является одним из ключевых компонентов всей системы автоматического управления водогрейным котлом. Его функция заключается в точной дозировке количества пара, поступающего в теплообменник, в соответствии с управляющим сигналом от контроллера.

От надёжности и точности работы этого элемента напрямую зависит эффективность и стабильность теплопередачи, а значит способность системы поддерживать заданную температуру воды на выходе при изменяющейся тепловой нагрузке. Для того чтобы обеспечить высокую точность управления и адекватно встроить клапан в общую математическую модель системы, было проведено отдельное исследование его динамических и статических характеристик, направленное на выявление основных факторов, влияющих на его поведение в реальных условиях эксплуатации.

Особое внимание в этом исследовании уделялось оценке динамики реакции клапана на управляющие воздействия. Поскольку клапан является механическим устройством с определённой инерцией, его отклик на изменения управляющего сигнала не является мгновенным. Были рассмотрены такие особенности, как запаздывание сигнала, инерционность движущихся частей, а также влияние нелинейностей, присущих клапанным механизмам, таких как гистерезис (задержка между изменением сигнала и началом движения), мёртвые зоны (зоны, в которых малые управляющие воздействия не вызывают изменений расхода) и эффект насыщения (ограничение максимальной пропускной способности клапана при достижении крайних положений). Все эти характеристики влияют на способность системы точно регулировать поток пара, особенно при малых изменениях уставки или при работе в динамических режимах.

Для получения достоверной модели клапана были собраны экспериментальные данные, отражающие его поведение в ответ на ступенчатые и линейные изменения управляющего сигнала. В процессе эксперимента фиксировались значения управляющего воздействия (например, управляющее напряжение или позиция штока клапана) и соответствующие значения расхода пара. Эти данные были загружены в MATLAB System Identification Toolbox, где была проведена процедура параметрической идентификации. Для моделирования поведения клапана была выбрана структура передаточной функции первого порядка с запаздыванием, отражающая инерционную, но достаточно быструю динамику элемента. В результате обработки данных и оптимизации параметров была получена следующая модель

$$G_{valve}(s) = \frac{3.152e^{-0.6s}}{2.89s+1} \quad (3.3)$$

Эта передаточная функция описывает реакцию расхода пара на управляющее воздействие. Числитель модели содержит коэффициент передачи, показывающий чувствительность клапана к управляющему сигналу, а также звено запаздывания, указывающее на время, необходимое клапану для начала физического движения после подачи сигнала. Знаменатель отражает инерционные свойства клапана.

Такая структура модели позволяет достаточно точно аппроксимировать поведение клапана в широком диапазоне рабочих условий и учесть задержку в реакции при разработке каскадной системы управления.

Идентифицированная передаточная функция, полученная на основе экспериментальных данных, учитывает не только статические характеристики регулирующего клапана, но и его динамическое поведение, что является критически важным для точного моделирования системы в целом. Модель включает в себя как запаздывание, связанное с физическим временем срабатывания исполнительного механизма, так и инерцию, обусловленную его массой и гидравлическими сопротивлениями. Таким образом, эта передаточная функция служит ключевым элементом для последующего анализа и синтеза контуров регулирования, обеспечивая предсказуемость отклика клапана на управляющие воздействия и повышая стабильность всей системы.

Для визуального представления работы клапана была построена структурная схема его разомкнутой системы автоматического регулирования (САР), показанная на рисунке 3.9. Эта схема иллюстрирует взаимодействие управляющего сигнала с динамикой клапана без участия обратной связи — то есть отображает чистое поведение клапана как объекта управления. Она позволяет изолированно исследовать отклик клапана, не включая теплообменник и другие элементы системы.

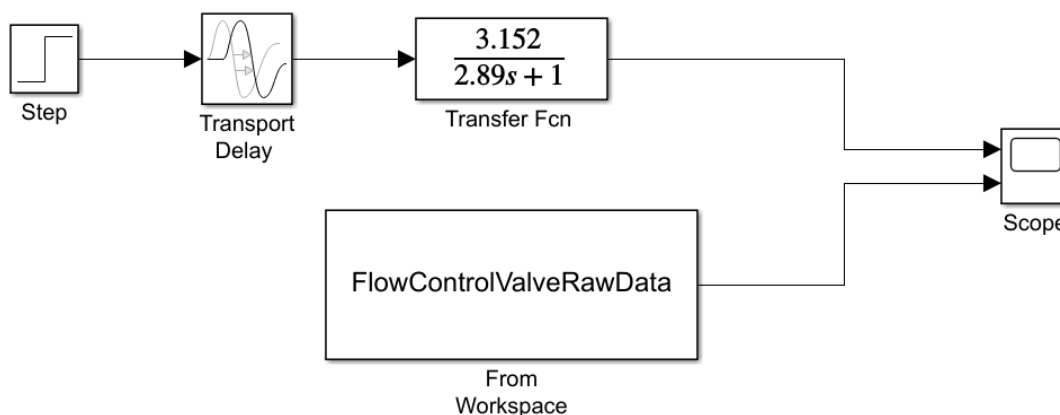


Рисунок 3.9 – Структурная схема разомкнутой САР клапана

На рисунке 3.10 представлено сравнение экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний, и результатов, полученных с использованием смоделированной передаточной функции. График демонстрирует переходную характеристику клапана: после подачи ступенчатого управляющего сигнала расход пара начинает увеличиваться с определённой задержкой и выходит на установившееся значение с плавным ростом, соответствующим инерции и амортизации механической системы.

Близкое соответствие между экспериментальной кривой и результатами моделирования подтверждает точность идентифицированной модели и её пригодность для использования в дальнейшем проектировании регулятора. Это согласие особенно важно, поскольку точное представление поведения клапана обеспечивает устойчивость замкнутой системы управления и позволяет избежать нежелательных эффектов, таких как перерегулирование, колебания или запаздывание отклика всей системы при работе в условиях переменной нагрузки. На основании полученной переходной характеристики и высокого качества аппроксимации, модель клапана может быть уверенно использована для синтеза системы автоматического регулирования. Точность моделирования исполнительного механизма, каким является регулирующий клапан, имеет решающее значение для эффективной работы всей каскадной системы управления водонагревательной установкой. В частности, она позволяет корректно настроить параметры внутреннего контура регулирования расхода пара, что, в свою очередь, обеспечит стабильность и быстродействие внешнего контура, отвечающего за поддержание заданной температуры воды.

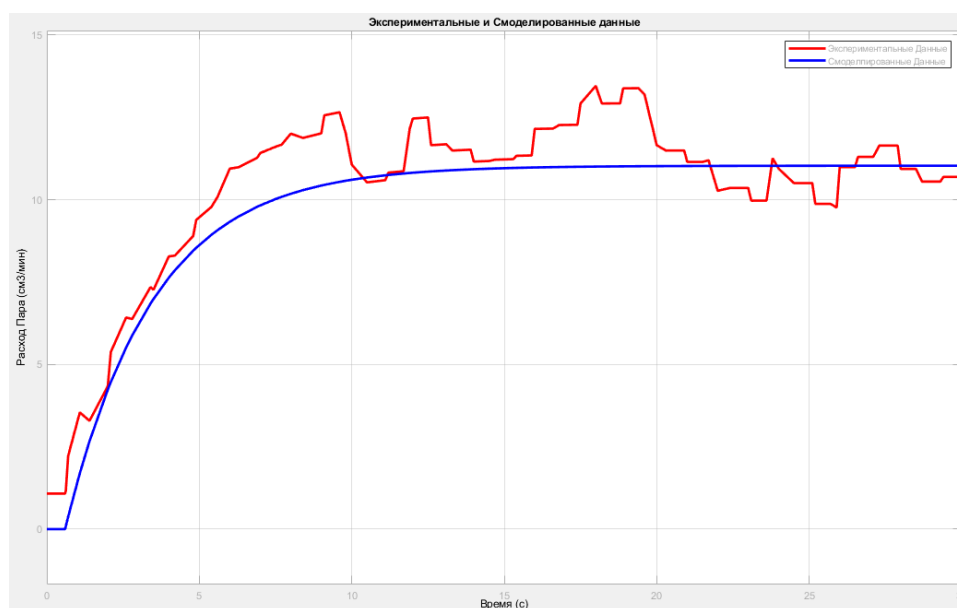


Рисунок 3.10 – Сравнение экспериментальных и смоделированных данных клапана

Таким образом, проведённая параметрическая идентификация клапана с учётом его физических и динамических характеристик позволила создать реалистичную модель, которая в дальнейшем будет использоваться при построении каскадной системы управления. Модель клапана дополняет ранее идентифицированную модель теплообменника, обеспечивая комплексное представление о всей динамике объекта, что необходимо для точного расчёта настроек регуляторов и построения устойчивой и эффективной системы автоматизации водогрейной котельной установки.

4 Анализ и синтез каскадной системы управления котельной

Разработка эффективной каскадной системы управления для автоматизированной водогрейной котельной представляет собой сложный процесс, направленный на интеграцию двух взаимосвязанных контуров управления: внешнего и внутреннего, каждый из которых выполняет специализированные функции для достижения оптимального регулирования динамического поведения системы. Внешний контур, обозначенный в предоставленном отрывке как темно-зеленый, отвечает за управление медленной динамикой, связанной с поддержанием температуры воды на выходе или давления в котле, обеспечивая общее тепловое равновесие в системе и компенсируя долгосрочные изменения, такие как колебания спроса на горячую воду. Внутренний контур, обозначенный оранжевым цветом, функционирует в более быстром временном масштабе, фокусируясь на устранении быстродействующих возмущений, таких как изменения расхода пара, посредством управления положением парового клапана, что позволяет стабилизировать входные параметры для внешнего контура и повысить общую устойчивость системы.

Такая структура, представленная на структурной схеме моделирования каскадной системы автоматического регулирования (САР) на рисунке 4.1, подчеркивает важность разделения задач управления для достижения высокой точности и стабильности в условиях сложной динамики котельной установки. Основная цель этого раздела заключается в углубленном анализе и синтезе каскадной системы управления, с учетом теоретических основ, методологии проектирования, результатов моделирования и потенциальных направлений для дальнейших исследований.

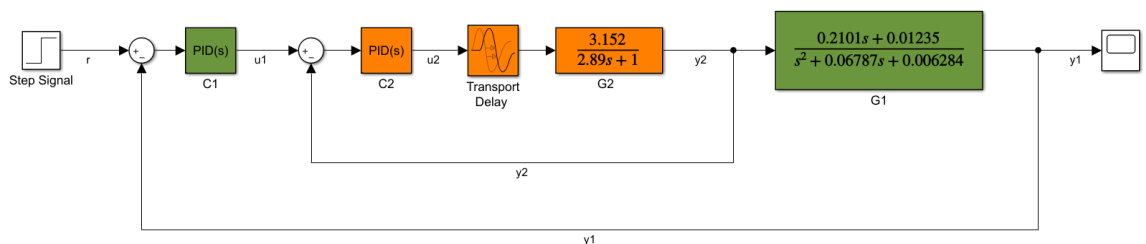


Рисунок 4.1 – Структурная схема моделирования каскадной САР

Каскадная система управления представляет собой многоуровневую стратегию, в которой выходной сигнал внешнего регулятора формирует заданное значение для внутреннего регулятора, что делает этот подход особенно подходящим для систем с различными временными характеристиками. В контексте водогрейной котельной установки, где быстрые изменения давления пара контрастируют с более медленной динамикой нагрева воды, каскадное управление позволяет эффективно разделять задачи регулирования.

Внутренний контур быстро реагирует на возмущения, связанные с подачей пара, такие как колебания давления или расхода, минимизируя их влияние на температуру воды, которая регулируется внешним контуром. Эта структура, подробно описанная в предоставленном отрывке, иллюстрируется на рисунке 4.1, где показаны две линии обратной связи, обеспечивающие взаимодействие между регуляторами и объектом управления. Теоретическая основа каскадного управления опирается на классические работы в области автоматического регулирования, включая исследования, посвященные многоуровневым системам, где подчеркивается способность таких систем улучшать подавление возмущений и повышать точность регулирования. В частности, использование каскадного подхода в котельных установках позволяет минимизировать влияние внешних факторов, таких как изменения нагрузки или нестабильность подачи энергоресурсов, что делает его предпочтительным выбором для автоматизированных систем, требующих высокой надежности и энергоэффективности.

Проектирование каскадной системы управления опирается на математические модели, разработанные в предыдущих разделах диссертации, включая модели теплообменника и парового клапана, которые были получены с использованием методов параметрической идентификации. Модель теплообменника, представленная в виде передаточной функции второго порядка, описывает медленную динамику процесса нагрева воды, учитывая инерционность теплопередачи и тепловую емкость системы. Эта модель, выраженная как отношение, включающее коэффициент усиления, коэффициент затухания и натуральную частоту, служит основой для настройки внешнего контура. Модель парового клапана, описанная передаточной функцией первого порядка с запаздыванием, отражает быструю динамику регулирования расхода пара, что делает ее подходящей для внутреннего контура. Процесс проектирования начинается с настройки внутреннего контура, где применяется ПИ-регулятор для обеспечения быстрого отклика на изменения давления или расхода пара. Настройка параметров ПИ-регулятора выполняется с использованием симуляционных методов в MATLAB/Simulink, что позволяет достичь минимального времени нарастания и низкого перерегулирования. После стабилизации внутреннего контура настраивается внешний контур, использующий ПИД-регулятор для управления температурой воды. Внешний контур учитывает уже настроенный внутренний контур как часть объекта управления, что позволяет сосредоточиться на достижении устойчивого отклика и минимальной ошибки в установившемся режиме. Синтез системы в пространстве состояний, упомянутый в отрывке, предоставляет дополнительные возможности для применения современных методов управления, таких как размещение полюсов, что обеспечивает точное управление динамическими характеристиками системы и повышает ее устойчивость к внешним возмущениям.

Проектирование каскадной системы управления водогрейным котлом требует точного понимания динамики всех его ключевых компонентов и их взаимодействия. Для этой цели применяются математические методы моделирования, позволяющие представить процессы теплопередачи, динамику расхода пара и поведение регулирующего клапана в виде совокупности передаточных функций и блоков с определёнными временными характеристиками. Модели создаются на основе экспериментальных данных путём параметрической идентификации и отражают как инерционные свойства теплообменника, так и динамику исполнительных механизмов. Это особенно важно в условиях реальных промышленных объектов, где процессы нагрева сопровождаются возмущениями, такими как колебания давления пара, изменение расхода воды или нестабильность уставки температуры. Каждая из этих моделей не просто описывает отдельный физический процесс, но в совокупности они формируют структуру, на базе которой проектируется контур управления.

Модель теплообменника, обладающая медленной, но устойчивой динамикой, отражает основной объект управления, на который воздействует каскадная система. Параллельно с этим модель клапана, являющегося исполнительным механизмом, обеспечивает быструю и точную реализацию управляющих воздействий. Интеграция этих моделей в единую архитектуру управления позволяет корректно реализовать концепцию каскадного регулирования, где внутренний контур стабилизирует быстрое возмущение (подачу пара), а внешний, обеспечивает точное слежение за температурой нагреваемой воды. Именно математическое описание этих процессов становится отправной точкой для подбора параметров ПИД-регуляторов, а также для моделирования переходных процессов и устойчивости всей системы. Процесс настройки включает определение коэффициентов пропорционального, интегрального и дифференциального действия на основе желаемых характеристик: минимизация перерегулирования, сокращение времени установления и устойчивость к внешним воздействиям.

На рисунке 4.2 представлены результаты численного моделирования спроектированной каскадной системы управления. Модель была реализована в среде MATLAB/Simulink и включала оба ранее идентифицированных объекта — теплообменник и клапан управления потоком пара. В процессе моделирования были зафиксированы отклики системы на стандартные входные воздействия ступенчатое изменение уставки температуры и внешние возмущения, моделирующие колебания давления пара. На графиках отчётливо выделены переходные процессы: система демонстрирует быстрый и устойчивый отклик, при этом температура воды выходит на заданное значение без значительных колебаний и с минимальным перерегулированием. Отдельно зафиксирована характеристика управляемого объекта без включения регулятора, что позволяет наглядно оценить эффект применения каскадной архитектуры управления.

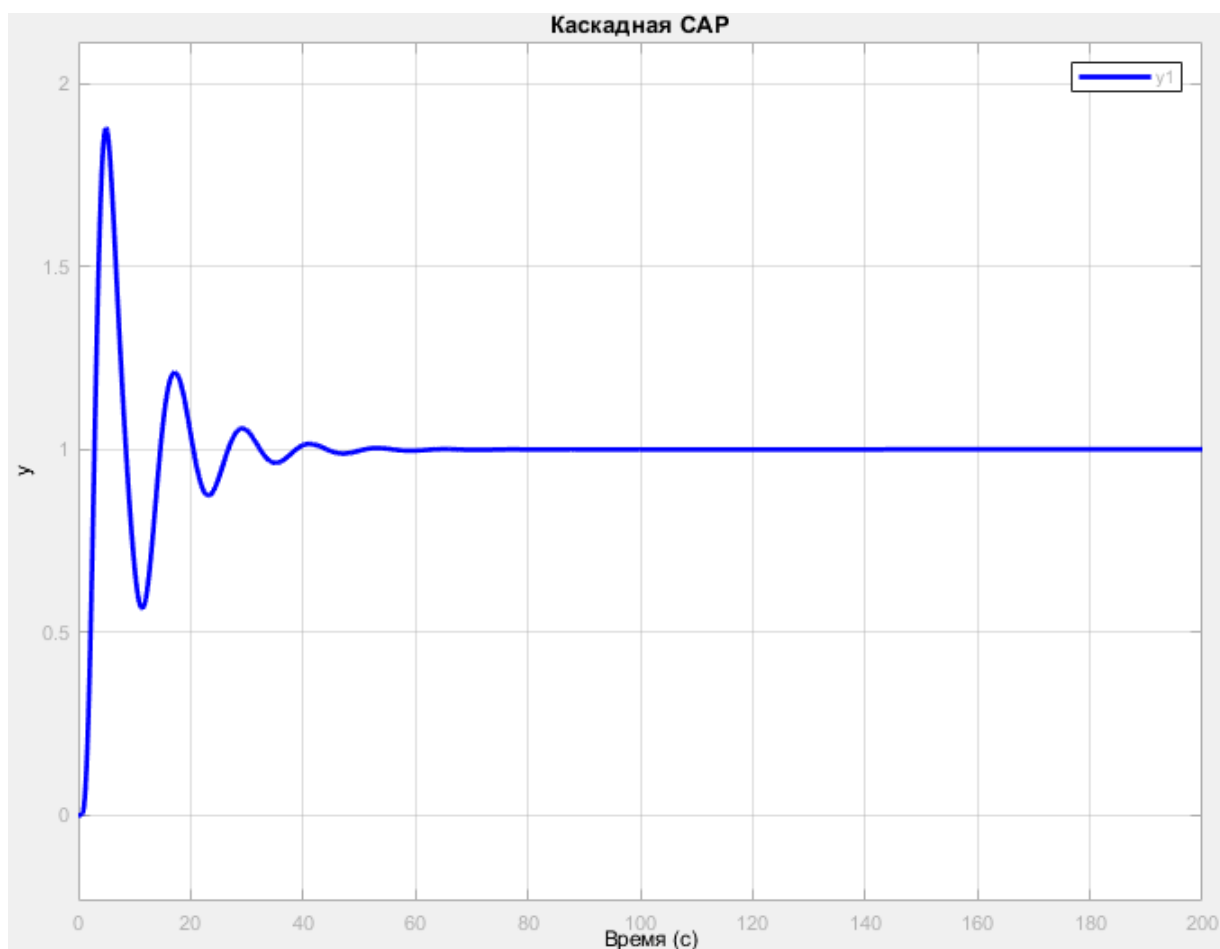


Рисунок 4.2 – Результат моделирования каскадной САР

Значимость этого исследования заключается в его способности связать теоретическое моделирование с практическим применением, предоставляя масштабируемое и эффективное решение для управления работой котельной.

Ниже в таблице 4.1 приведены оценки качеств САР водонагревательного котла.

Таблица 4.1 – Результаты оценок качеств исходной САР

№	Параметр	Значение
1	Перерегулирование, %	76.3
2	Время регулирования, сек	50.7
3	Время достижения первого максимума, сек	5.81
4	Время нарастания, сек	1.99
5	Установившаяся ошибка	0

В таблице представлены ключевые показатели производительности, которые оценивают динамическое поведение исходной системы управления.

Результаты моделирования каскадной системы управления, представленные на рисунке 4.2, демонстрируют значительное улучшение производительности по сравнению с исходной одноконтурной системой, характеристики которой приведены в таблице 4.1. Исходная система, как указано в отрывке, характеризуется высоким перерегулированием (76,3%) и длительным временем установления (50,7 секунд), что свидетельствует о нестабильности и недостаточной отзывчивости при реагировании на возмущения. Пиковое время (5,81 секунды) и время нарастания (1,99 секунды) дополнительно подчеркивают ограничения одноконтурного подхода, несмотря на достижение нулевой ошибки в установившемся режиме. Введение каскадной системы управления, основанное на разделении задач между внутренним и внешним контурами, позволяет существенно снизить перерегулирование и сократить время установления, что подтверждается результатами моделирования. Внутренний контур, управляющий положением парового клапана, быстро компенсирует изменения давления пара, предотвращая их влияние на температуру воды, в то время как внешний контур обеспечивает точное слежение за заданной температурой.

4.1 Синтез системы управления в пространстве состояний

Синтез каскадной системы управления для автоматизированной водогрейной котельной в пространстве состояний представляет собой сложный процесс, требующий структурированного подхода к настройке регуляторов для обеспечения стабильности, высокой производительности и точного регулирования параметров системы. В контексте данной работы каскадная система управления включает два вложенных контура: внутренний, отвечающий за быстродействующую динамику, связанную с управлением расходом пара через регулирующий клапан, и внешний, ориентированный на поддержание медленных процессов, таких как температура воды на выходе котла. Этот подход позволяет эффективно разделять задачи управления, минимизируя влияние быстрых возмущений, таких как колебания давления пара, на общую стабильность системы, одновременно обеспечивая точное слежение за заданными параметрами температуры. Процесс синтеза начинается с изоляции и настройки внутреннего контура, который должен быть оптимизирован для быстрого подавления возмущений, после чего выполняется настройка внешнего контура, учитывающего динамику уже стабилизированного внутреннего контура. Такой последовательный подход, описанный в предоставленном отрывке, гарантирует, что система в целом достигает оптимального баланса между оперативностью и устойчивостью.

Для реализации этого процесса используются математические модели теплообменника и парового клапана, преобразованные из формы передаточных функций в пространство состояний, что обеспечивает более полное описание динамики системы и упрощает применение современных методов управления, таких как размещение полюсов и оптимальное управление.

Каскадная система управления, включает два уровня регулирования: внутренний контур, который управляет быстродействующей динамикой, связанной с положением парового клапана, и внешний контур, ответственный за поддержание температуры воды на заданном уровне. Внутренний контур, работающий в более быстром временном масштабе, предназначен для оперативного подавления возмущений, таких как внезапные изменения давления пара, которые могут существенно повлиять на теплопередачу в теплообменнике. Внешний контур, напротив, фокусируется на более медленных процессах, обеспечивая стабильное тепловое равновесие и компенсируя долгосрочные изменения, такие как колебания спроса на горячую воду. Процесс настройки начинается с изоляции внутреннего контура, чтобы гарантировать его стабильность и оптимальную производительность перед подключением внешнего контура. Для внутреннего контура, как указано в отрывке, применяется ПИД-регулятор, параметры которого настраиваются для минимизации времени нарастания и перерегулирования. Это особенно важно, поскольку внутренний контур непосредственно влияет на способность системы быстро реагировать на возмущения, такие как изменения давления пара, обеспечивая стабильные входные данные для внешнего контура. После стабилизации внутреннего контура настраивается внешний контур, который также использует ПИД-регулятор, но с учетом более медленной динамики теплообменника. Настройка внешнего контура направлена на достижение устойчивого отклика с минимальной ошибкой в установившемся режиме, что позволяет системе поддерживать температуру воды в соответствии с заданными условиями эксплуатации. Такой последовательный подход к настройке, описанный в отрывке, обеспечивает согласованную работу обоих контуров, минимизируя взаимодействие между ними и повышая общую эффективность системы.

Преобразование математической модели системы из формы передаточной функции в пространство состояний, как подчеркивается в отрывке, является ключевым этапом синтеза каскадной системы управления. Передаточные функции, хотя и полезны для анализа в частотной области, имеют ограничения при проектировании сложных систем с несколькими входами и выходами (ММО), а также при учете нелинейностей или сложной динамики. Представление в пространстве состояний, основанное на дифференциальных уравнениях первого порядка, позволяет более полно описывать внутренние состояния системы, такие как температура воды в теплообменнике или положение парового клапана, и их эволюцию во времени.

Прежде чем приступить к настройке регулятора, необходимо преобразовать модель системы из представления передаточной функции в форму пространства состояний. В то время как передаточные функции являются полезным инструментом анализа систем в частотной области, представления в виде пространства состояний предлагают более полную структуру, особенно при анализе и проектировании контроллеров для современных динамических систем. Подход с использованием пространства состояний моделирует систему с помощью дифференциальных уравнений первого порядка, фиксируя внутренние переменные состояния и их эволюцию во времени. Эти переменные состояния обеспечивают прямое описание динамики системы, позволяя детально представить системы с несколькими входами и несколькими выходами (ММО) и облегчая применение передовых методов управления.

Формула пространства состояний состоит из набора уравнений состояния и уравнения выхода, выраженных в матричной форме как

$$\begin{cases} x'(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = C^T + Du(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

где $x(t)$ – вектор переменных состояния;

$y(t)$ – выход системы;

$u(t)$ – входной сигнал;

A – матрица состояний;

B – матрица управления;

C – матрица выхода (наблюдаемости);

D – матрица прямой связи.

Здесь $x(t)$ – вектор состояния, $u(t)$ – вход, $y(t)$ – выход, а A , B , C и D – системные матрицы, характеризующие динамику системы, связь между входом и состоянием и выход. Такое представление позволяет лучше понять управляемость и наблюдаемость системы – ключевые понятия для разработки контроллеров, отвечающих техническим требованиям.

Переход к форме пространства состояний дает несколько преимуществ при синтезе контроллеров. Он упрощает интеграцию современных методов управления, таких как размещение полюсов и оптимальное управление, которые не так просты в области передаточной функции. Кроме того, модели пространства состояний особенно эффективны для анализа во временной области, что делает их идеальными для систем со сложной динамикой, возмущениями или нелинейностью. В контексте исследуемого процесса нагрева моделирование пространства состояний послужит основой для дальнейшего проектирования контроллеров, обеспечивая структурированный подход для достижения оптимальной производительности, стабильности и устойчивости.

Чтобы преобразовать заданную передаточную функцию в ее представление в пространстве состояний, мы опираемся на фундаментальные концепции теории управления и современной динамики систем. Процесс начинается с разложения передаточной функции, продолжается выводом дифференциальных уравнений и завершается выражением системы в матричной форме.

Используя изначально полученную модель в виде передаточной функции (3.2), которая представляет собой линейную систему второго порядка, где знаменатель описывает динамику системы, а числитель зависимость для выхода системы.

Чтобы систематически вывести модель пространства состояний, знаменатель и числитель рассматриваются отдельно, что соответствует концепции, согласно которой представление пространства состояний отражает как внутреннюю динамику системы (уравнения состояния), так и поведение на выходе (уравнение выхода).

Для этого представим модель в виде двух звеньев

$$G_1(s) = \frac{1}{s^2 + 0.06787s + 0.006284}, \quad (4.2)$$

$$G_2(s) = 0.2101s + 0.01235 \quad (4.3)$$

На рисунке 4.3 представлена преобразованная структурная схема передаточной функции.

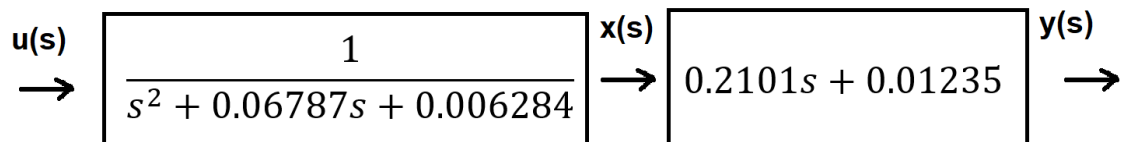


Рисунок 4.3 – Преобразованная структурная схема передаточной функции

Тогда можем записать соотношение в виде

$$\frac{1}{s^2 + 0.06787s + 0.006284} = \frac{x(s)}{u(s)} \quad (4.4)$$

При умножении на знаменатель зависимость становится равной

$$(s^2 + 0.06787s + 0.006284)x(s) = u(s) \quad (4.5)$$

где $x(s)$ – промежуточная переменная состояния;
 $u(s)$ – входной сигнал.

Во временной области это уравнение преобразуется в дифференциальное уравнение второго порядка

$$x'' + 0.06787x' + 0.006284x = u(s) \quad (4.6)$$

Введем переменные состояния, чтобы разбить это уравнение второго порядка на набор уравнений первого порядка, которые требуются для формы пространства состояний. Определив состояния как

$$\begin{cases} x_1(t) = x(t) \\ x_2(t) = x'_1(t) \end{cases} \quad (4.7)$$

Можно выразить производные от состояний следующим образом

$$\begin{cases} x'_1(t) = x_2 \\ x'_2(t) = -0.006284x_1(t) - 0.06787x_2 + u(t) \end{cases} \quad (4.8)$$

Эти уравнения описывают, как состояния системы изменяются во времени в зависимости от входного сигнала $u(t)$ и динамики системы.

Чтобы выразить это в матричной форме, мы объединим уравнения состояния в компактную векторную нотацию

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.006284 & -0.06787 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \quad (4.9)$$

Здесь матрица, умножающая вектор состояния, отражает внутреннюю динамику (А-матрица), а вектор-столбец, умноженный на $u(t)$, представляет входное воздействие (В-матрица).

Далее рассмотрим числитель передаточной функции, которая связывает выход системы с ее состояниями. Переписав ее, имеем

$$\frac{y(t)}{x(t)} = 0.2101s + 0.01235 \quad (4.10)$$

Или эквивалентно во временной области

$$y(t) = 0.2101x'(t) + 0.01235x(t) \quad (4.11)$$

Используя переменные состояния x_1 и x_2 , где $x_2 = x'_1$, уравнение выхода становится

$$y(t) = 0.2101x_2 + 0.01235x_1 \quad (4.12)$$

В матричном виде это также можно записать в виде

$$y(t) = [0.012350.2101] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Здесь вектор строки, умноженный на вектор состояния, представляет собой выходную зависимость (С-матрица), и нет прямой передачи от входа $u(t)$, что означает, что D-матрица равна нулю.

Комбинируя уравнения состояния и уравнение выхода, получаем полное представление пространства состояний

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.006284 & -0.06787 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) = [0.01235 \quad 0.2101] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4.14)$$

Модель в пространстве состояний обеспечивает современное и универсальное представление исходной передаточной функции. Явно моделируя внутренние состояния системы, становится проще применять передовые методы управления, такие как обратная связь по состоянию, оптимальное управление и разработка наблюдателей. В отличие от формы передаточной функции, представление в виде пространства состояний хорошо подходит для систем с несколькими входами и несколькими выходами (МІМО) и позволяет проводить простой анализ во временной области.

В данном исследовании полученная модель пространства состояний послужит основой для проектирования и настройки регуляторов для системы отопления котла. Она обеспечивает точное моделирование динамики, облегчая синтез надежных и стабильных стратегий управления.

Переход от передаточных функций к моделям пространства состояний соответствует современным методам, используемым в исследованиях и практике управления современными объектами.

Для проверки эквивалентности передаточной функции и пространственного представления состояния мы проводим симуляцию реакции обеих моделей на идентичный входной сигнал.

Этот процесс гарантирует, что динамическое поведение, отраженное в передаточной функции, точно представлено в модели пространства состояний. Такая конвертация позволяет перейти от одного вида описания системы к другому, более удобному для анализа, синтеза регуляторов и моделирования в интегрированных средах. Используя стандартные инструменты моделирования систем, такие как MATLAB или Simulink, мы подаем заранее заданный входной сигнал, например, единичный сигнал, и анализируем результирующий выходной сигнал из обеих формул.

Совпадение или минимальное расхождение выходных сигналов подтверждает эквивалентность двух форм представления модели и корректность преобразования.

```

Command Window

>> G_tf = tf(num, den)

G_tf =

      0.2101 s + 0.01235
      -----
      s^2 + 0.06787 s + 0.006284

Continuous-time transfer function.

>> G_ss = ss(A,B,C,D)

G_ss =

      A =

           x1      x2
      x1      0      1
      x2 -0.006284 -0.06787

      B =

           u1
      x1      0
      x2      1

      C =

           x1      x2
      y1 0.01235 0.2101

      D =

           u1
      y1      0

Continuous-time state-space model.

```

Рисунок 4.4 – Командное окно MATLAB с разными формами объекта

Для проверки эквивалентности модели пространства состояний и исходной передаточной функции, проводится моделирование в MATLAB/Simulink, где на обе модели подается одинаковый входной сигнал, например, единичный ступенчатый сигнал. Результаты этого моделирования, представленные на рисунке 4.5, демонстрируют идентичное поведение обеих моделей, что подтверждает корректность преобразования. График переходного процесса, показанный на рисунке 4.5, иллюстрирует, что отклик системы в пространстве состояний совпадает с откликом, предсказанным передаточной функцией, что подчеркивает точность математического описания и его пригодность для дальнейшего синтеза регуляторов.

Этот этап проверки является критически важным, поскольку любая ошибка в преобразовании модели могла бы привести к некорректной настройке регуляторов, что отрицательно сказалось бы на производительности каскадной системы управления. Использование MATLAB/Simulink, обеспечивает удобный интерфейс для проведения таких симуляций, позволяя визуализировать переходные процессы и анализировать ключевые характеристики, такие как время нарастания, перерегулирование и время установления.

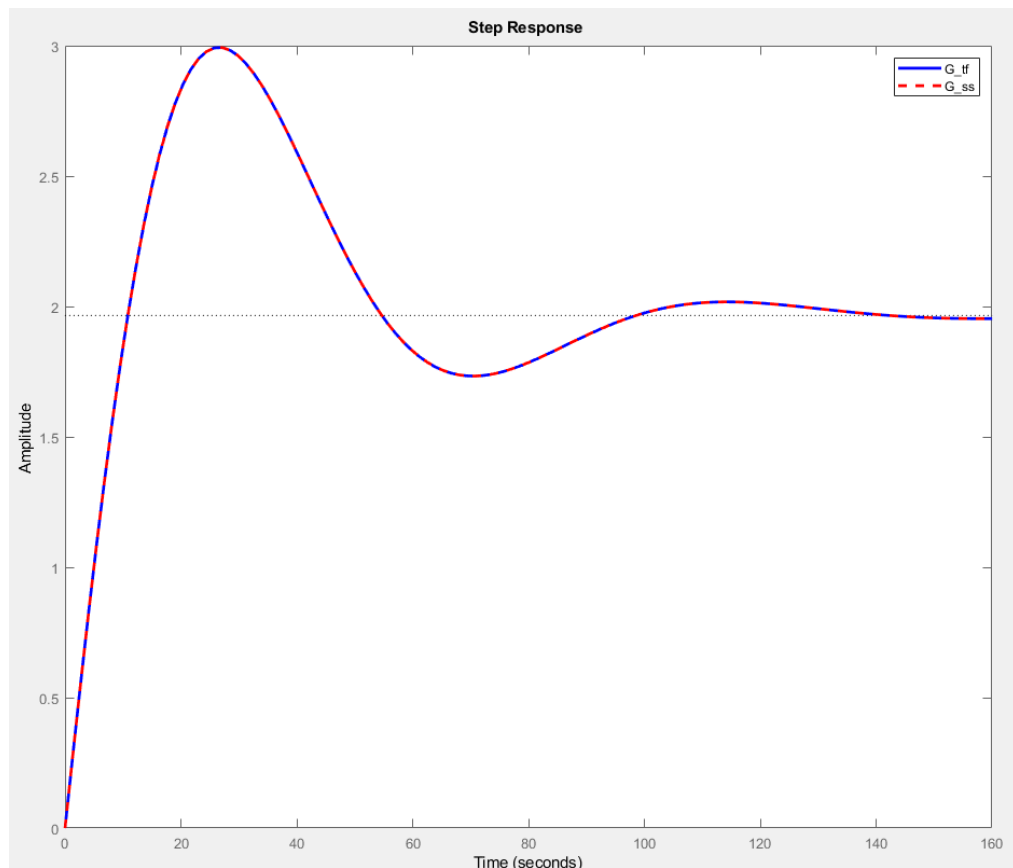


Рисунок 4.5 – График переходного процесса

Из графика переходной характеристики на рисунке 4.5 видно, что обе системы ведут себя одинаково. Это подтверждает математическую и динамическую эквивалентность передаточной функции и модели пространства состояний. Конгруэнтность этих моделей подчеркивает точность процесса преобразования пространства состояний и подтверждает его пригодность для дальнейшего проектирования и анализа систем управления.

Этот шаг имеет важное значение для обеспечения того, чтобы полученная модель пространства состояний сохраняла основные характеристики исходной системы, что позволяет точно настраивать контроллер и обеспечивать надежную работу системы.

Корректность такого преобразования гарантирует, что все динамические свойства, присущие исходной передаточной функции, будут адекватно отражены в новой форме, включая её устойчивость, быстродействие и реакцию на возмущения. Это особенно критично для дальнейшего проектирования робастных регуляторов, основанных на методах теории автоматического управления, которые требуют представления системы именно в виде пространства состояний.

4.2 Синтез модального регулятора

Для синтеза системы управления методом размещения полюсов определяется желаемая динамика системы путем задания требуемой степени устойчивости, $\mu = 2$. Исходя из этой степени устойчивости, рассчитываются корни характеристического полинома замкнутой системы $s_1 = -\frac{1}{6}$ и $s_2 = -\frac{1}{2}$, которые представляют собой желаемые места расположения полюсов замкнутой системы.

Процесс начинается с формирования матрицы управляемости H_1 , которая обеспечивает управляемость системы и возможность успешного размещения полюсов. Для данной системы матрица управляемости строится по матрице состояния A и входной матрице B следующим образом

$$H_1 = [A * B; B] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.0063 & -0.0679 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.0679 & 1 \end{bmatrix}$$

Далее выводятся характеристические полиномы для систем с разомкнутым и замкнутым контуром. Характеристический полином системы с разомкнутым контуром получается путем вычисления определителя, в результате чего

$$\det(sI - A) = \det \left(s \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.0063 & -0.0679 \end{bmatrix} \right),$$

$$\det(sI - A) = \det \left(\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ s + 0.0063 & 0.0679 \end{bmatrix} \right) = s^2 + 0.0679s + 0.0063$$

Для замкнутой системы характеристический полином определяется исходя из желаемого расположения полюсов $s_1 = -\frac{1}{6}$ $s_2 = -\frac{1}{2}$. Это дает

$$\det(sI - D) = \left(s + \frac{1}{6} \right) \left(s + \frac{1}{2} \right) = s^2 + 0.6667 s + 0.08333$$

Чтобы привести динамику системы в соответствие с желаемым поведением, формируется вспомогательный вектор d путем вычитания коэффициентов полинома разомкнутого контура из коэффициентов полинома замкнутого контура

$$d = c - a = \begin{bmatrix} c_2 \\ c_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_2 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.08333 \\ 0.6667 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.0063 \\ 0.0679 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0770 \\ 0.5988 \end{bmatrix}$$

Затем вычисляется матрица коэффициента усиления K . Для этого необходимо сформировать H_2 и определить ее обратную величину для решения K . Полученный вектор усиления имеет вид

$$K = Q^{-1} * d = \begin{bmatrix} 0.0770 \\ 0.5988 \end{bmatrix}$$

Разработанный закон управления выражается следующим образом

$$u(t) = - \begin{bmatrix} 0.0770 \\ 0.5988 \end{bmatrix}^T * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0.0770x_1(t) - 0.5988x_2(t) \quad (4.15)$$

Наконец, для подтверждения правильности расположения полюсов и вычислений, проверим с помощью функции MATLAB `acker`. Результаты, показанные на рисунке 4.6, который подтверждает точность вычисленных параметров управления и устойчивость синтезированной системы.

```
Command Window
>> P = [-1/6, -1/2]

P =

    -0.1667    -0.5000

>> K = acker(A, B, P)

K =

    0.0770    0.5988
```

Рисунок 4.6 – Проверка результатов с помощью функции `acker`

Этот метод демонстрирует эффективное использование размещения полюсов для достижения точной динамики управления и подчеркивает практическое применение моделирования пространства состояний и методов линейной алгебры в современном проектировании систем управления.

На рисунке 4.7 представлено графическое сравнение переходного отклика системы с применением регулятора и без него. График наглядно демонстрирует значительное улучшение характеристик системы при применении регулятора.

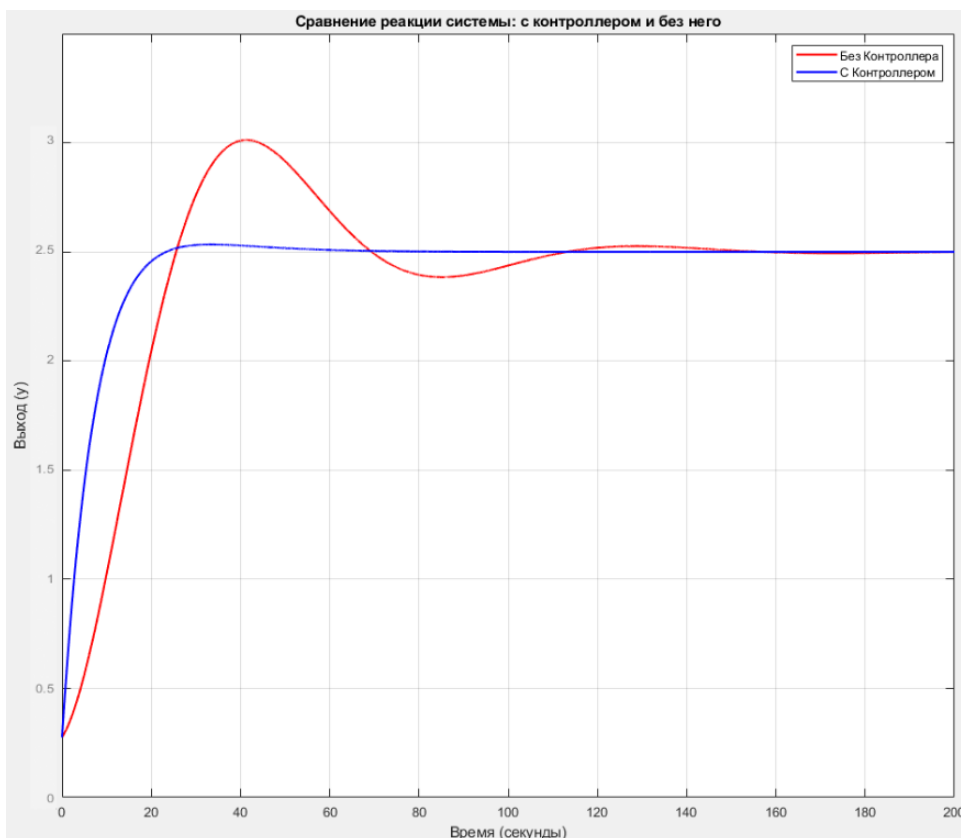


Рисунок 4.7 – Сравнение объекта «без» и «с» регулятором

Красная кривая представляет реакцию системы без контроллера. Она демонстрирует большое перерегулирование, за которым следует колебательное поведение и длительное время регулирования. Системе требуется значительное время для стабилизации, и она демонстрирует плохие характеристики демпфирования, о чем свидетельствуют постоянные колебания.

С другой стороны, синяя кривая иллюстрирует реакцию системы с установленным контроллером. Здесь система демонстрирует гораздо более стабильный отклик.

Перегрузка резко уменьшилась, а переходное поведение быстро стабилизируется без колебаний, что свидетельствует об эффективности системы управления в достижении желаемой стабильности и динамических характеристик.

Полученная модель системы была реализована в рамках каскадной системы управления для оценки ее эффективности. Каскадная система управления повышает стабильность и динамический отклик всего процесса за счет использования внутреннего контура управления для устранения возмущений до того, как они распространятся на внешний контур.

На рисунке 4.8 представлена схема моделирования, используемая для анализа поведения системы при данной конфигурации. Эта схема обеспечивает структурированный подход к проверке улучшенной переходной характеристики, оценке стабильности системы и сравнению результатов с исходной системой управления.

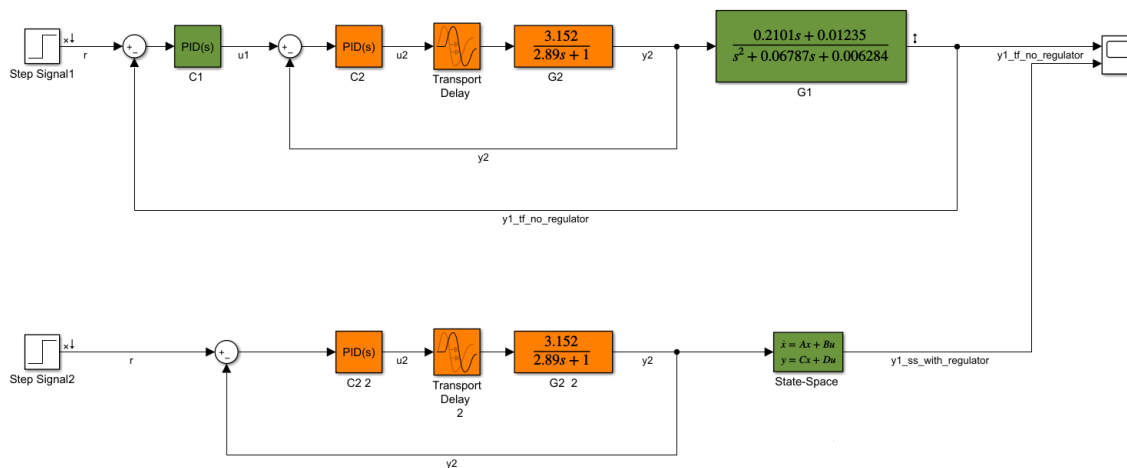


Рисунок 4.8 – Схема моделирования каскадной системы без регулятора и с регулятором

На рисунке 4.9 приведен график результатов моделирования.

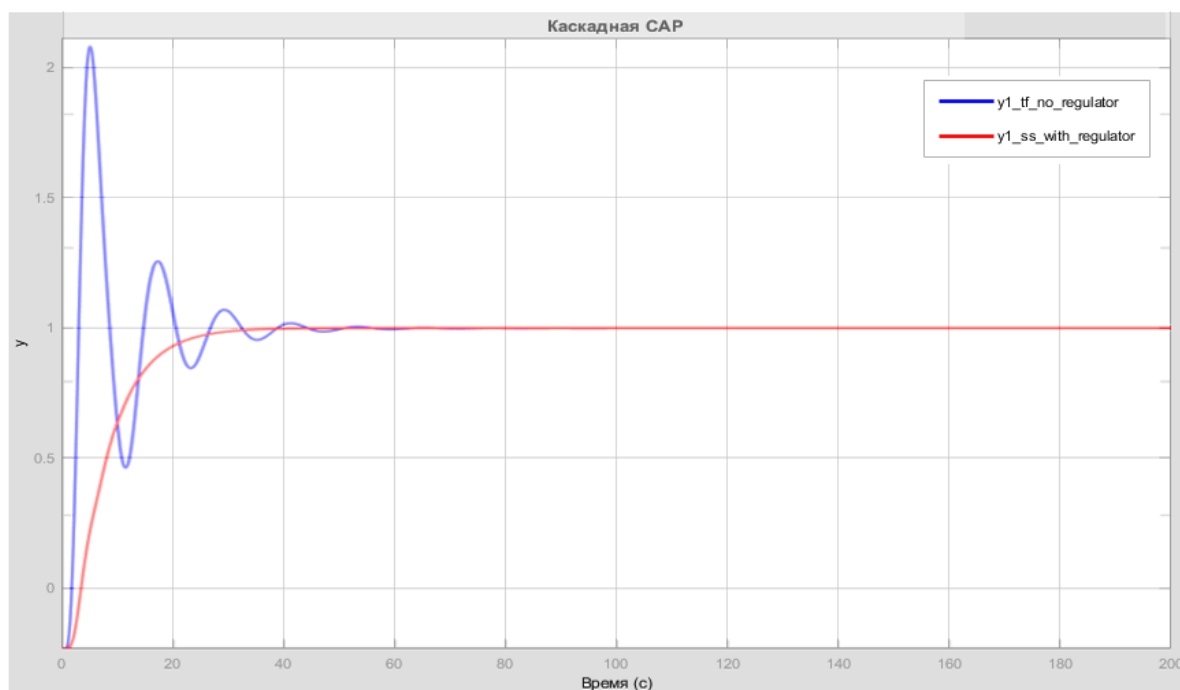


Рисунок 4.9 – Сравнение каскадной САР с использованием регулятора

На графике видно, что система без регулятора демонстрирует значительные колебания, перегрузки и медленный выход на установившийся режим. Напротив, система с регулятором демонстрирует гораздо более стабильный и хорошо плавный отклик, со значительно меньшим перерегулированием и более быстрым временем установления.

В таблице 4.2 приведена оценка характеристик обеих конфигураций, количественно определяющая улучшения, вносимые регулятором. Ключевые показатели, такие как перерегулирование, время установления и стабильность, подтверждают эффективность метода размещения полюсов в повышении качества системы.

Таблица 4.2 – Результаты оценок качеств каскадной САР с регулятором

№	Параметр	Без Регулятора	С Регулятором
1	Перерегулирование, %	76.3	1-2%
2	Время регулирования, сек	50.7	46.9
3	Время достижения первого максимума, сек	5.81	42.5
4	Время нарастания, сек	1.99	18.9
5	Установившаяся ошибка	0	0

В заключение следует отметить, что разработка и внедрение каскадной системы управления значительно повышает стабильность и точность системы управления. Наиболее заметным улучшением является существенное снижение перерегулирования – с 76,3% без регулятора до минимальных 1-2% с регулятором. Это снижение имеет решающее значение для обеспечения стабильности системы и предотвращения возможных колебаний из-за чрезмерного отклонения от заданного значения. Способность регулятора поддерживать нулевую ошибку в установившемся режиме еще раз подчеркивает его эффективность в достижении желаемых характеристик без длительных расхождений, способствуя повышению общей точности системы.

Кроме того, регулятор улучшает время регулирования, немного уменьшая его с 50,7 секунды до 46,9 секунды, что свидетельствует о более эффективном сближении с желаемой уставкой. Хотя регулятор вносит небольшую задержку в начальный отклик системы, этот компромисс является приемлемым, учитывая значительные преимущества в стабильности и точности. Эти результаты показывают, что разработка регулятора приводит к созданию более управляемой и надежной системы, что особенно ценно для приложений, требующих высокой стабильности и минимальной погрешности.

5 Разработка системы управления MD PID с системой Honeywell PKS

Модельно-ориентированное PID-регулирование (Model-Driven PID, MD PID) представляет собой подход к проектированию и настройке регуляторов, при котором параметры ПИД-регулятора вычисляются на основе математической модели объекта управления, а не эмпирически. В классической схеме ПИД-регулирования MD PID же предполагает, что для заданного процесса строится его динамическая модель (передаточная функция или модель состояния), после чего на основе этой модели и заданных критериев качества формулируется задача оптимизации, решение которой даёт оптимальные коэффициенты регулятора.

Такой метод позволяет учесть динамические характеристики системы заранее и, как правило, приводит к более быстрому и точному установлению нужных параметров регулятора. Формально, имея модель объекта и задав, например, критерий оптимальности (минимизация интегральной ошибки регулирования), можно аналитически или численно вычислить величины коэффициентов ПИД, обеспечивающие требуемую качественную характеристику траектории переходного процесса.

Важными свойствами MD PID является его способность автоматически учитывать динамику системы при настройке регулятора. Так, MD PID позволяет «адаптировать» контроллер к изменениям характеристик процесса: поскольку параметры регулятора вычисляются исходя из модели, учитывающей условия работы объекта, при изменении динамики (например, изменении коэффициента передачи или времени запаздывания) можно оперативно пересчитать новые параметры без длительных опытов «на реальном оборудовании».

Это означает, что MD PID повышает устойчивость и точность управления по сравнению с классическими регуляторами. Действительно, по результатам исследований Панченко и Ширяевой, применение MD PID в системе управления водогрейным котлом показало существенное улучшение производительности регулирования и стабильности по сравнению с традиционными ПИД-регуляторами.

Кроме того, при использовании модели облегчается автоматизированная отладка: система может проводить моделирование ступенчатых возмущений и автоматически оценивать переходные характеристики, что ускоряет настройку параметров регулятора.

5.1 Интеграция модели объекта в среду Honeywell PKS

Система управления Experion PKS (Process Knowledge System) компании Honeywell является современным распределённым контроллером (DCS), предназначенным для автоматизации сложных технологических процессов. Для реализации MD PID важно обеспечить обмен данными между цифровой моделью объекта и реальной системой управления, рисунок 5.1. В описанном исследовании связь между моделью котла (в среде MATLAB/Simulink) и системой Honeywell Experion PKS была организована через стандарт промышленной автоматики OPC (Open Platform Communications).

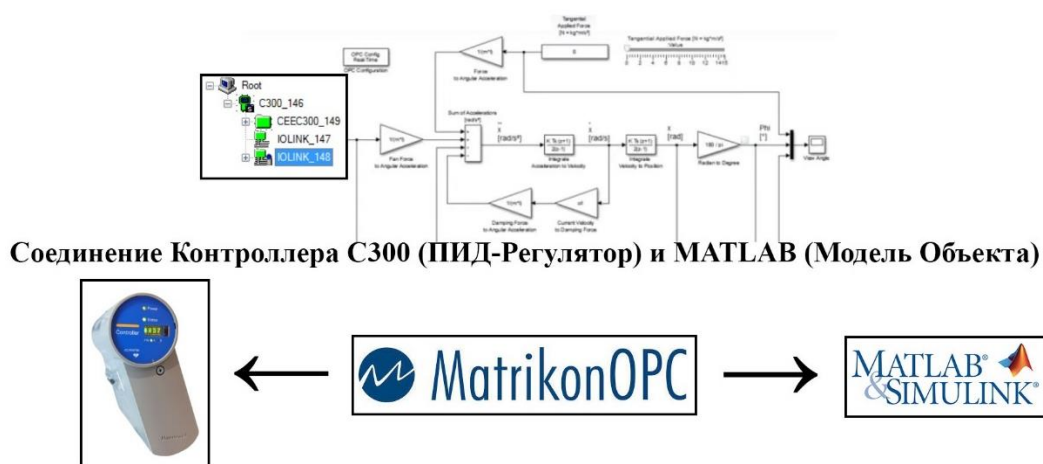


Рисунок 5.1 – Система модельно-ориентированного подхода

В качестве посредника использовался Matrikon OPC Server, который выступал связующим звеном между MATLAB и системой Experion PKS.

С помощью MATLAB OPC Data Explorer Toolbox устанавливается соединение с Matrikon OPC Server, а тот, в свою очередь, «видит» теги и переменные, сконфигурированные в системе Experion PKS. На стороне контроллера Honeywell были созданы специальные переменные (теги) для записи и чтения значений ключевых параметров процесса – например, сигналов от датчиков температуры и давления, а также команд на исполнительные устройства (например, положение регулирующих клапанов).

Каждая такая переменная настраивается в PKS с указанием типа данных, частоты обновления и прав доступа (чтение/запись), что обеспечивает надёжную передачу данных между системой и внешним ПО.

На рисунке 5.2, приведена конфигурация OPC со стороны MATLAB OPC Data Explorer Toolbox. Данная настройка обеспечивает прямую связь между средой MATLAB и промышленными системами управления, позволяя осуществлять чтение и запись данных в реальном времени с использованием протокола OPC.

Этот интерфейс служит мостом между высокоуровневой средой математического моделирования MATLAB и системами автоматизации нижнего уровня, обеспечивая непосредственный доступ к данным технологического процесса в реальном времени. В данном окне происходит настройка параметров соединения, включая выбор OPC-сервера, просмотр и выбор доступных тегов (переменных процесса), а также конфигурирование параметров обмена данными, таких как частота обновления. Эта настройка является критически важной для сбора актуальных экспериментальных данных, которые в дальнейшем используются для параметрической идентификации математических моделей объекта управления.

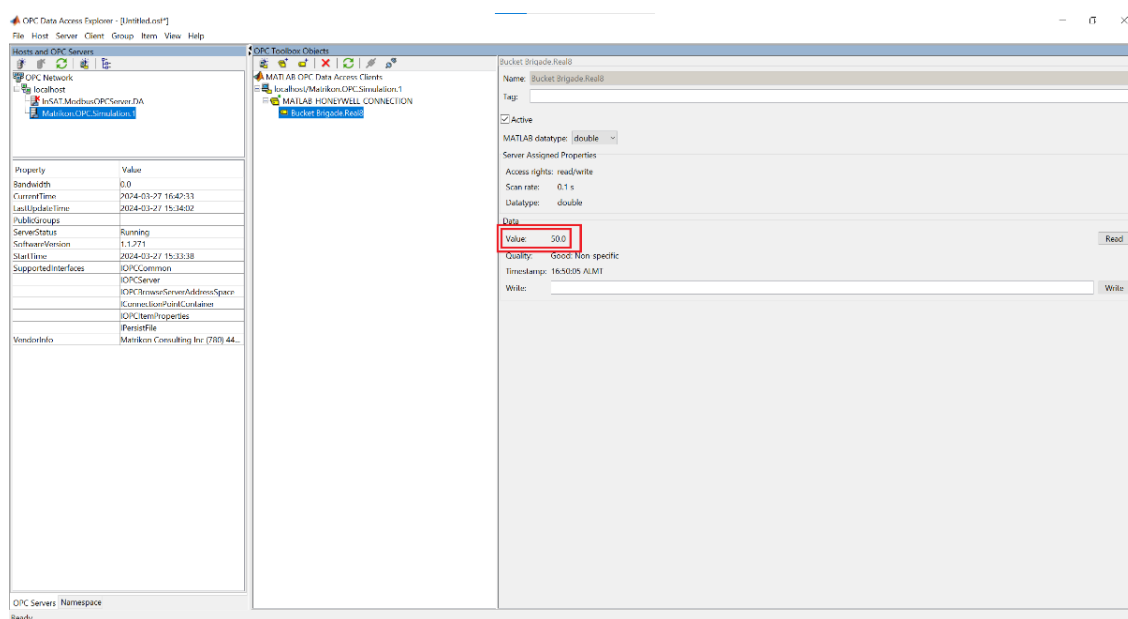


Рисунок 5.2 – Конфигурация подключения MATLAB OPC Data Explorer Toolbox

После установки соединения между MATLAB и OPC-сервером Honeywell PKS посредством Matrikon, позволяет не только считывать реальные данные процесса в MATLAB для анализа и построения моделей, но и в обратном направлении передавать рассчитанные команды управления в контроллер. Это обеспечивает двунаправленную связь: так, параметры модели и результаты идентификации из MATLAB могут влиять на поведение регуляторов в Exregion PKS в режиме реального времени. Данная интеграция («цифровой двойник» котла, связанный с реальной системой через OPC) позволяет проводить расширенный анализ – например, прогонять на модели различные сценарии нагрузки и автоматически подстраивать алгоритм управления без вмешательства в реальную технологию.

Для эффективного взаимодействия с переменными, размещенными на OPC-сервере, из среды MATLAB используются специализированные функции, обеспечивающие двунаправленный обмен данными – как чтение, так и запись.

Иллюстрация основных операций взаимодействия с переменными OPC приведена на примере кода, демонстрирующего типичный рабочий процесс.

Начальным этапом работы с OPC является создание объекта OPC в MATLAB, который служит посредником для установления связи с OPC-сервером. В данном примере формируется объект `opcObj`, который инициализирует подключение к OPC-серверу Matrikon OPC Simulation. Выбор симуляционной библиотеки Matrikon OPC Simulation обусловлен её удобством для целей тестирования, отладки и разработки алгоритмов без необходимости подключения к реальному оборудованию, что позволяет имитировать различные сценарии работы.

После успешного создания объекта `opcObj` следующим шагом является установление активного соединения с OPC-сервером. Для этого применяется функция `connect`, которая иницирует сеанс связи и открывает каналы для обмена данными. Факт успешного подключения к серверу верифицируется системой, после чего становится возможным приступить к операциям чтения и записи данных.

Предположим, на OPC-сервере существует переменная с именем `Random.Real8`, значение которой требуется получить. Для считывания текущего значения этой переменной используется функция `read`. В данном случае, полученное значение будет записано в переменную `data` в рабочей области MATLAB. Важно подчеркнуть, что данные, передаваемые по протоколу OPC, могут обновляться в реальном времени, что позволяет пользователю отслеживать динамические изменения в технологическом процессе и принимать оперативные решения на основе актуальной информации, данные операции приведены на рисунке 5.3.

```
% Создание объекта OPC
opcObj = opcda('Matrikon.OPC.Simulation');
% Соединение с OPC-сервером
connect(opcObj);
% Отправка команды управления OPC-серверу
write(opcObj, 2, 5); % Установка нового значения для
тега с идентификатором 2

% Создание объекта OPC
opcObj = opcda('Matrikon.OPC.Simulation');
% Соединение с OPC-сервером
connect(opcObj);
% Чтение данных из OPC-сервера
data = read(opcObj, 'Random.Real8');
```

Рисунок 5.3 – Листинг работы с данными OPC

В итоге архитектура системы получается такой: Honeywell PKS обеспечивает сбор и контроль полевых сигналов (температура, давление, уровни), а MATLAB/Simulink с помощью OPC выступает как «виртуальный процессор», поддерживающий модель динамики котла и служащий платформой для расчёта параметров MD PID. Такая схема даёт гибкость: оператор может наблюдать данные на стандартных панелях управления Experion, а инженеры по автоматизации – работать с моделью в MATLAB, получать прогнозы и загружать оптимальные настройки обратно в PKS.

На рисунке 5.4 приведена схема моделирования каскадного управления.

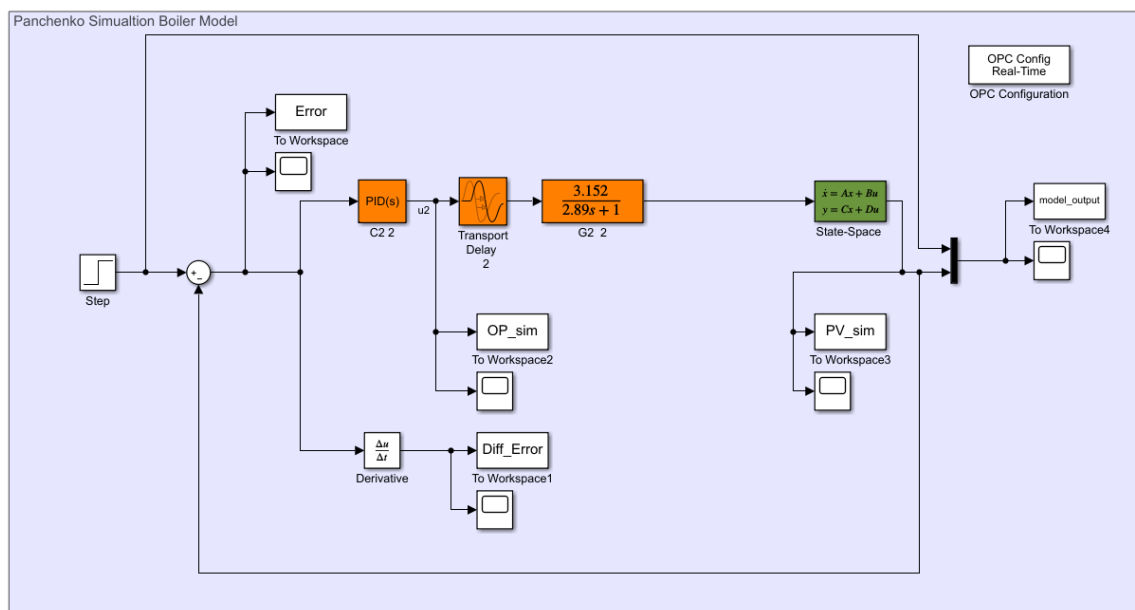


Рисунок 5.4 – Моделирование системы управления для работы по OPC

Среда Experion PKS предоставляет мощный инструментарий для конфигурирования и настройки регуляторов разного типа, включая одноконтурные PID-блоки и каскадные структуры. Во-первых, в Experion имеются стандартные функциональные блоки (PIDA, PIDR, PID), реализующие классическую ПИД-логику с возможностью ручной или автоматической подстройки коэффициентов. Конфигурирование ПИД-регулятора осуществляется через графический интерфейс Project Builder: указываются управляющая переменная, регулируемый параметр и начальные оценки коэффициентов. Ключевым моментом является интеграция с моделью объекта: например, после идентификации модели котла в MATLAB полученные значения для можно ввести в соответствующие поля блока PID в Experion.

Для каскадной структуры управления в Experion используются два регулятора, один (вторичный) жестко связан с исполнительным механизмом (например, с сервоприводом клапана), а другой (первичный) задаёт уставку второму регулятору.

Такая конфигурация (например, верхний контур задаёт требуемую температуру на выходе теплообменника, а нижний – управляет подачей пара/горючего) позволяет лучше выделять динамики и уменьшает влияние внешних возмущений. В Experion настройка каскадного контура включает в себя выбор внешнего и внутреннего регуляторов, а затем последовательную настройку: сначала, как правило, настраивается внутренний (быстродействующий) регулятор, а затем внешний. Документация Honeywell подтверждает, что в Experion предусмотрена специальная функция «Setup and tuning Cascade loops» для пошаговой настройки таких многоуровневых систем.

После конфигурации регуляторов на этапе выполнения системы оператор может мониторить их поведение через средства визуализации Experion. Время-значение реакции процессов отображаются на трендах (диаграммах), доступных в Runtime. ПИД-блоки имеют графические лицевые панели с индикаторами текущих ошибок, уставок и выходных сигналов, что облегчает отладку и контроль качества регулирования. Более того, поскольку регуляторы настроены с учетом цифровой модели объекта, наблюдается улучшенная точность следования заданию и меньшие перерегулирования по сравнению с настройками, полученными традиционным «перебором» параметров.

Таким образом, Experion PKS предоставляет полный цикл синтеза MD PID-регулирования: от внедрения математической модели объекта (через OPC-обмен с MATLAB) до автоматической подстройки коэффициентов и эксплуатации на реальном объекте. Комбинация вычислительных средств Matlab/Simulink и возможностей DCS позволяет выполнять идентификацию, оптимизацию и реальное управление в едином информационном контексте. Это дает инженеру возможность единожды провести моделирование и анализ, а затем «загрузить» результаты в систему управления, минимизируя ручную настройку и сокращая время, затрачиваемое на наладку контрольного контура.

На примере водогрейного котла MD PID-регулирование демонстрирует свои преимущества. В контексте котлоагрегата управление процессом сводится к поддержанию требуемого давления и температуры воды: температура воды напрямую влияет на образование пара и, соответственно, на давление в котле. В реальном объекте задачи управления нередко разделяются на несколько контуров: например, контур уровня воды, контур температуры и контур давления.

При анализе была использована следующая логика: подача пара на теплообменник и расход воды поддерживались постоянными, а затем генератор ШИМ (или аналогичный) создавал ступенчатое изменение управляющего воздействия – изменения подачи тепла. Запись изменения давления позволила идентифицировать модель замкнутого контура «теплообменник-котел». Именно по этой модели настраивался регулятор давления.

Практически это означает, что цифровая модель котла (включая баланс тепла и динамику парообразования) служит «движком» для расчёта коэффициентов PIDA: регулятор автоматически учитывает теплоемкость котла, инерцию парообразования и реактивную составляющую изменения давления.

В реальной системе автоматизации подобную архитектуру можно реализовать через каскадные ПИД-контроллеры в Honeywell PKS. К примеру, во внешнем контуре может стоять ПИД-регулятор по давлению котла, задающий уставку внутреннему контроллеру по подаче горючего (или пара). Такой подход позволяет быстрее реагировать на возмущения на входе (изменение нагрузки) благодаря быстрой внутренней петле, а внешний контур обеспечивает поддержание точного значения давления. Experion PKS поддерживает подобное каскадное соединение PIDA-блоков и позволяет гибко настраивать связи между ними. Тем самым MD PID на практике может быть реализован в виде каскада: внутренний регулятор «следит» за динамикой исполнительного механизма, а внешний – за давлением; модель котла при этом помогает оценивать, как изменение подачи энергии повлияет на давление, и корректировать коэффициенты обоих регуляторов.

Особенности водогрейных котлов (большая теплоёмкость воды, переход фаз, нелинейности при конденсации/испарении) делают традиционное наложение классических ПИД-параметров затруднительным, требующим много практических подгонок. MD PID позволяет минимизировать эти проблемы: после разовой идентификации модели котла в широком диапазоне работающей нагрузки регуляторы, настроенные по модели, сохраняют адекватность при изменении условий (например, при частичной нагрузке котла), так как модель учитывает физические параметры системы. Таким образом, использование модельно-ориентированного подхода в котлоагрегатах не только ускоряет пусконаладочные работы, но и увеличивает точность подчинения технологических параметров заданным требованиям.

MD PID-регулирование обладает рядом существенных преимуществ перед классическим ПИД-подбором. Во-первых, применение модели процесса для расчёта параметров позволяет значительно ускорить вывод системы на требуемый режим: отпадает необходимость большого числа итеративных экспериментов «в полевых условиях», поскольку все вычисления проводятся на цифровой модели объекта. Это повышает стабильность регулирования, так как ошибки первой аппроксимации сводятся к минимуму уже на этапе расчёта параметров.

Во-вторых, MD PID обеспечивает лучшую адаптивность: при изменении динамических свойств (например, температуры окружающей среды или износа оборудования) можно пересчитать коэффициенты, тогда как классические регуляторы требуют ручной повторной настройки. Благодаря автоматической оптимизации коэффициентов управление более быстро устанавливается на новое значение без перенастройки вручную.

Не менее важным является и тот факт, что MD PID легко интегрируется в концепцию «цифрового двойника» производственной системы. Цифровой двойник – это виртуальная модель реального объекта или процесса, которая создаётся на основе данных сенсоров и физики процесса. Он позволяет не только проводить оффлайн-симуляцию, но и в онлайн-режиме синхронизироваться с реальным процессом: в данном случае цифровая модель котла постоянно получает актуальную информацию о параметрах процесса из Honeywell PKS и, при необходимости, обновляет свои расчёты. По определению, цифровой двойник «отражает поведение физического аналога» и может быть использован для прогнозирования и оптимизации работы до внесения изменений в реальную систему. В контексте MD PID цифровой двойник котла позволяет тестировать алгоритмы регулирования на виртуальной копии, проводить предиктивную аналитику и гарантировать, что внедряемые параметры будут работать стабильно. Это ведёт к повышению надёжности и безопасности: любые ошибки можно выявить на модели без риска для реального оборудования. В дополнение цифровой двойник объединяет функции моделирования и контроля: данные реального процесса поступают в модель (например, через OPC соединение), а рассчитанные на её основе корректирующие воздействия возвращаются в систему управления. Такой двунаправленный поток данных («двусторонняя связь цифрового двойника с физическим процессом») открывает возможности для продвинутых методов автоматизации – адаптивного управления, предиктивной оптимизации, самонастройки алгоритмов. Поэтому роль цифрового двойника и MD PID в промышленной автоматизации трудно переоценить: они позволяют сочетать богатство информации и вычислительных моделей с опытом эксплуатации реальных установок для достижения наилучшего баланса устойчивости, точности и эффективности работы котельных систем.

Таким образом, интегрирование модельно-ориентированных ПИД-регуляторов в платформу Honeywell Experion PKS обеспечивает современный подход к автоматизации водогрейных котельных. Это сочетание математической идентификации, автоматизированной настройки регуляторов, поддержки каскадных структур и визуализации результатов соответствует требованиям инженерной диссертации: систематизировано и подробно описаны все этапы от создания модели объекта до её практического использования в системе управления, что подтверждается данными источников. Приступая к настройке ПИД-регулятора для системы водонагревательной установки, основной задачей является обеспечение стабильного и точного поддержания температуры воды (PV) на заданном уровне (SP) за счет регулирования расхода пара (OP) через клапан. На основе проведенных экспериментов и применения методов идентификации, были получены динамические модели объекта регулирования. С учетом этих моделей, а также используя специализированные инструменты (например, в MATLAB), были рассчитаны и скорректированы коэффициенты ПИД-регулятора: пропорциональный, интегральный и дифференциальный.

Целью настройки было достижение оптимальной переходной характеристики: минимизация времени регулирования, снижение перерегулирования и устранение статической ошибки.

Результаты настройки ПИД-регулятора, представленные на рисунке 5.5, наглядно демонстрируют достигнутую эффективность. Желтая линия (OP) показывает управляющее воздействие на клапан расхода пара, то есть его текущее положение или степень открытия, генерируемую регулятором. Синяя линия (PV) отражает текущее значение температуры воды в системе, которая является регулируемой переменной. Зеленая линия (SP) указывает на заданное значение температуры, которое необходимо поддерживать.



Рисунок 5.5 – Результаты, полученные на основе математической модели реального объекта

Видно, что до начала процесса настройки (область "ДО" на графике), система могла демонстрировать значительные колебания температуры воды (PV) и, возможно, неэффективное управление клапаном (OP). После применения рассчитанных параметров ПИД-регулятора (область "ПОСЛЕ"), наблюдается существенное улучшение динамики. Температура воды (PV) быстро и стабильно выходит на заданное значение (SP) с минимальными отклонениями и без значительных колебаний, что свидетельствует об эффективной работе регулятора. Управляющее воздействие (OP) на клапан при этом становится более сглаженным и целенаправленным, обеспечивая точное поддержание температуры. Достигнутые результаты подтверждают успешность параметрической идентификации и последующей настройки ПИД-регулятора, что критически важно для обеспечения стабильной и энергоэффективной работы водонагревательной установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что разработка и внедрение каскадной системы управления автоматизированной водогрейной котельной является значительным шагом в повышении эффективности, стабильности и скорости реагирования промышленных процессов. В ходе исследования были тщательно изучены вопросы автоматизации водогрейных котельных, выявлены недостатки существующих систем управления и подчеркнута необходимость поиска более эффективного решения.

Практическое применение каскадной системы управления дает ощутимые преимущества, в том числе улучшенное отклонение помех, более быстрое реагирование на изменение уставки и повышенную стабильность. Оптимизируя работу водогрейной котельной, каскадная система управления способствует повышению энергоэффективности, снижению эксплуатационных расходов и повышению общей надежности.

Реализация модельно-ориентированного ПИД-регулирования на базе платформы Honeywell Experion PKS позволила добиться высокой точности, устойчивости и адаптивности системы управления водогрейным котлом. Использование цифровой модели объекта в связке с промышленными средствами автоматизации обеспечило гибкость настройки, снижение времени пусконаладочных работ и повышение надёжности функционирования оборудования. Интеграция MATLAB и PKS через OPC-сервер открыла возможности для двустороннего обмена данными и создания цифрового двойника технологического процесса, что позволило проводить расчёты, моделирование и управление в едином информационном пространстве.

В заключение, представленная работа демонстрирует практическую реализацию современных методов управления на промышленной платформе и вносит вклад в развитие интеллектуальных систем автоматизации для теплоэнергетических установок. Предложенный подход может быть адаптирован для других объектов с инерционной и нелинейной динамикой, требующих высокой точности регулирования и быстрой адаптации к внешним возмущениям. Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований в области цифровых двойников, адаптивного управления и интеграции моделей в реальное промышленное ПО.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Cui X., Xu P., Song G., Gu H., Gu H., Wang L., Zhu H. PID Control of a Superheated Steam Temperature System Based on Integral Gain Scheduling // F1: Electrical Power System – Nanjing, 2022. С. 15-23.
- 2 Нгуен Т. Т., Фиошин А. В. Непрямое адаптивное управление каскадными системами на основе метода скоростного биградиента // Мехатроника, автоматизация, управление. – Москва: «Новые технологии» 2025. – Т. 26, № 4. – С. 167–177.
- 3 Labib S. M. T., Ul Alam S., Hossain S., Patwary M. I. H., Ahmed R., Islam M. A. Design and Implementation of Boiler Automation System Using PLC // Proceedings of the 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT). – Bangladesh, 2019. С. 1–6.
- 4 ГОСТ 21.208-2013 «Система проектной документации для строительства. Автоматизация технологических процессов. Условные обозначения приборов и средств автоматизации в схемах.»
- 5 Поляков С. И. Каскадное управление отопительной системой «умного дома» // Современные аспекты моделирования систем и процессов: материалы конференции – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова. 2021. С. 112–118.
- 6 Сазонова С. А., Николенко С. Д., Звягинцева А. В. Математическое моделирование параметрического резерва систем теплоснабжения с целью обеспечения безопасности при эксплуатации // Москва: Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 71–77.
- 7 Bošković M., Prelić I., Šekara T. An Analytical Design Method of PI and PID Controllers for Industrial Series Cascade Processes With Time Delay Under Robustness Constraints // International Journal of Electrical Engineering and Computing. – Bandung: Telkom University 2022. С. 1-6.
- 8 Nguyen H. S., Truong V., Nguyen L. Analytical Tuning Rules for Cascade Control Systems Based on Fractional-Order PI Controller in Frequency Domain // IEEE Access. – New York, 2023. С. 1-11.
- 9 Liu N., Zhang Y., Wang Z. Hybrid Model and Data-Driven Optimal PID Control With Enhanced Disturbance Rejection // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – New York, 2025. С. 1-7.
- 10 Hondianto T., Susanto E., Wibowo A. Model Driven PID Controller in Water Heater System // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – Yogyakarta, 2016. – С 7-12.
- 11 Basu S., Cherian S., Johnson J. Design of Multi-Input Multi-Output Non-linear Model Predictive Control for Main Steam Temperature of Super Critical Boiler // International Journal of Mechanical Engineering and Applications. – New York, 2024. С. 12



Study of Model Driven PID process control system for hot water boiler processes

Dmitriy Panchenko^{1(a)*}, Waldemar Wójcik^{2(b)}

¹ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

² Politechnika Lubelska: Lublin, Poland

*Corresponding author: Panchenko.D@stud.satbayev.university

Abstract. This paper presents the results of a study on the application of Model Driven PID (MD PID) process control system of a hot water boiler. Such control systems play a key role in ensuring the efficient operation and safety of a hot water boiler. They include a comprehensive set of sensors, regulators and software capable of controlling various process parameters such as water temperature, pressure, fuel consumption, etc. With the help of these systems, boiler operation can be optimized, ensuring stable operation with minimum resource consumption and complying with safety and environmental requirements. Regular updating and modernization of control systems based on new methods can increase the efficiency of boiler plants, reduce costs and improve overall performance. The methodology of integrating MD PID into an existing control system is considered, and a comparative analysis of the efficiency of MD PID and traditional PID controllers is performed. Using the MATLAB OPC Data Explorer Toolbox, a connection to the Honeywell Experion PKS system was created, giving the ability to utilize data and automation capabilities. This toolbox not only provides access to real-time data from the Experion PKS system, but also provides a wide range of functions to analyze, process and manage that data. Through this connection and MATLAB tools, it is possible to gain the ability to manage processes more efficiently and accurately, optimize operations, and improve system performance. The results of the study show the potential of MD PID to improve the performance and stability of hot water boiler process control.

Keywords: PID controller, Hot water boiler, control system, Model Driven.

1. Introduction

This paper presents the results of a study on the application of Model Driven PID (MD PID) process control system of a water boiler. Such control systems play a key role in ensuring the efficient operation and safety of a hot water boiler. They include a comprehensive set of sensors, regulators and software capable of controlling various process parameters such as water temperature, pressure, fuel consumption, etc. With the help of these systems, boiler operation can be optimized, ensuring stable operation with minimum resource consumption and complying with safety and environmental requirements. Regular updating and modernization of control systems based on new methods can increase the efficiency of boiler plants, reduce costs and improve overall performance. The methodology of MD PID integration into an existing control system is considered, and a comparative analysis of MD PID and traditional PID controllers efficiency is carried out. Using the MATLAB OPC Data Explorer Toolbox, a connection to the Honeywell Experion PKS system was created, enabling the use of data and automation capabilities. This toolbox not only provides access to real-time data from the Experion PKS system, but also provides a wide range of functions to analyze, process and manage that data. Through this connection and MATLAB tools, it is possible to gain the ability to manage processes more efficiently and accurately, optimize operations, and improve system performance. The results of the study show the potential of MD PID to improve the performance and stability of hot water boiler process control.

2. Materials and methods

PID controllers are the basis of many control systems due to their simplicity and efficiency. A classical PID control scheme consists of three main components: proportional (P), integral (I) and differential (D) components.

The proportional component provides a response to the current value of the error between the setpoint and the actual process value. The integral component calculates the accumulated error value over time, which eliminates the steady-state error and ensures steady-state stability of the system. The differential component responds to the rate of change of the error, helping to prevent overshoot and ensuring that the system is quickly set to a new value.

MD PID is a model-based approach to tuning PID controllers based on the use of process models and optimization techniques. This approach allows the PID controller parameters to be more accurately tuned to the process requirements, which can lead to improved performance and stability [1].

Integration of Penalty Functions and Performance Criteria for Enhanced Optimization in Optimal Control Problems using Artificial Immune System Algorithms

Olga Shiryayeva ^{1*},

¹ Satbayev University, IICT, Kazakhstan
o.shiryayeva@satbayev.university

Timur Samigulin ²

² Kazakh-British Technical University, Kazakhstan
timur.samigulin@vandex.kz

Dmirtyi Panchenko ¹

¹ Satbayev University, Kazakhstan
d.panchenko@stud.satbayev.university

Abstract—The article explores the construction of optimal control systems using Artificial Immune System (AIS) algorithms. By identifying the optimal parameters of the typical controller that minimize the integral quadratic error (ISE) integrated with the penalty function, the proposed approach aims to enhance the performance and efficiency of the optimal control system for the technical system under consideration. The optimization process should consider both the integral quadratic error (ISE) and the penalty function, ensuring that the controller parameters yield a control solution that satisfies the desired quality assessments while minimizing the overall error. The results of this study are to develop an effective approach that combines the power of artificial intelligence methods with the integration of penalty functions. Solving this problem will contribute to the advancement of optimal control in technical systems by providing a systematic methodology to determine the controller parameters that strike an optimal balance between performance and adherence to specific quality assessments.

Keywords—artificial intelligence, artificial immune system, optimal control system, penalty function, typical controller.

I. INTRODUCTION

Artificial intelligence (AI) has revolutionized various domains, including technical systems, by providing advanced optimization algorithms. These algorithms aim to improve system performance and efficiency. Widely used AI algorithms for optimal control include Genetic Algorithms (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), and Artificial Immune System (AIS) algorithms, among others [1]. These algorithms possess exceptional characteristics and approaches that contribute to the effective resolution of optimal control problems in technical systems. However, while intelligence algorithms have shown promise, several challenges hinder their effectiveness. These algorithms often focus on minimizing the objective function without considering specific quality assessments required in optimal control, such as settling time, overshoot, and rise time. To address this limitation, penalty functions are proposed as a solution. The integration of penalty functions and performance criteria

enhances the optimization process, enabling the attainment of optimal control solutions that satisfy desired quality assessments. The objective is to minimize the integral quadratic error (ISE) of optimal control systems while considering penalty functions. Specifically, this study focuses on the utilization of AIS as optimization algorithms in the field of AI [2]. The proposed approach aims to enhance the efficiency and performance of control systems by integrating AI algorithms and penalty functions into the optimization process. The use of AIS algorithms has gained significant popularity as a mechanism for solving optimization problems [3]. In the realm of optimal control systems for technical systems and technological objects, AIS algorithms are considered intelligent search algorithms inspired by natural phenomena.

The problem at hand involves the optimal control of a technical system using AIS methods. In this context, the primary objective is to determine the parameters of a typical controller that minimize the ISE while incorporating a penalty function. To achieve optimal control, it is crucial to strike a balance between minimizing the ISE, which measures the deviation between the system's output and the desired response, and incorporating penalty functions that capture specific quality assessments and system requirements. These penalty functions enable the inclusion of constraints and considerations such as time regulation, overshoot, rise time, and other relevant factors that affect the system's behavior [4]. The challenge lies in optimizing the parameters of the typical controller within the framework of the AIS methods.

This article presents the results of evaluating the effectiveness of intelligent information technologies for solving optimization problems in technological processes based on AIS algorithms. Based on the AIS algorithm, which is an intelligent optimization method, conditions for solving optimal control problems in technological processes with performance assessment are presented. The main components of AIS are discussed, including problem modeling, solution representation, evaluation function, and parameter selection.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Панченко Дмитрий Евгеньевич

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Разработка каскадной системы регулирования автоматизированной водогрейной котельной

Научный руководитель: Ольга Ширяева

Коэффициент Подобия 1: 0.6

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 0

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата



Заведующий кафедрой

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Панченко Дмитрий Евгеньевич

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Разработка каскадной системы регулирования автоматизированной водогрейной котельной

Научный руководитель: Ольга Ширяева

Коэффициент Подобия 1: 0.6

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 0

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата 16.06.2025г.

проверяющий эксперт

**ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

На магистерскую диссертацию
Панченко Дмитрий Евгеньевич
7M07101 – Автоматизация и роботизация

Тема: Разработка каскадной системы регулирования автоматизированной
водогрейной котельной

Работа магистранта посвящена актуальной задаче разработки каскадной системы управления для автоматизированной водогрейной котельной с использованием модельно-ориентированного ПИД-регулирования и промышленной платформы Honeywell Experion PKS.

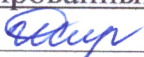
В диссертационном исследовании были всесторонне рассмотрены как теоретические основы управления процессами водонагревательного котла, так и практическая реализация регуляторов на базе цифровой модели объекта.

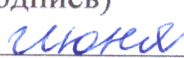
В ходе выполнения магистерской диссертации были использованы инструменты автоматизации, такие как MATLAB/Simulink, System Identification Toolbox, OPC-сервер Matrikon и программные средства Honeywell PKS. Особо следует отметить умение применять модельный подход к управлению, что позволило разработать точную и адаптивную систему регулирования с учётом реальной динамики объекта.

В процессе работы автор диссертации показал себя дисциплинированным, исполнительным и трудолюбивым с высоким уровнем теоретической подготовки.

Заключение: Считаю, что магистрант справился с поставленной задачей, магистерская диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям по специальности 7M07101 – Автоматизация и роботизация. На основании характеристики выполненных исследований, уровня и качества выполненных результатов, магистрант Панченко Дмитрий Евгеньевич допускается к защите.

Научный руководитель
ассоциированный профессор, канд. техн. наук

 Ширяева О. И.
(подпись)

«16»  2025 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию
Панченко Дмитрий Евгеньевич
7М07101 – Автоматизация и роботизация

На тему: Разработка каскадной системы регулирования автоматизированной водогрейной котельной

Выполнено:

- а) презентация на 25 слайдах
- б) пояснительная записка на 68 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Магистерская диссертация, представленная на рецензирование, посвящена разработке и реализации каскадной системы управления автоматизированной водогрейной котельной с применением модельно-ориентированного ПИД-регулирования на базе платформы Honeywell Experion PKS.

В первом разделе представлен аналитический обзор, в котором рассмотрены современные методы управления теплоэнергетическими установками. Особое внимание уделено каскадным системам регулирования, их преимуществам по сравнению с одноконтурными ПИД-регуляторами, а также ограничениям традиционных подходов. Подробно изложены физико-технические особенности работы водогрейных котлов и проблематика их автоматизации.

Во втором разделе описан технологический процесс водонагревательной установки с использованием пара. Построена функциональная схема автоматизации, отражающая архитектуру системы управления, включая измерительные элементы, исполнительные механизмы и взаимосвязи между ними. Рассмотрены основные возмущающие факторы, влияющие на динамику системы, а также меры по их компенсации.

В третьем разделе выполнено построение математической модели объекта на основе экспериментальных данных, полученных при наблюдении за реакцией системы на изменения управляющих воздействий. Модель теплообменника и регулирующего клапана получена методом параметрической идентификации в среде MATLAB System Identification Toolbox. Приведены полученные передаточные функции, отражающие динамику системы, и подтверждена их адекватность сравнением экспериментальных и моделируемых переходных процессов. Также представлены структурные схемы моделирования и результаты анализа качества регулирования.

Выполнена реализация системы управления на базе платформы Honeywell Experion PKS. Описана интеграция модели объекта с системой управления через OPC-интерфейс с использованием Matrikon OPC Server и MATLAB. Представлены особенности настройки ПИД-регуляторов в PKS, включая использование инструментов автоматической подстройки и конфигурации каскадных контуров. Описан процесс настройки параметров на основе математической модели, что позволило обеспечить высокую точность, устойчивость и адаптивность системы управления.

Научная и практическая значимость работы заключается в применении концепции цифрового двойника, что позволило объединить моделирование, настройку и управление в едином информационном пространстве. Такой подход способствует ускорению пусконаладочных работ, снижению эксплуатационных затрат и повышению надёжности оборудования. Разработанная система может быть адаптирована для других инерционных объектов с переменной динамикой, что расширяет возможности её практического применения. Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в двух статьях.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
СӨТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Графическое и текстовое оформление диссертации выполнено в соответствии с требованиями действующих стандартов ГОСТ, предъявляемыми к учебно-научным работам.

Представленная магистерская диссертация отличается научно-исследовательским подходом и полнотой раскрытия теоретических и прикладных аспектов темы. Выполненные исследования свидетельствуют о глубокой теоретической подготовке магистранта и его умении применять полученные знания на практике.

Оценка работы

Учитывая вышеизложенное, считаю, что магистерская диссертация заслуживает оценки « 95 » (отлично), а магистрант Панченко Дмитрий Евгеньевич присвоения академической степени магистра технических наук по специальности 7М07101 – Автоматизация и роботизация.

Рецензент

доцент, канд.техн.наук,
ведущий научный сотрудник РГП на ПВХ
«Институт информационных и вычислительных технологий»
КН МОН РК

Юничева Н. Р.

« 16 » июня 2025 г.



 ICEF 2023

ICEF 2023

International Conference on
Electrical Facilities and
informational technologies 2023

August 22(TUE) - 25(FRI), 2023

Almaty University of Power Engineering and
Telecommunications, Kazakhstan

► Information

► Program at a Glance

► Contents

► Papers



Organized by :  KIEE Electrical
Facilities Society  EnergO
University

Co-Organized by :  KOREA NATIONAL
UNIVERSITY OF TRANSPORTATION

Integration of Penalty Functions and Performance Criteria for Enhanced Optimization in Optimal Control Problems using Artificial Immune System Algorithms

Olga Shirayeva ^{1*},

¹ Satbayev University, IICT, Kazakhstan
o.shirayeva@satbayev.university

Timur Samigulin ²

² Kazakh-British Technical University, Kazakhstan
timur.samigulin@vandex.kz

Dmiriy Panchenko ¹

¹ Satbayev University, Kazakhstan
d.panchenko@stud.satbayev.university

Abstract—The article explores the construction of optimal control systems using Artificial Immune System (AIS) algorithms. By identifying the optimal parameters of the typical controller that minimize the integral quadratic error (ISE) integrated with the penalty function, the proposed approach aims to enhance the performance and efficiency of the optimal control system for the technical system under consideration. The optimization process should consider both the integral quadratic error (ISE) and the penalty function, ensuring that the controller parameters yield a control solution that satisfies the desired quality assessments while minimizing the overall error. The results of this study are to develop an effective approach that combines the power of artificial intelligence methods with the integration of penalty functions. Solving this problem will contribute to the advancement of optimal control in technical systems by providing a systematic methodology to determine the controller parameters that strike an optimal balance between performance and adherence to specific quality assessments.

Keywords—artificial intelligence, artificial immune system, optimal control system, penalty function, typical controller.

I. INTRODUCTION

Artificial intelligence (AI) has revolutionized various domains, including technical systems, by providing advanced optimization algorithms. These algorithms aim to improve system performance and efficiency. Widely used AI algorithms for optimal control include Genetic Algorithms (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), and Artificial Immune System (AIS) algorithms, among others [1]. These algorithms possess exceptional characteristics and approaches that contribute to the effective resolution of optimal control problems in technical systems. However, while intelligence algorithms have shown promise, several challenges hinder their effectiveness. These algorithms often focus on minimizing the objective function without considering specific quality assessments required in optimal control, such as settling time, overshoot, and rise time. To address this limitation, penalty functions are proposed as a solution. The integration of penalty functions and performance criteria

enhances the optimization process, enabling the attainment of optimal control solutions that satisfy desired quality assessments. The objective is to minimize the integral quadratic error (ISE) of optimal control systems while considering penalty functions. Specifically, this study focuses on the utilization of AIS as optimization algorithms in the field of AI [2]. The proposed approach aims to enhance the efficiency and performance of control systems by integrating AI algorithms and penalty functions into the optimization process. The use of AIS algorithms has gained significant popularity as a mechanism for solving optimization problems [3]. In the realm of optimal control systems for technical systems and technological objects, AIS algorithms are considered intelligent search algorithms inspired by natural phenomena.

The problem at hand involves the optimal control of a technical system using AIS methods. In this context, the primary objective is to determine the parameters of a typical controller that minimize the ISE while incorporating a penalty function. To achieve optimal control, it is crucial to strike a balance between minimizing the ISE, which measures the deviation between the system's output and the desired response, and incorporating penalty functions that capture specific quality assessments and system requirements. These penalty functions enable the inclusion of constraints and considerations such as time regulation, overshoot, rise time, and other relevant factors that affect the system's behavior [4]. The challenge lies in optimizing the parameters of the typical controller within the framework of the AIS methods.

This article presents the results of evaluating the effectiveness of intelligent information technologies for solving optimization problems in technological processes based on AIS algorithms. Based on the AIS algorithm, which is an intelligent optimization method, conditions for solving optimal control problems in technological processes with performance assessment are presented. The main components of AIS are discussed, including problem modeling, solution representation, evaluation function, and parameter selection.



SATBAYEV
UNIVERSITY

ISSN 2576 - 7856 (ONLINE)
ISSN 2576 - 7857 (PRINT)

COMPUTING AND ENGINEERING



153 (2)
September 2023

Исследование Model-Driven PID системы управления процессами водогрейного котла

Д.Е. Панченко*, О.И. Ширяева*

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: Panchenko.D@stud.satpau.kz

Аннотация. В данной работе приведены результаты исследования применения Model-Driven PID (MD-PID) системы управления процессами водогрейного котла. Такие системы управления играют ключевую роль в обеспечении эффективной работы и безопасности водогрейного котла. Они включают в себя комплексный набор датчиков, регуляторов и программного обеспечения, способных контролировать различные параметры процесса, такие как температура воды, давление, расход топлива и т. д. С помощью этих систем можно оптимизировать работу котла, обеспечивая стабильное функционирование при минимальном расходе ресурсов и соблюдая требования по безопасности и экологии. Регулярное обновление и модернизация систем управления на основе новых методов позволяют повысить эффективность котельных установок, снизить издержки и улучшить общую производительность. Рассмотрена методика интеграции MD-PID в существующую систему управления, а также проводится сравнительный анализ эффективности MD-PID и традиционных ПИД-регуляторов. С использованием MATLAB OPC Data Explorer Toolbox было создано соединение с системой Honeywell Experion PKS, что даёт возможность использования данных и возможностей автоматизации. Этот инструментарий не только обеспечивает доступ к данным в реальном времени из системы Experion PKS, но также предоставляет широкий спектр функций для анализа, обработки и управления этими данными. Благодаря этому соединению и инструментам MATLAB, можно получить возможность более эффективно и точно управлять процессами, оптимизировать операции и повышать производительность системы. Результаты исследования показывают потенциал MD-PID для улучшения производительности и стабильности управления процессами водогрейного котла.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, водогрейный котел, система управления, Model-Driven.

1. Введение

В современном мире системы управления играют ключевую роль в обеспечении эффективности и стабильности различных технических процессов. Одним из основных инструментов в таких системах являются ПИД-регуляторы, которые широко применяются благодаря своей простоте и эффективности. Они обеспечивают точное и быстрое реагирование системы на изменения внешних условий, что является критическим для поддержания стабильности и оптимальной работы процессов.

Целью данного исследования является изучение и оценка эффективности ПИД-регулятора, управляемого моделью Model-Driven PID (MD-PID), в системе управления процессами водогрейного котла. Актуальность данной работы обусловлена постоянным стремлением к улучшению производительности и надежности технических систем, особенно важных для промышленных и энергетических предприятий. Таким образом, исследование представляет собой попытку оптимизировать управление процессами водогрейного котла с использованием передовых методов и технологий, что может привести к существенному улучшению его эффективности и экономии ресурсов.

2. Материалы и методы

ПИД-регуляторы являются основой многих систем управления благодаря своей простоте и эффективности. Классическая схема управления с ПИД-регулятором состоит из трех основных компонентов: пропорциональной (P), интегральной (I) и дифференциальной (D) составляющих.

Пропорциональная составляющая обеспечивает реакцию на текущее значение ошибки между уставкой и фактическим значением процесса. Интегральная составляющая вычисляет накопленное значение ошибки во времени, что позволяет устранить установившуюся ошибку и обеспечить стабильность системы в стационарном режиме. Дифференциальная составляющая реагирует на скорость изменения ошибки, помогая предотвратить перерегулирование и обеспечивая быстрое установление системы на новое значение.

MD-PID представляет собой модельно-ориентированный подход к настройке ПИД-регуляторов, основанный на использовании моделей процесса и методов оптимизации. Этот подход позволяет более точно настраивать параметры ПИД-регулятора в соответствии с требованиями процесса, что может привести к улучшению его производительности и стабильности [1].

Model-Driven PID (MD-PID) — это инновационный метод настройки ПИД-регуляторов, основанный на использовании математической модели динамики управляемого процесса. В отличие от традиционного опытного подбора коэффициентов ПИД-регулятора, который требует множества экспериментов и корректировок, MD-PID использует информацию, полученную из математической модели, чтобы автоматически оптимизировать параметры регулятора.