

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 Автоматизация и управление

Абдукаримов Абдулазиз Асадулло угли
Жұмағұлов Бақдәулет Қуанышұлы

Автоматизация процесса каталитического сжигания газов

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К дипломному проекту

6В07103 – 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

Кафедра Автоматизации и управления

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой АиУ
канд. тех. наук
Сарсенбаев Н.С.
«11» 06 2025 г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

На тему: «Автоматизация процесса каталитического сжигания газов »

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Выполнил

Абдукаримов А. А.
Жұмағұлов Б. Қ.

Рецензент
Доктор РбД, доц.
Оракбаев Е.Ж.
(подпись)
«11» 06 2025 г.

Научный руководитель
канд.техн.наук, ассоц.проф,
Кошимбаев Ш.К.
(подпись)
«12» 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

6B07103 – Автоматизация и роботизация

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой АиУ
канд. тех. наук

Усkenбаев Н.С.
«12» 06 2025 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Обучающимся Абдукаримов А. А. Жұмағұлов Б. К.

Тема: «Автоматизация процесса каталитического сжигания газов».

Утвержден приказом Р. Ускенбаевой № 26-П/Ө от «29» января 2025 г.

Срок сдачи законченной работы: «26» мая 2025 г.

Исходные данные к проекту: входные и выходные данные каталитического сжигания газов

Перечень подлежащих к разработке в дипломном проекте вопросов:

а) описание технологической части;

б) расчетная часть;

в) техническая реализация автоматизации.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

а) функциональная схема автоматизация процесса каталитического сжигания газов .

Рекомендуемая основная литература:

а) Волков В.В. Линейные и нелинейные системы автоматического регулирования: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2010. – 432 с.

б) Кузнецов П.В. Моделирование и управление динамическими системами в MATLAB/Simulink. – СПб.: Питер, 2015. – 368 с.

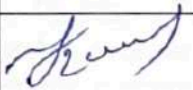
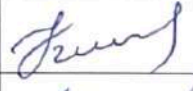
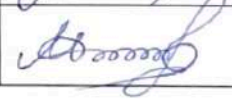
в) Ли Х., Чжан Ю. Проектирование систем управления с использованием MATLAB и Simulink. – М.: Наука, 2018. – 504 с.

ГРАФИК
подготовки дипломного проекта

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологический раздел Описание процесса каталитического сжигание газов	16.02.2025 г.	
Технологический раздел Разработка функциональной схемы автоматизации системы управления процессом	26.02.2025 г.	
Расчетный раздел Анализ и синтез систем автоматического регулирования каталитической печи	28.03.2025 г.	
Технический раздел Разработка программы управления	26.05.2025 г.	

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченный дипломный проект с указанием
относящихся к ним разделов проекта

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Технологический раздел	Ш.К. Кошимбаев канд. техн. наук	3.03.25	
Расчетный раздел	Ш.К. Кошимбаев канд. техн. наук	25.04.25	
Нормоконтролер	Қ. А. Манатов магистр техн. наук	31.05.2025г.	

Научный руководитель


подпись

Кошимбаев Ш. К.

Задание принял к исполнению обучающийся

подпись

Абдукаримов А. А.

Задание принял к исполнению обучающийся

подпись

Жұмағұлов Б. К.

Дата

« ____ » _____ 2025

АНДАТПА

Каталитикалық газдарды жану процесін бақылау және химиялық реакцияларды талдау жүйесін автоматтандыруға арналған дипломдық жоба.

Жоба технологиялық процестің сипаттамасын және автоматтандырудың функционалдық схемасын қамтиды. Басқару жүйесін жүзеге асыру үшін Simple SCADA бағдарламалық қамтамасыз етуі мен ОВЕН ПР-103 контроллері қолданылды. Есептеу бөлімінде басқару жүйесінің динамикалық қасиеттері талданып, химиялық реакциялардың кинетикасын ескере отырып, математикалық модель құрылды және тиімді әрі тұрақты басқаруды қамтамасыз ететін оңтайлы реттегіш синтезделді. Жүйенің сенімділігі мен тиімділігі өзгеретін процесс жағдайларында тәжірибелік тексерістен өтті.

АННОТАЦИЯ

Дипломный проект посвящен разработке автоматизированной системы управления процессом каталитического сжигания газов с контролем и анализом химических реакций.

В проекте выполнено описание технологического процесса и построена функциональная схема автоматизации. Для реализации системы управления использованы программное обеспечение Simple SCADA и контроллер ОВЕН ПР-103. В расчетной части проведен анализ динамических свойств системы управления, разработана математическая модель с учетом кинетики химических реакций, а также синтезирован оптимальный регулятор, обеспечивающий эффективное и стабильное управление процессом. Практическая проверка показала надежность и эффективность системы в условиях изменяющихся параметров.

ABSTRACT

The diploma project is dedicated to the development of an automated control system for the catalytic gas combustion process with monitoring and analysis of chemical reactions.

The project includes a description of the technological process and the development of a functional automation scheme. The control system is implemented using Simple SCADA software and the OVEN PR-103 controller. The calculation part involves an analysis of the dynamic properties of the control system, development of a mathematical model considering the kinetics of chemical reactions, and synthesis of an optimal controller to ensure efficient and stable process control. Practical testing demonstrated the system's reliability and effectiveness under varying process condition.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Технологическая часть	8
1.1 Технологический процесс каталитического сжигания газов	8
1.2 Технологические параметры процесса и их контроль	10
1.3 Устройства и принцип действия лабораторной трубчатой печи	11
1.4 Постановка задачи автоматизации	12
2 Разработка автоматизированной системы управления процессом	14
2.1 Определение точек контроля и регулирования параметров	14
2.2 Определение структуры АСУ ТП	15
3 Расчетная часть	17
3.1 Разработка математической модели системы автоматического регулирования	17
3.2 Математическая модель САР каталитической печи сжигания газа	17
3.3 Анализ динамических свойств разомкнутой и замкнутой САР	20
3.4 Синтез регулятора	27
3.5 Принцип работы системы	38
4 Разработка программного обеспечения в среде Simple Scada	40
4.1 Программирование логического контроллера	40
4.2 SCADA-система для мониторинга и управления	43
5 Разработка функциональной схемы автоматизации системы управления процессом	47
5.1 Функциональная схема автоматизации	47
5.2. Выбор аппаратной базы	47
5.2.1 Выбор датчика температуры	48
5.2.2 Выбор датчика давления	49
5.2.2 Выбор массового расходомера	51
5.2.4 Выбор цифровой регулятор температуры	53
5.2.5 Выбор контроллера	55
Заключение	58
Список литературы	59
Приложение А – Технологическая схема процесса	60
Приложение Б – Структурная схема автоматизации	61
Приложение В – Функциональная схема автоматизации	62
Приложение Г – Электрическая принципиальная схема (часть 1)	63
Приложение Г – Электрическая принципиальная схема (часть 2)	64

ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные процессы требуют высокой точности и эффективности управления, особенно в области экологически чистых технологий и энергоэффективных систем. Одним из таких процессов является каталитическое сжигание газов — эффективный способ утилизации промышленных выбросов и снижения вредных веществ в атмосфере. Автоматизация этого процесса с применением современных методов контроля и анализа химических реакций становится ключевым направлением для повышения безопасности, экономичности и экологичности производства.

Целью данной дипломной работы является разработка системы автоматического управления процессом каталитического сжигания газов с интегрированным контролем и анализом протекающих химических реакций. Такая система позволит обеспечить стабильное и оптимальное протекание реакции, минимизировать образование вредных побочных продуктов, а также повысить общую эффективность технологического процесса.

В рамках работы проведено детальное описание объекта автоматизации — установки каталитического сжигания газов, выявлены основные параметры и закономерности протекания химических реакций. Для моделирования процесса использованы методы химического кинетического анализа и математического моделирования, что позволило построить адекватную модель управления.

Далее была проведена идентификация и анализ существующих систем управления с целью выявления узких мест и определения требований к разрабатываемой системе. Для синтеза оптимального регулятора применены современные методы оптимизации, включая численные алгоритмы и адаптивные подходы, что обеспечивает высокую точность и надежность управления.

Новизна работы заключается в разработке комплексной системы автоматизации, объединяющей управление технологическим процессом и анализ химических реакций в реальном времени с использованием современных сенсорных и вычислительных технологий. Впервые предложена интеграция методов динамического контроля и интеллектуального анализа данных для повышения эффективности каталитического сжигания.

Задачи дипломного проекта включают анализ технологического процесса каталитического сжигания газов и определение ключевых параметров контроля, разработку математической модели процесса с учетом кинетики химических реакций, синтез системы автоматического управления с оптимизацией режимов работы, внедрение методов мониторинга и анализа химических реакций в реальном времени, а также проведение экспериментальной проверки и оценку эффективности разработанной системы.

1 Технологическая часть

1.1 Технологический процесс каталитического сжигания газов

Каталитическое сжигание газов — это современный и эффективный способ очистки промышленных выбросов, направленный на снижение уровня загрязнения атмосферы вредными веществами. Процесс основывается на химической реакции окисления горючих компонентов в газовой смеси с использованием катализатора, что позволяет проводить сжигание при более низких температурах и снижать энергозатраты. Это особенно важно в условиях современных экологических требований и экономии ресурсов [1].

Процесс начинается с подготовки газовой смеси — исходные газы проходят фильтрацию и дозирование. Стабильная подача газов с необходимым расходом и давлением является ключевым этапом, обеспечивающим правильное протекание каталитической реакции. Для этого в системе используются расходомеры и регулирующие клапаны, которые контролируются системой автоматизации (см. приложение А, где представлена технологическая схема процесса)[1].

После подачи в реактор, газовая смесь контактирует с каталитическим наполнителем, который представляет собой специальный материал с большой площадью поверхности и высокой активностью. Катализатор способствует снижению энергии активации химической реакции, что позволяет протекать процессу эффективнее и с меньшими затратами энергии.

Температурный режим внутри реактора строго контролируется. С помощью термопар и датчиков температуры измеряются значения в различных зонах реактора. Эти данные поступают в систему управления, которая корректирует работу нагревательных элементов и поддерживает температуру в пределах оптимальных значений. Такой контроль предотвращает перегрев катализатора и способствует его долговечности[2].

Давление в системе также находится под постоянным контролем благодаря датчикам давления с аналоговым выходом 4–20 мА. Мониторинг давления позволяет своевременно выявлять отклонения и предотвращать аварийные ситуации, связанные с избыточным давлением или недостаточным напором газов.

Для точного измерения расхода газов применяются массовые расходомеры-регуляторы, которые не только фиксируют значение расхода, но и позволяют автоматически регулировать подачу газа в соответствии с технологическими требованиями[3]. Такая автоматизация обеспечивает оптимальное использование сырья и повышает стабильность работы установки.

Все эти данные собираются программируемым логическим контроллером (ПЛК), который является центральным элементом системы управления. ПЛК обрабатывает поступающие сигналы, реализует алгоритмы регулирования технологического процесса и управляет исполнительными механизмами, такими как клапаны, расходомеры, нагревательные элементы и другие устройства[3].

Автоматизация процесса каталитического сжигания газов значительно снижает влияние человеческого фактора, повышает точность и оперативность управления, а также обеспечивает безопасность работы установки. Система автоматического контроля и управления позволяет минимизировать аварийные ситуации, экономить ресурсы и поддерживать высокую экологическую эффективность процесса.

Особое внимание в процессе уделяется безопасности эксплуатации. Система оснащена аварийными механизмами, которые при выходе параметров за установленные пределы автоматически блокируют подачу газа и отключают оборудование [5]. Кроме того, реализованы функции диагностики и предупреждения о возможных неисправностях.

На рисунке 1.1 представлен общий вид стенда для каталитического сжигания газа, где наглядно отображены основные элементы установки: система подачи газов, реактор с катализатором, датчики температуры и давления, расходомеры, исполнительные механизмы и программируемый контроллер управления. Такой стенд служит для проведения лабораторных исследований, тестирования и оптимизации алгоритмов автоматического управления (см. приложение А — структурная схема автоматизации) [5].



Рисунок 1.1 – Общий вид стенда для каталитического сжигания газа

Технологический процесс каталитического сжигания газов — это пример успешной интеграции химических знаний и современных инженерных решений. Постоянное совершенствование методов автоматизации и развитие новых катализаторов позволяют повышать экологическую безопасность производства и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду[5].

Подводя итог, технологический процесс каталитического сжигания газов представляет собой сложный и многоуровневый процесс, обеспечиваемый

современными методами автоматизации и передовыми химико-технологическими решениями. Внедрение таких систем способствует устойчивому развитию промышленности, снижению вредного воздействия на окружающую среду и улучшению качества жизни.

1.2 Технологические параметры процесса и их контроль

Для обеспечения стабильной и эффективной работы установки каталитического сжигания газов необходимо постоянно контролировать ключевые технологические параметры, которые напрямую влияют на качество и безопасность процесса.

Одним из главных параметров является температура. Оптимальный диапазон температур варьируется от 250 до 500 °С и зависит от конкретного типа используемого катализатора. Поддержание температуры в заданных пределах обеспечивает высокую активность катализатора и предотвращает его преждевременное разрушение. Помимо этого, состав газовой смеси играет важную роль, так как наличие кислорода в необходимом количестве является ключевым условием для эффективного протекания окислительных реакций. Недостаток кислорода снижает полноту сжигания, а избыток может привести к перегреву и повреждению оборудования [1].

Скорость потока газа также имеет большое значение для равномерного распределения газовой смеси и предотвращения локального перегрева катализатора. Правильная скорость обеспечивает оптимальное время контакта газов с катализатором, что способствует полной реакции окисления. Давление в системе поддерживается на уровне от 0,1 до 0,5 МПа в зависимости от конструкции реактора и технологических требований. Стабильное давление необходимо для безопасного и эффективного функционирования оборудования. Кроме того, важным параметром является концентрация загрязняющих веществ в газовой смеси [3]. Для эффективного каталитического сжигания содержание летучих органических соединений должно находиться в диапазоне 1–10 г/м³, что позволяет оценивать эффективность очистки и корректировать режимы работы.

Для контроля и управления технологическими параметрами применяются современные приборы и системы. Газоанализаторы используются для измерения концентраций угарного газа (CO), углекислого газа (CO₂), кислорода (O₂) и оксидов азота (NO_x) в выбросах, что позволяет оперативно оценивать полноту сжигания и уровень загрязнений [4]. Температурные датчики размещаются в ключевых зонах реактора и фиксируют температуру, передавая данные в систему управления для поддержания оптимального теплового режима. Программируемые логические контроллеры (ПЛК) обеспечивают автоматизацию регулирования подачи воздуха и газа, а также управление процессом горения, поддерживая заданные параметры и обеспечивая безопасность. Кроме того, системы визуального мониторинга позволяют контролировать состояние катализатора и равномерность распределения

газового потока, что важно для своевременного обслуживания и предупреждения сбоев [1].

Эффективный контроль технологических параметров способствует минимизации образования вредных соединений, снижению расхода топлива и увеличению срока службы катализатора. Использование автоматизированных систем управления обеспечивает непрерывный мониторинг и динамическую корректировку работы установки, что значительно повышает её надежность и безопасность [5].

1.3 Устройство и принцип действия лабораторной трубчатой печи

Лабораторная трубчатая печь представляет собой специализированное оборудование, используемое для проведения термических и каталитических процессов в условиях высокой точности контроля температуры и других параметров. Основной рабочей частью печи является цилиндрическая трубка, изготовленная из материалов с высокой термостойкостью, в которой происходит нагрев исследуемых веществ или газовых смесей.

Нагрев происходит с помощью нагревательных элементов, окружающих трубчатую камеру, что обеспечивает равномерное распределение температуры по всей длине рабочей зоны. Управление температурным режимом осуществляется при помощи цифрового ПИД-регулятора, который поддерживает заданные параметры с высокой точностью. Для контроля температуры используются термопары, расположенные в различных зонах печи.

Газовая смесь подается внутрь трубки, где происходит каталитическое сжигание под воздействием высоких температур и катализатора. Конструкция печи обеспечивает стабильные условия протекания процесса, позволяя точно контролировать такие параметры, как температура, давление, скорость потока газа и время контакта реагентов.

Важным элементом является система охлаждения печи, которая выполнена по пассивному типу с использованием термоизоляции, что обеспечивает безопасность эксплуатации и стабильность температурного режима.

Основные технические характеристики лабораторной трубчатой печи представлены в таблице 1.1. В ней указаны модель печи, диапазон рабочих температур, максимальная температура, размеры рабочей зоны, материал нагревательных элементов, мощность, параметры электропитания, а также тип используемого регулятора температуры и особенности системы охлаждения.

Таблица 1.1 – Технические характеристики лабораторной трубчатой печи

Характеристика	Значение
Модель	Carbolite HST 12/400
Максимальная температура, °C	1200

Продолжение таблицы 1.1

Диапазон рабочих температур, °С	300-1100
Равномерность температуры в камере, °С	±5
Диаметр рабочей зоны, мм	40-50
Длина нагреваемой зоны, мм	400
Материал нагревательных элементов	Fe-Cr-Al сплав
Мощность, кВт	2.5
Напряжение питания, В	220/380
Тип терморегулятора	Цифровой ПИД-регулятор
Система охлаждения	Пассионное охлаждение с термоизоляцией
Применение	Каталитические процессы, синтез и термообработка

1.4 Постановка задачи автоматизации

Автоматизированная система управления процессом каталитического сжигания газов предназначена для обеспечения точного регулирования подачи газов, управления температурными режимами и контроля давления, что является ключевым для стабильной и эффективной работы установки. Основные требования к системе включают точное дозирование реагентов для формирования газовой смеси, поддержание температурных режимов с возможностью программируемого нагрева, контроль давления с функцией аварийного отключения, а также визуализацию и управление процессом через SCADA-систему. Важной составляющей является реализация аварийной защиты с помощью программируемого логического контроллера (ПЛК), которая обеспечивает безопасность эксплуатации.

Целью автоматизации является обеспечение стабильной, эффективной и безопасной работы технологического процесса с минимальными отклонениями параметров от заданных значений. Автоматизация также направлена на повышение экологической безопасности, снижение расхода топлива и увеличение срока службы оборудования.

В рамках данной работы сформулированы следующие основные задачи автоматизации:

Задача 1. На основе анализа технологического процесса и разработанной математической модели системы управления необходимо синтезировать оптимальный регулятор, который обеспечит стабильность, быстродействие, минимальное перерегулирование и отсутствие статической ошибки. Такой регулятор должен гарантировать надежное поддержание параметров процесса —

температуры, давления и расхода газовой смеси — в заданных пределах при воздействии внешних возмущений и изменениях технологических условий.

Задача 2. Разработать алгоритм программного управления процессом каталитического сжигания газов, реализуемый в среде программирования контроллера (например, Owen Logic или аналогичной). Алгоритм должен обеспечивать автоматическую работу установки, адаптацию к изменениям технологических параметров, а также своевременное реагирование на аварийные ситуации, включая функции мониторинга, диагностики и информирования оператора.

Задача 3. Создать интуитивно понятный интерфейс для оператора, который позволит эффективно осуществлять мониторинг и управление процессом в режиме реального времени, а также вести регистрацию, хранение и анализ технологических параметров. Это позволит повысить эффективность эксплуатации и оперативно принимать необходимые решения.

Реализация поставленных задач обеспечит повышение качества и надежности технологического процесса, снижение энергозатрат и расхода сырья, а также оптимизацию работы оборудования и повышение уровня безопасности эксплуатации.

2 Разработка структурной схемы системы автоматического управления

2.1 Определение точек контроля, регулирования и сигнализации технологического процесса

Для обеспечения стабильного и безопасного протекания процесса каталитического сжигания газов необходимо грамотно организовать систему контроля и регулирования основных технологических параметров. Ключевыми параметрами, требующими постоянного контроля и оперативного регулирования, являются температура, давление, расход газов и аварийные сигналы.

Температура контролируется в реакторе, на входе и выходе газовой смеси, а также в зоне предварительного нагрева. Поддержание оптимального температурного режима критично для эффективности реакции и долговечности катализатора.

Давление мониторится в подающих газовых линиях и на выходе из реактора для предотвращения аварийных ситуаций и поддержания технологических условий.

Расход газов регулируется и контролируется для обеспечения правильного состава газовой смеси и стабильности процесса каталитического сжигания.

Аварийные сигналы включают критические отклонения температуры и давления, а также неисправности в системе нагрева и подачи газа, которые требуют немедленного реагирования.

Система регулирования реализуется посредством следующих точек контроля:

- термопары Pt100 (6 шт.), размещённые в реакторе, на наружных стенках оборудования и в предварительном нагревателе для точного измерения температуры;

- датчики давления (2 шт.), установленные на входе подачи газа и на выходе реактора для контроля давления до и после процесса сжигания;

- массовые расходомеры-регуляторы газа (MFC, 4 шт.), обеспечивающие точное измерение и автоматическую регулировку подачи каждого газа, поддерживая необходимый состав смеси;

- программируемый логический контроллер (ПЛК), осуществляющий сбор и анализ данных с датчиков, управление исполнительными механизмами и контроль аварийной сигнализации.

Система аварийной сигнализации срабатывает при:

- превышении максимально допустимого давления;
- выходе температуры за предельные допустимые значения;
- отказах и сбоях в системе нагрева и подачи газа.

Таким образом, разработанная система точек контроля и регулирования обеспечивает поддержание технологических параметров в заданных пределах, своевременное обнаружение отклонений и аварий, а также оперативное

вмешательство для предотвращения аварийных ситуаций и обеспечения надёжной работы установки каталитического сжигания газов.

2.2 Определение структуры АСУ ТП

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) каталитического сжигания газов построена по многоуровневой иерархической структуре, обеспечивающей эффективный обмен данными, контроль и управление процессом на всех этапах (см. рисунок 2).

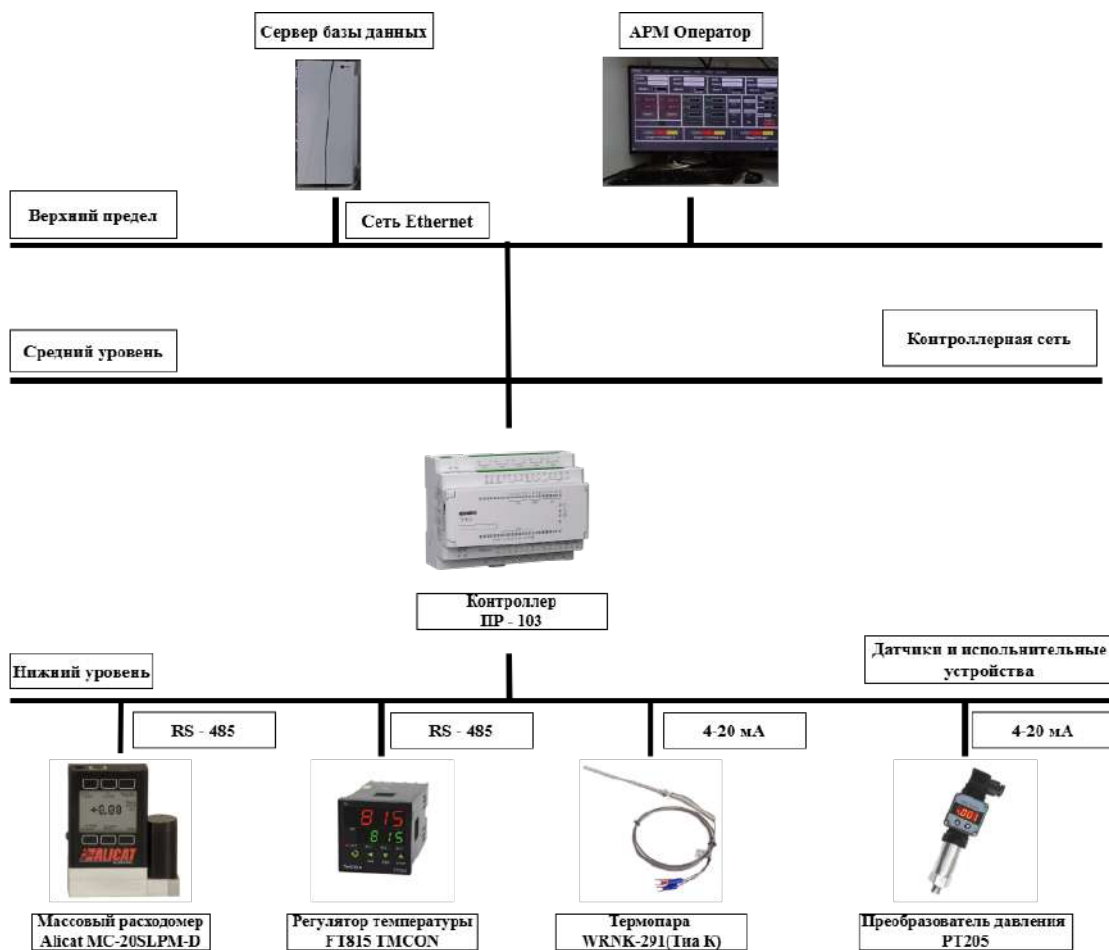


Рисунок 2.1 – Структура АСУ каталитического сжигания газов

Верхний уровень системы представляет собой сервер базы данных и рабочее место оператора (АРМ). Сервер базы данных отвечает за хранение, обработку и архивирование данных технологического процесса. Через сеть Ethernet АРМ оператора получает возможность визуализации текущего состояния установки, управления процессом и анализа технологических параметров в реальном времени.

Средний уровень включает в себя контроллер ПР-103, который является центральным устройством управления процессом. Контроллер получает данные с нижнего уровня, обрабатывает их согласно заложенным алгоритмам и передает

команды исполнительным механизмам. Этот уровень обеспечивает реализацию основных функций автоматизации и оперативного управления.

Нижний уровень состоит из датчиков и исполнительных устройств, которые напрямую взаимодействуют с технологическим процессом. На этом уровне установлены следующие приборы: массовый расходомер Alicat MC-20SLPM-D, подключенный через интерфейс RS-485, обеспечивающий точное измерение расхода газа; регулятор температуры FT815 TMCON, также подключенный по RS-485, контролирующий и регулирующий температурный режим; термопара WRNK-291 (тип K), передающая сигнал 4–20 мА для измерения температуры в реакторе; преобразователь давления PT205 с выходом 4–20 мА, обеспечивающий измерение давления в газовой линии.

Связь между нижним уровнем и контроллером осуществляется по промышленной интерфейсной шине RS-485 и аналоговым сигналам 4–20 мА, что обеспечивает надежную и устойчивую передачу данных [2].

Данная структурная схема позволяет осуществлять комплексный контроль и управление технологическим процессом каталитического сжигания газов, обеспечивая высокую точность регулирования, безопасность эксплуатации и эффективный мониторинг работы установки (см. приложение Б — структурная схема автоматизации).

3 Расчетная часть

3.1 Разработка матмодели САР

Для эффективного управления процессом каталитического сжигания газа в лабораторной установке ключевым этапом является построение адекватной математической модели контура автоматического регулирования. Такая модель формализует динамические свойства объекта — подачи газовой смеси и поддержания температурного режима в трубчатой печи — и служит основой для анализа устойчивости, оценки переходных характеристик и синтеза регуляторов.

В нашей работе модель была идентифицирована на основе экспериментальных данных о зависимости расхода газа от изменения температуры в реакторе с использованием System Identification Toolbox в MATLAB [6]. В результате получена непрерывная передаточная функция, адекватно описывающая реальное поведение контура. Эта передаточная функция легла в основу последующего проектирования регуляторов трёх типов (P, PI и PID) с целью достижения требуемого баланса между быстродействием, устойчивостью и точностью управления.

Параметры каждого регулятора определялись методом итерационного подбора в среде MATLAB/Simulink, при котором последовательно изменялись коэффициенты пропорционального, интегрального и дифференциального звеньев для оптимизации переходного процесса по критериям времени установления, перерегулирования и статической ошибки [7]. Такой подход позволяет гибко адаптировать настройки под реальные условия и гарантирует системный характер настройки автоматизированного управления.

Таким образом, создание математической модели и её последующая итеративная настройка регуляторов являются краеугольным камнем разработки надёжной и эффективной системы управления процессом.

3.2 Математическая модель САР каталитической печи сжигания газа

Для управления процессом сжигания газа в установке была разработана математическая модель системы автоматического регулирования расхода газа и температуры печи. В качестве первого шага будет построена функциональная схема (рисунок 3.1), которая станет основой для синтеза регуляторов. На схеме отображены основные элементы системы: регулятор, исполнительный механизм, регулируемый орган, объект управления и датчик обратной связи [8].

В таблице 3.1 представлены исходные данные, которые включают входные и выходные параметры процесса каталитического сжигания газов. В качестве входного параметра рассматривается температура, измеряемая в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), а в качестве выходного — расход газа, выраженный в кубических метрах в секунду ($\text{м}^3/\text{с}$).

Температурный диапазон охватывает значения от 10°C до 200°C , что позволяет проанализировать поведение системы в широком спектре рабочих

условий. Соответственно, расход газа варьируется от 1 до 20 м³/с, отражая изменение объема сжигаемого топлива в зависимости от температуры.

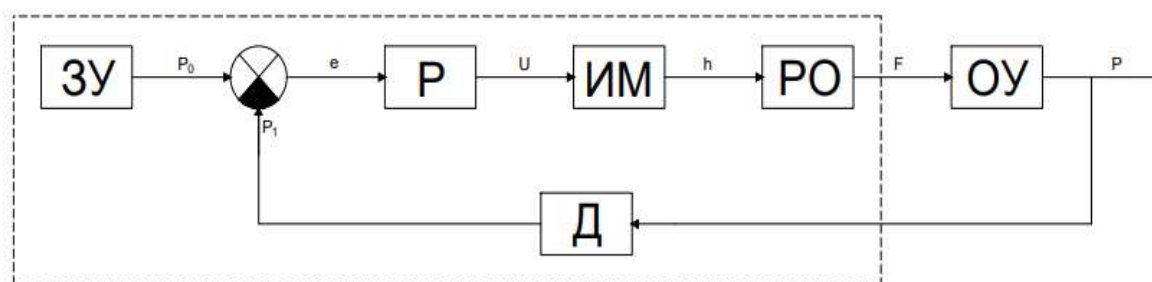


Рисунок 3.1 – Функциональная схема контура регулирования температуры в печи установки

Данные, приведенные в таблице 3.1, являются основой для моделирования и оптимизации процесса сжигания, так как позволяют установить зависимости между температурой и расходом газа, что важно для достижения эффективного и экологически безопасного каталитического процесса. Эти параметры учитываются при настройке автоматизированных систем управления и контроля технологического процесса [8].

Таблица 3.1 - Исходные данные

№	Температура (°C)	Расход газа (м ³ /с)	Давление (Па)	Уставка Температуры	Уставка Расхода	Уставка Давления
1.	10	1	13	200	20	13
2.	20	2	13.1	200	20	13
3.	30	3	13	200	20	13
4.	40	4	13.1	200	20	13
5.	50	5	13.1	200	20	13
6.	60	6	13.1	200	20	13
7.	70	7	12.9	200	20	13
8.	80	8	13	200	20	13
9.	90	9	12.9	200	20	13
10.	100	10	13	200	20	13
11.	110	12	13	200	20	13
12.	120	12	13	200	20	13
13.	130	13	13	200	20	13
14.	140	14	12.9	200	20	13
15.	150	15	12.9	200	20	13
16.	160	15	13	200	20	13
17.	170	17	13	200	20	13

Продолжение таблицы 3.1

18.	180	18	13.1	200	20	13
19.	190	20	13	200	20	13
20.	200	20	13.1	200	20	13

Используя пакет System Identification Toolbox в системе MATLAB, мы провели построение математической модели системы автоматической подачи газа при повышении температуры. В качестве исходных данных были использованы: входной параметр — температура печи, и выходной параметр — расход газа в системе. Построение модели осуществлялось на основе экспериментальных данных, что позволило отразить реальные динамические свойства объекта управления.

В процессе идентификации была получена математическая модель в виде передаточной функции, которая адекватно описывает поведение системы. Такая модель имеет широкие возможности применения: её можно использовать как для анализа существующих процессов, так и для синтеза систем автоматического регулирования. На рисунке 3.2 представлена общая структура процесса моделирования в среде MATLAB System Identification, включая визуализацию как модели, так и её адекватности [9].

На рисунке 3.3 более подробно отображена информация о структуре полученной модели tf1. Здесь указано, что передаточная функция описывает связь от входа u1 к выходу y1, и её аналитическое представление приведено непосредственно на изображении. Видно, что модель имеет два полюса и один ноль. Тип модели — непрерывная, идентифицированная по экспериментальным данным.

На рисунке 3.3 показано сравнение выходного сигнала, полученного с помощью модели tf1, с измеренными данными. Черная линия соответствует реальным экспериментальным значениям, а синяя линия — выходу модели. Как видно из графика, совпадение между данными практически полное, что подтверждается высоким процентом совпадения — 97.89%, указанным справа. Это свидетельствует о высокой точности и достоверности модели.

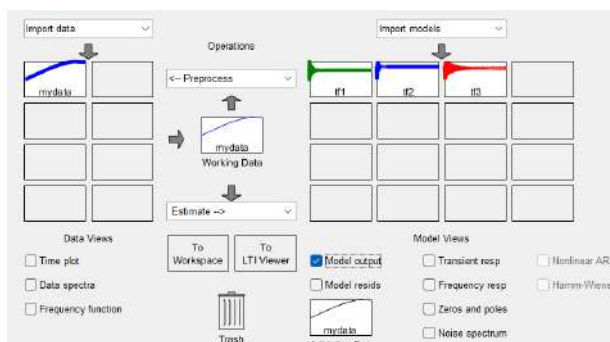
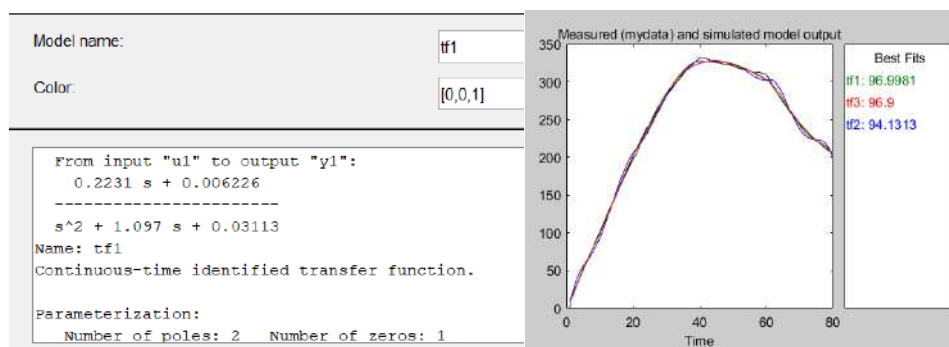


Рисунок 3.2 – Моделирование в Matlab system Identification



Рисунке 3.3 - Математическая модель и процент адекватности моделей, выведенные с помощью Matlab System Identification

3.3 Анализ динамических свойств разомкнутой и замкнутой САР

Согласно рисунку 3.3 математическая модель САР печи сжигание газа фильтра имеет вид разомкнутой системы 2-го порядка:

$$G(s) = \frac{0.2231s + 0.006226}{s^2 + 1.097s + 0.03113}. \quad (3.1)$$

Отсюда передаточная функция замкнутой системы имеет следующий вид

$$T(s) = \frac{0.2231s + 0.006226}{s^2 + 1.32s + 0.03736}. \quad (3.2)$$

После моделирования разомкнутой и замкнутой системы автоматического регулирования для печи установки (рисунок 3.5), были получены графики невозмущенного движения (рисунок 3.6). Эти графики позволяют сделать выводы о устойчивости работы системы.

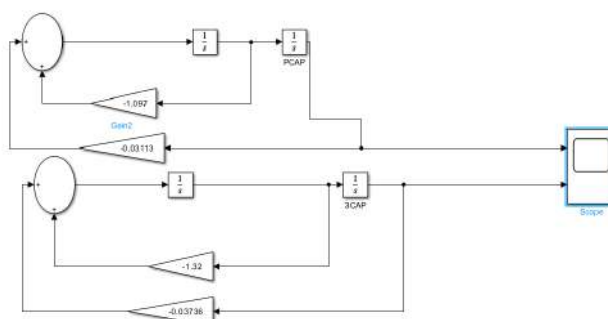


Рисунок 3.4 – Схема моделирования невозмущенного движения РСАР и ЗСАР

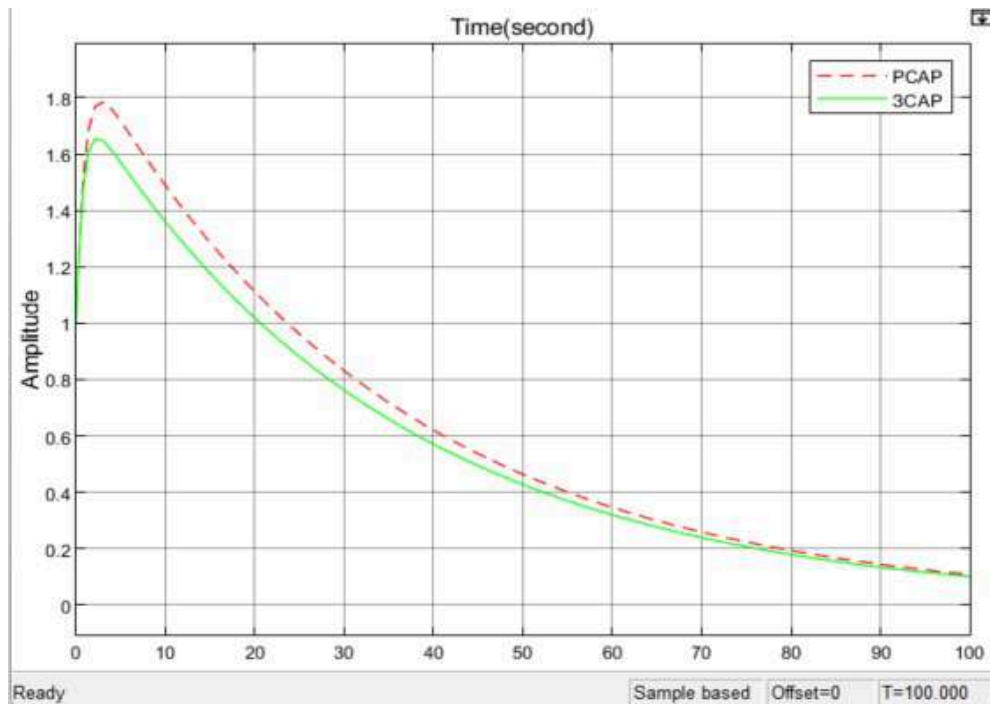


Рисунок 3.5 – График невозмущенного движения РСАР и ЗСАР при ненулевых начальных условиях

Согласно данным рисунка 3.6 можно сделать вывод, что как разомкнутая, так и замкнутая системы демонстрируют монотонное сходящееся поведение, то есть при ненулевых начальных условиях невозмущенное движение стремится к нулю. Это подтверждает устойчивость как разомкнутой, так и замкнутой системы автоматического регулирования.

Устойчивость невозмущенного движения в большинстве зависит от полюсов системы. В связи с этим, для анализа устойчивости разомкнутой системы применим первый метод Ляпунова[10].

Алгоритм решения:

Шаг 1. Составим характеристическое уравнение для разомкнутой системы автоматического регулирования. На основе уравнения характеристическое уравнение будет иметь следующую форму:

$$s^2 + 1.097s + 0.03113 = 0, n = 2. \quad (3.3)$$

Шаг 2. Найдем корни характеристического уравнения, решив квадратное уравнение с использованием метода вычисления дискриминанта.

$$D = b^2 - 4ac = 1.097^2 - 4 * 1 * 0.03113 = 1.078,$$

$$s_1 = \frac{-1.097 + \sqrt{1.078}}{2} = -0.02915,$$

$$s_2 = \frac{-1.097 + \sqrt{1.078}}{2} = -1.06785.$$

Проверим полученные результаты через команду pole (рисунок 3.7).

```
>> num = [0.2231 0.006226];
den = [1 1.097 0.03113];

zeros_G = roots(num);
poles_G = roots(den);

disp('Нули системы:');
disp(zeros_G);

disp('Полюсы системы:');
disp(poles_G);
Нули системы:
    -0.0279

Полюсы системы:
    -1.0678
    -0.0292
```

Рисунок 3.6 - Нахождение полюсов разомкнутой САР

Изобразили полученные полюса на комплексной плоскости с помощью команду pzmap в MatLAB (рисунок 3.7).

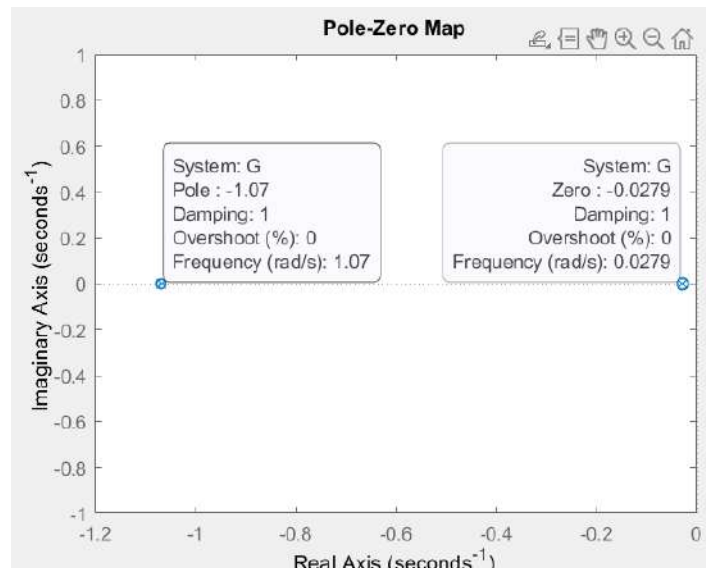


Рисунок 3.7 - Полюса РСАР на комплексной плоскости

Полюса разомкнутой системы автоматического регулирования имеют отрицательные действительные части, что, согласно первому методу Ляпунова, подтверждает её устойчивость.

Точно так же, для проверки устойчивости замкнутой системы применим первый метод Ляпунова.

Алгоритм решения:

Шаг 1. Определим характеристическое уравнение замкнутой САР. Исходя из уравнения, запись характеристического уравнения имеет вид

$$s^2 + 1.32s + 0.03736 = 0, n = 2. \quad (3.4)$$

Шаг 2. Вычислим корни характеристического уравнения.

$$D = b^2 - 4ac = 1.32^2 - 4 * 1 * 0.03736 = 1.5929,$$

$$s_1 = \frac{-1.32 + \sqrt{1.5929}}{2} = -0.02895,$$

$$s_2 = \frac{-0.01109 - \sqrt{1.5929}}{2} = -1.29105.$$

Шаг 3. Сравним результаты с командой pole (рисунок 3.8).

```
>> den = [1 1.32 0.03736];  
poles_T = roots(den);  
disp(' полюсы:');  
disp(poles_T);  
полюсы:  
-1.2911  
-0.0289
```

Рисунок 3.8 - Нахождение полюсов замкнутой САР

Шаг 4. Изобразим полученные полюса на комплексной плоскости через команду pzmap в MatLAB (рисунок 3.9).

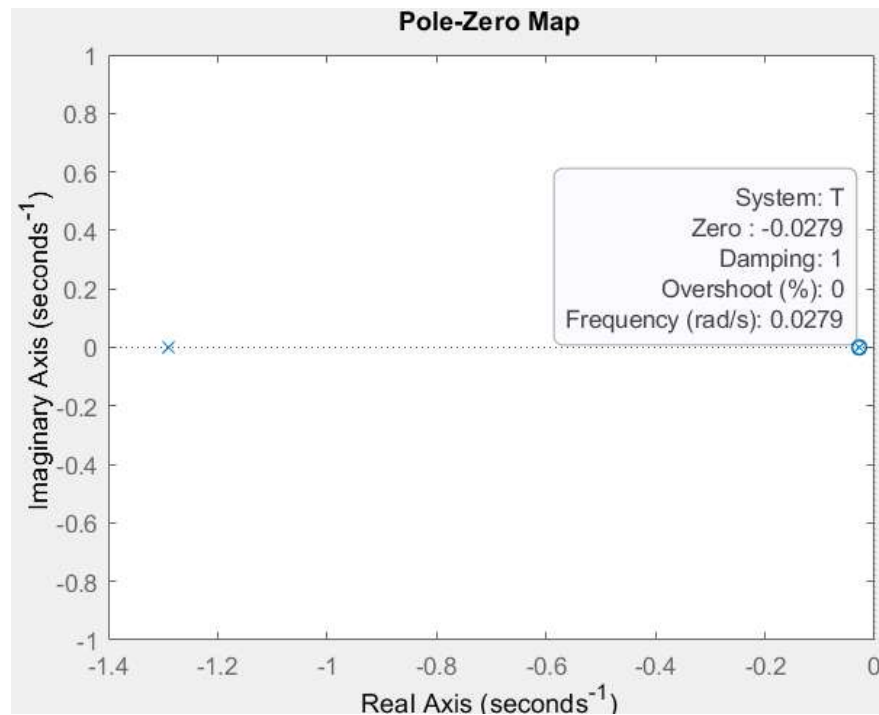


Рисунок 3.9 - Полюса ЗСАР на комплексной плоскости

Корни характеристического уравнения замкнутой системы имеют отрицательные действительные части, что, согласно теореме Ляпунова, подтверждает её устойчивость [10].

Следующим этапом анализа системы автоматического регулирования подачи газа в реактор печи является определение оценок качества замкнутой системы. Оценки качества подразделяются на прямые — по переходному процессу, и косвенные — по расположению полюсов системы. Анализ качества замкнутой системы управления каталитической печью проведён на основе переходного процесса, представленном на рисунке 3.10, а полученные прямые и косвенные оценки качества сведены в таблицу 3.2.

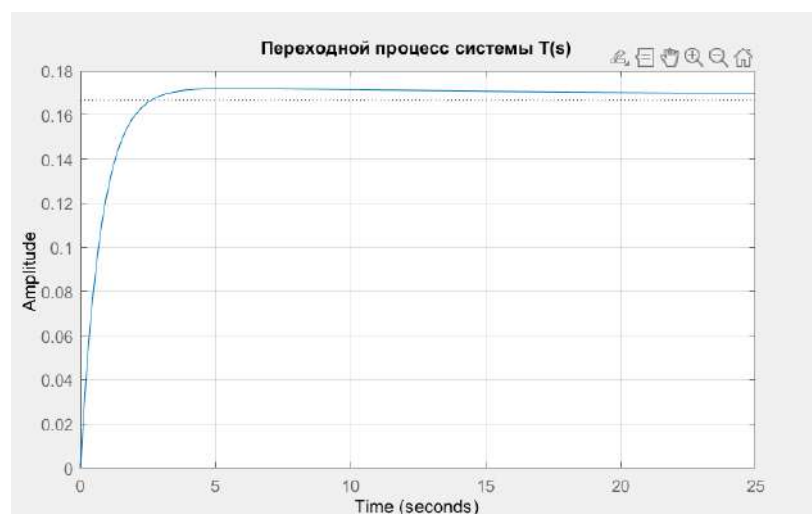


Рисунок 3.10 – Переходной процесс ЗСАР

Таблица 3.2 – Прямые и косвенные оценки качества системы без регулятора

№	Оценки качества	Обозначение	По переходному процессу
1	Время регулирования	T_{set}	8с
2	Перерегулирование	P_{ov}	1.2%
3	Число колебаний	M	1
4	Колебательность	μ	-
5	Период колебаний	T	-
6	Установившаяся ошибка	e_{ss}	83%
7	Время достижения первого максимума	T_P	4 с
8	Время нарастания	T_R	1.5 с
9	Декремент затухания	χ	-

Оценку качества системы по корням характеристического уравнения проведем, используя расположение полюсов на комплексной плоскости, представленное на рисунке 3.9.

Корневые оценки качества:

а) Характеристика №1

$$T_{set} = \frac{4}{|\sigma_{min}|} = 8с. \quad (3.5)$$

где σ_{min} – минимальный полюс с действительным значением

Согласно данным на рисунке 3.9, полюсом с наименьшим действительным значением является число -0.0279

б) Характеристика №2. Степень устойчивости

$$\eta = |\sigma_{min}| = 0.5. \quad (3.6)$$

Запасы устойчивости по амплитуде и фазе определим с помощью графиков ЛАЧХ и ЛФЧХ, представленных на рисунке 3.11.

Запасы устойчивости по амплитуде и фазе для исследуемой системы с PID-регулятором оказываются весьма высокими, что подтверждается анализом графиков ЛАЧХ и ЛФЧХ. Амплитудно-частотная характеристика демонстрирует плавное снижение без выраженных резонансных пиков, что свидетельствует о хорошей устойчивости системы к колебаниям. Фазовая характеристика характеризуется плавностью и отсутствием резких скачков, что говорит о значительном запасе фазы в диапазоне рабочих частот.

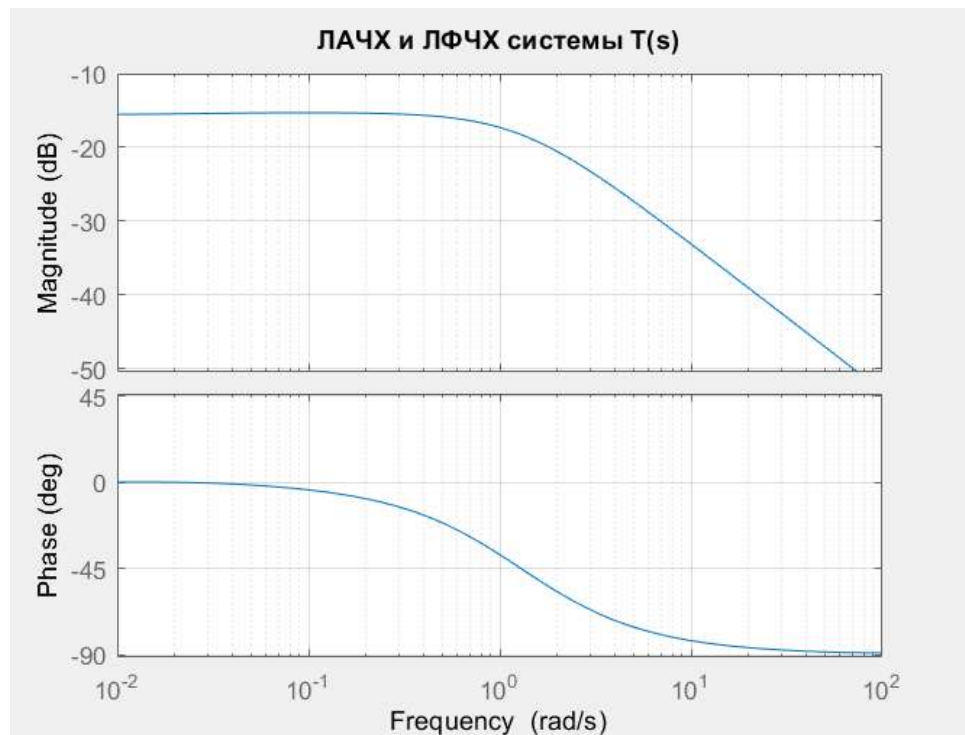


Рисунок 3.11 - Запасы устойчивости по амплитуде и фазе разомкнутой системы без регулятора

Рассмотрение переходного процесса для замкнутой системы без регулятора показывает, что она является устойчивой, однако обладает крайне неудовлетворительными динамическими и статическими параметрами. Время регулирования составляет 8 секунд, что указывает на низкое быстродействие и медленный переход к установившемуся состоянию. Перерегулирование на уровне 1.2% является незначительным, что свидетельствует об отсутствии склонности системы к сильным колебаниям.

Количество колебаний равно одному, что подтверждает апериодический характер затухания. Коэффициент колебательности не задан, так как в процессе отсутствуют ярко выраженные осцилляции.

Период колебаний отсутствует, что еще раз подчеркивает не колебательный характер процесса. Установившаяся ошибка составляет 0.83 (83%), что демонстрирует огромное, критическое расхождение между заданным сигналом и выходным значением. Такая точность является абсолютно неприемлемой для большинства практических задач.

Время достижения первого максимума равно 4 секундам, а время нарастания составляет 1.5 секунды. Эти параметры, в совокупности с долгим временем регулирования, подтверждают низкое быстродействие системы.

Декремент затухания не указан, поскольку для его расчета необходима серия затухающих колебаний, отсутствующая в данном процессе.

Таким образом, несмотря на формальную устойчивость и низкую колебательность, система без регулятора обладает двумя критическими недостатками: огромной установившейся ошибкой и низким быстродействием.

Это доказывает абсолютную необходимость введения в контур управления регулятора для достижения требуемых показателей качества.

3.4 Синтез регуляторов с заданными показателями качества переходного процесса

Для эффективного управления процессом сжигания газа в каталитической печи необходимо разработать и сравнить три основных типа регуляторов: пропорциональный (P), пропорционально-интегральный (PI) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (PID). Основная задача синтеза — обеспечить высокие показатели качества регулирования, такие как быстродействие, точность и устойчивость системы.

В качестве подхода к настройке регуляторов был выбран метод итерационного подбора коэффициентов непосредственно в среде моделирования MATLAB/Simulink. Этот практический метод предполагает последовательную настройку параметров для каждого типа регулятора с постоянным контролем переходного процесса.

Целью такой настройки является нахождение оптимального набора коэффициентов, который обеспечивает наилучший компромисс между ключевыми показателями качества: минимальным временем регулирования, отсутствием установившейся ошибки и допустимым перерегулированием.

В результате итерационной настройки были определены оптимальные параметры для каждого из трех типов регуляторов. Полученные значения, которые будут использованы для дальнейшего моделирования и анализа, сведены в таблицу 3.4:

Таблица 3.3 – Расчет значений PID-регулятора

Регулятор	K_p	K_I	K_D
P-регулятор	$0.5K_p$	-	-
PI-регулятор	$0.45K_p$	$0.5K_p/T$	-
PID-регулятор	$0.6K_p$	$1.2K_p/T$	$0.075K_pT$

Для определения оптимальных коэффициентов регуляторов был использован метод итерационной настройки в среде моделирования MATLAB/Simulink. Этот подход заключается в последовательном подборе параметров для каждого типа регулятора с целью достижения наилучших показателей качества переходного процесса, таких как минимальное время регулирования и отсутствие установившейся ошибки.

Найденные в результате такой настройки оптимальные значения параметров для P, PI и PID-регуляторов приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.4 – Значения параметров Р, PI и PID-регуляторов

Регулятор	K_p	K_I	K_D
Р-регулятор	10	-	-
PI-регулятор	35	25.1	-
PID-регулятор	20	51.4	8.5

Используя полученные в результате настройки параметры, промоделируем систему с Р, PI и PID-регуляторами.

Результаты моделирования системы с Р-регулятором представлены на рисунке 3.12.

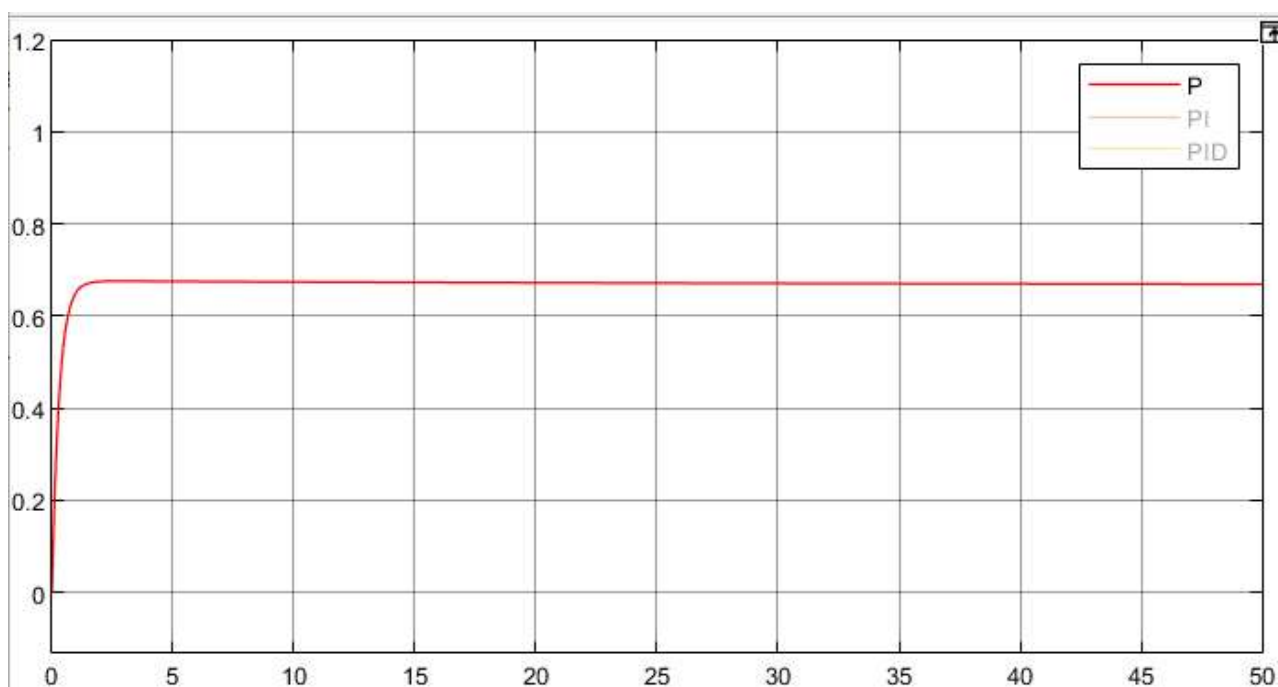


Рисунок 3.12 – Переходной процесс системы с Р-регулятором

Согласно рисунку 3.13 степень устойчивости системы с Р-регулятором равна 34.5.

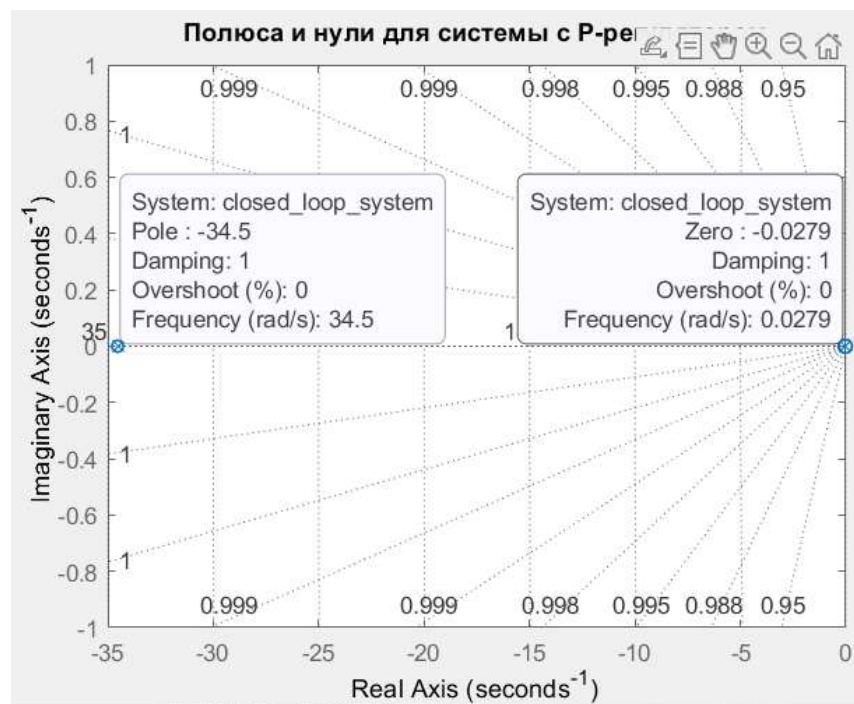


Рисунок 3.13 - Полюса системы с Р-регулятором на комплексной плоскости

В таблице 3.5 представлены прямые и косвенные оценки качества переходного процесса с использованием Р регулятора.

Таблица 3.5 – Прямые и косвенные оценки качества системы с Р-регулятором

№	Оценки качества	Обозначение	По переходному процессу
1	Время регулирования	T_{set}	1.5 с
2	Перерегулирование	P_{ov}	0%
3	Число колебаний	M	0
4	Колебательность	μ	-
5	Период колебаний	T	-
6	Установившаяся ошибка	e_{ss}	32%
7	Время достижения первого максимума	T_P	-
8	Время нарастания	T_R	0.4 с
9	Декремент затухания	χ	-

Введение в систему Р-регулятора позволило значительно улучшить ее динамические характеристики по сравнению с вариантом без регулятора. Время

регулирования сократилось до 1.5 секунд, а время нарастания составило всего 0.4 секунды, что говорит о высоком быстродействии. Кроме того, было полностью устранено перерегулирование (до 0%), что обеспечило аperiodический и максимально плавный характер отклика.

Тем не менее, несмотря на очевидные улучшения динамики, данный регулятор не смог решить главную задачу — обеспечить высокую точность управления. Установившаяся ошибка в системе составляет ~32%, что является неприемлемо большим значением для большинства технологических процессов. Причиной этого является отсутствие в Р-регуляторе интегральной составляющей, которая необходима для полной компенсации статической ошибки.

Перейдем к моделированию PI-регулятора и посмотрим, что изменится в системе с PI-регулятором.

Результаты моделирования системы с PI-регулятором представлены на рисунке 3.14.

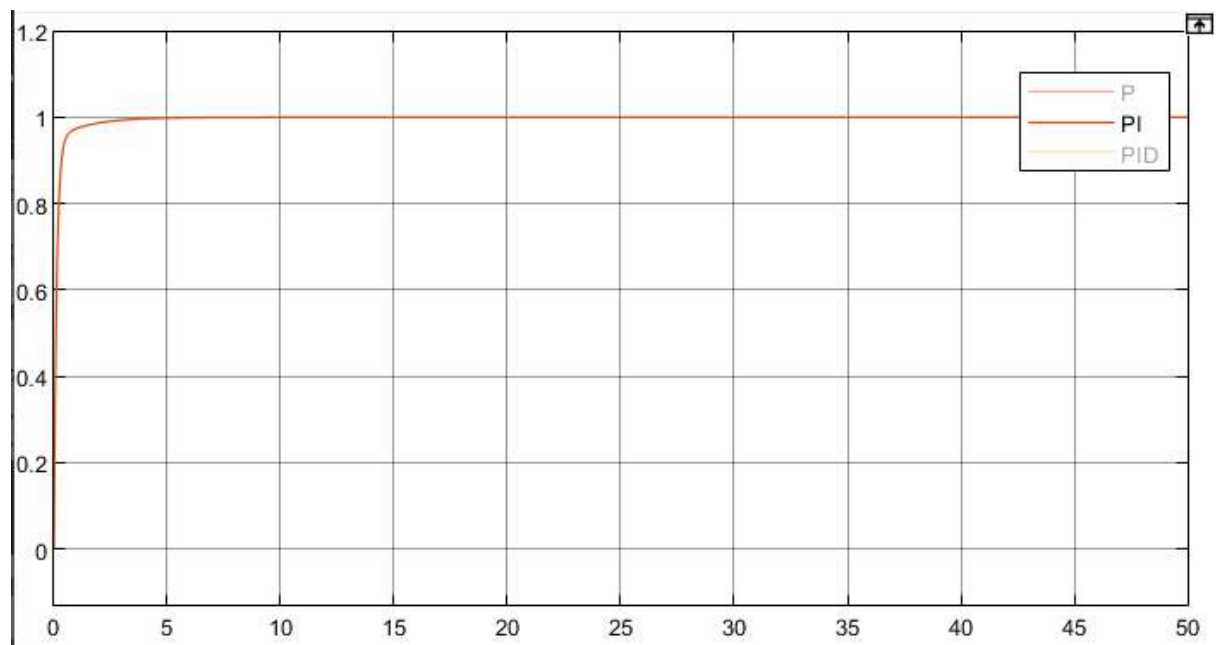


Рисунок 3.14 – Переходной процесс системы с PI-регулятором

Согласно рисунку 3.15 степень устойчивости системы с PI-регулятором равна 29.4.

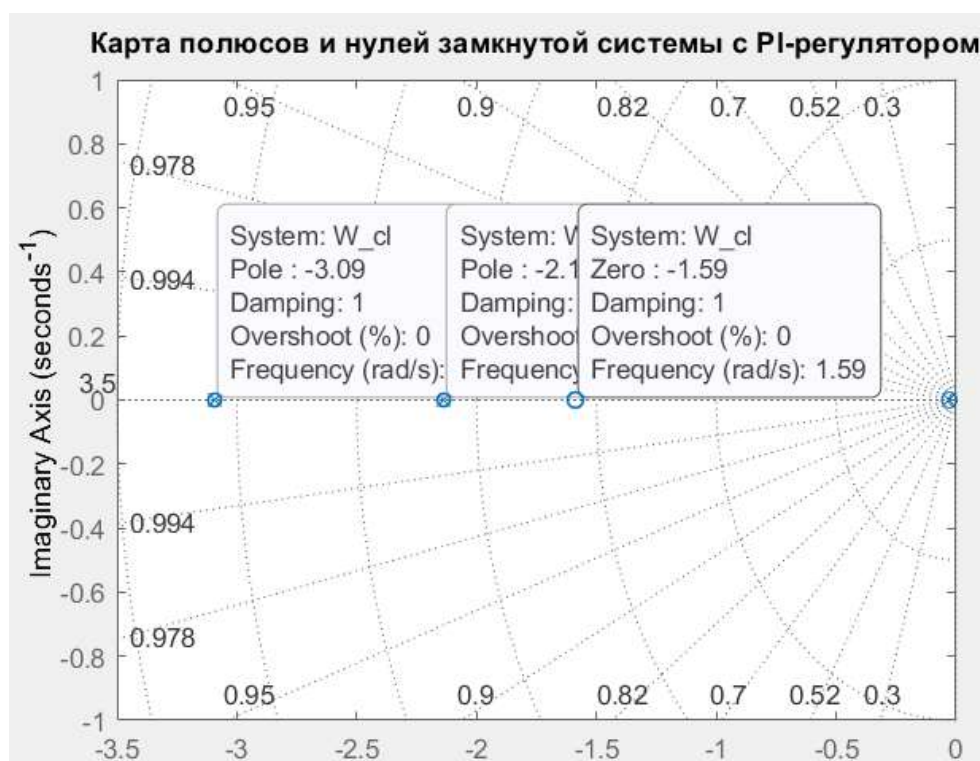


Рисунок 3.15 - Полюса системы с PI-регулятором на комплексной плоскости

В таблице 3.6 представлены прямые и косвенные оценки качества переходного процесса с использованием PI регулятора.

Таблица 3.6 – Прямые и косвенные оценки качества системы с PI-регулятором

№	Оценки качества	Обозначение	По переходному процессу
1	Время регулирования	T_{set}	0.3 с
2	Перерегулирование	P_{ov}	1.5%
3	Число колебаний	M	1
4	Колебательность	μ	-
5	Период колебаний	T	-
6	Установившаяся ошибка	e_{ss}	0
7	Время достижения первого максимума	T_p	0.15 с
8	Время нарастания	T_R	0.08 с
9	Декремент затухания	χ	-

Внедрение и настройка PI-регулятора позволили кардинально улучшить характеристики системы управления. Ключевым достижением стало полное устранение установившейся ошибки, что обеспечивает максимальную точность обработки заданного воздействия.

Система продемонстрировала чрезвычайно высокое быстродействие: время регулирования составило всего 0.3 секунды, а время нарастания — 0.08 секунды. При этом качество переходного процесса осталось на высоком уровне, с минимальным и быстро затухающим перерегулированием в 1.5%.

Промоделируем PID-регулятор и посмотрим, что изменится в системе с PID-регулятором.

Результаты моделирования системы с PID-регулятором представлены на рисунке 3.16.

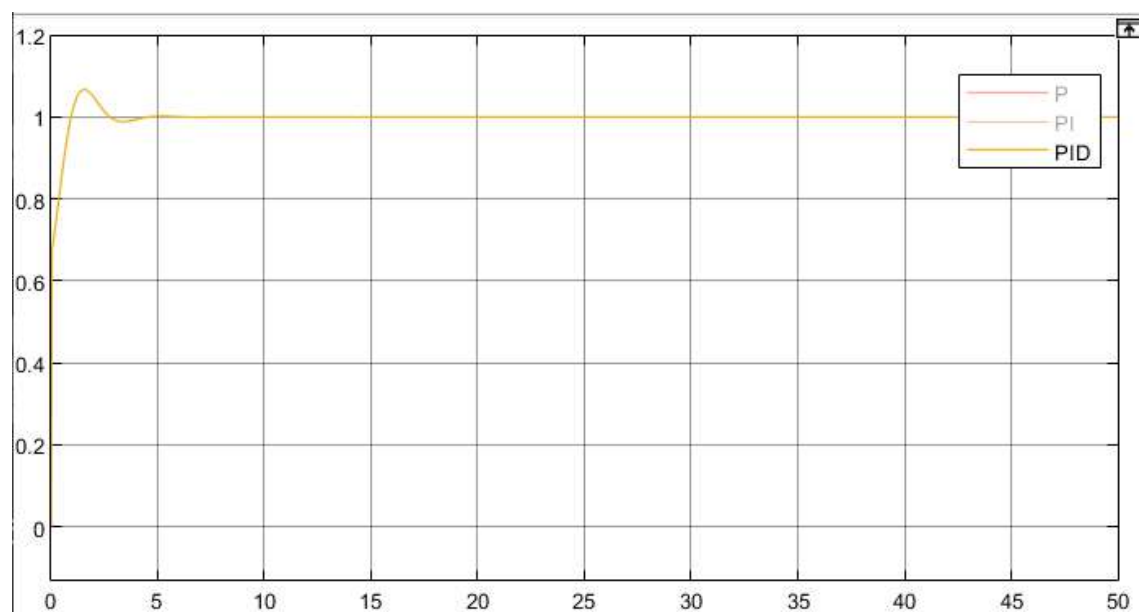


Рисунок 3.16 – Переходной процесс системы с PID-регулятором

Согласно рисунку 3.17 степень устойчивости системы с PID-регулятором равна 6.35.

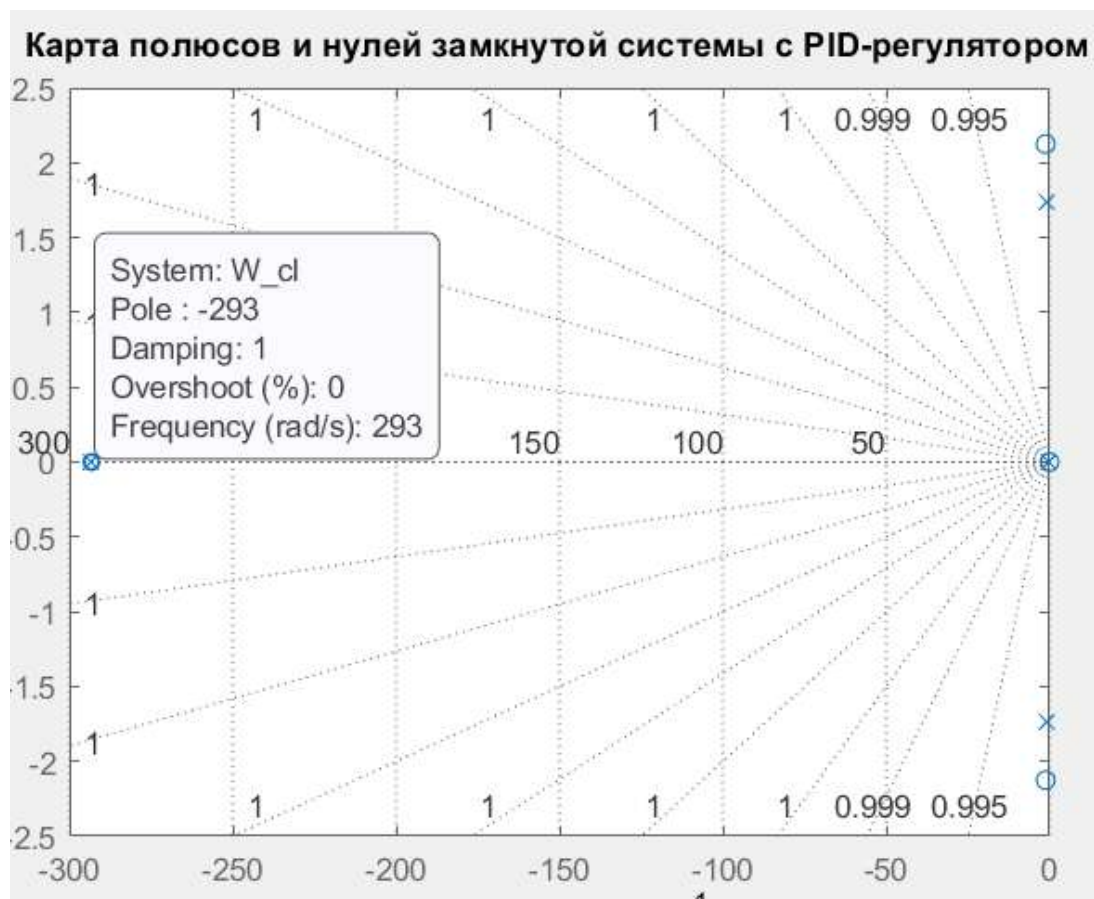


Рисунок 3.17 - Полюса системы с PID-регулятором на комплексной плоскости

В таблице 3.7 представлены прямые и косвенные оценки качества переходного процесса с использованием PID-регулятора.

Таблица 3.7 – Прямые и косвенные оценки качества системы с PID-регулятором

№	Оценки качества	Обозначение	По переходному процессу
1	Время регулирования	T_{set}	4 с
2	Перерегулирование	P_{ov}	4%
3	Число колебаний	M	1
4	Колебательность	μ	-
5	Период колебаний	T	2.6 с
6	Установившаяся ошибка	e_{ss}	0
7	Время достижения первого максимума	T_p	1.2 с
8	Время нарастания	T_R	0.5 с
9	Декремент затухания	χ	-

Применение PID-регулятора, как и PI-регулятора, позволило полностью устранить установившуюся ошибку, что подтверждает высокую точность системы. Система демонстрирует хорошее быстродействие, с временем нарастания ~0.5 секунды и временем достижения первого максимума ~1.2 секунды. Однако введение дифференциальной составляющей привело к появлению заметного перерегулирования на уровне ~4% и увеличило общее время регулирования до ~4.0 секунд из-за затухающих колебаний.

При сравнении с ранее рассмотренным PI-регулятором, становится очевидно, что PID-регулятор в данном случае не обеспечивает более оптимальный баланс. Хотя он также точен, его время регулирования оказалось существенно больше (4.0 с против 0.3 с у PI-регулятора), а перерегулирование — выше (4% против 1.5% у PI-регулятора). Это показывает, что для данного объекта управления дополнительное усложнение системы введением дифференциального звена нецелесообразно.

Таким образом, несмотря на свою функциональность, PID-регулятор с данными настройками не является наиболее подходящим решением для этой задачи. Более простой PI-регулятор продемонстрировал лучшие результаты, обеспечив и высокую точность, и превосходное быстродействие с минимальным перерегулированием, что делает его оптимальным выбором для автоматизации процесса.

В качестве альтернативы, рассмотрим применение функции Auto-tune в MATLAB, которая позволяет автоматически настроить параметры регулятора. Для этого используется метод настройки в графической среде Simulink, что упрощает процесс оптимизации и настройки регулятора. В следующем шаге будет создана модель системы с PID-регулятором в Simulink (см. рисунок 3.18).

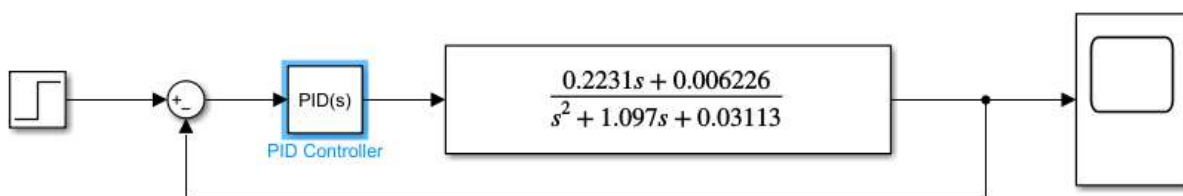


Рисунок 3.18 – Моделирование системы с PID-регулятором в Simulink

Затем в окне настройки параметров регулятора необходимо нажать кнопку «Tune», чтобы открыть инструмент «PID tuning tool» (рисунок 3.19).

PID 1dof (mask) (link)

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: PI Form: Parallel

Time domain:

☒ Continuous-time

☐ Discrete-time

Discrete-time settings

Sample time (-1 for inherited): -1

▼ Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s}$$

Main Initialization Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: Internal

Proportional (P): 35

Integral (I): 25.1 ☐ Use I*Ts (optimal for codegen)

Automated tuning

Select tuning method: Transfer Function Based (PID Tuner App) Tune...

☒ Enable zero-crossing detection

Рисунок 3.19 – Блок настройки параметров PID-регулятора

После нажатия кнопки «Tune» открылось окно, в котором отображается переходный процесс системы с PID-регулятором, сконфигурированным с помощью инструмента «PID Tuner» (рисунок 3.20).

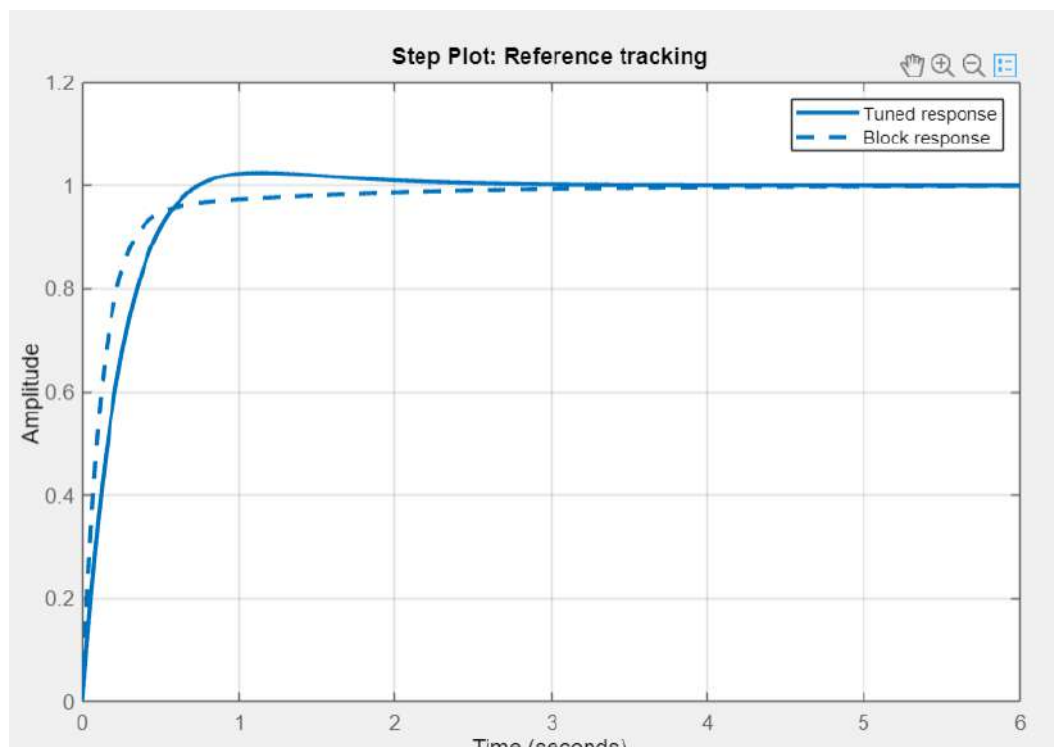


Рисунок 3.20 - Переходный процесс системы с PI-регулятором(Auto-tune)

Параметры регулятора (рисунок 3.21 и 3.22)

Controller Parameters			
	Tuned	Block	
P	18.8618	35	▲ ▼
I	27.0872	25.1	
D	n/a	n/a	
N	n/a	n/a	

Рисунок 3.21 – Параметры PID-регулятора

Performance and Robustness			
	Tuned	Block	
Rise time	0.443 seconds	0.325 seconds	▲ ▼
Settling time	1.48 seconds	1.39 seconds	
Overshoot	2.5 %	0 %	
Peak	1.02	0.998	
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s	Inf dB @ NaN rad/s	
Phase margin	85.5 deg @ 4.31 rad/s	92.6 deg @ 7.77 rad/s	
Closed-loop stability	Stable	Stable	

Рисунок 3.22 – PID-регулятора

Рассмотрим прямые оценки качества системы без регулятора и с PID-регулятором (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Прямые и косвенные оценки качества системы без регулятора и с PID-регулятором

№	Оценки качества	Система без регулятора	PID	Метод Auto-tune
1	T_{set}	8с	0.3 с	1.48 с
2	P_{ov}	1.5%	1.5%	2.5%
3	M	1	1	0
4	μ	-	-	-
5	T	-	0.2 с	-
6	e_{ss}	0.83	0	0
7	T_P	5.36 с	0.3 с	0.74
8	T_R	10 с	0.4 с	0.443 с
9	X	-	0.2	-

В рамках данной дипломной работы была решена задача разработки и исследования системы автоматического регулирования для процесса сжигания газа в каталитической печи. Основной целью являлось обеспечение высоких показателей качества управления, а именно — высокой точности, быстродействия и устойчивости системы. Для достижения этой цели была создана математическая модель объекта управления в среде MATLAB/Simulink, на основе которой был выполнен синтез и сравнительный анализ регуляторов различных типов.

На первом этапе был проведен анализ исходного объекта управления. Было установлено, что замкнутая система без внешнего регулятора, несмотря на свою формальную устойчивость, обладает абсолютно неудовлетворительными практическими характеристиками. Ключевым недостатком являлась огромная установившаяся ошибка, достигающая 83%, что делало невозможным поддержание заданных технологических параметров. Данный анализ однозначно доказал необходимость введения в контур управления корректирующего устройства.

На втором этапе был выполнен синтез и сравнительный анализ регуляторов трех классических типов: пропорционального (P), пропорционально-интегрального (PI) и пропорционально-интегрально-дифференциального (PID). Применение P-регулятора позволило значительно улучшить динамические показатели, но не решило проблему точности. Анализ PID-регулятора, в свою очередь, показал, что дальнейшее усложнение системы путем введения дифференциальной составляющей нецелесообразно, так как не приводит к улучшению итоговых показателей качества.

Наилучшие результаты были достигнуты при использовании PI-регулятора. После итерационного подбора параметров с использованием инструмента автоматической настройки PID Tuner было найдено оптимальное решение.

Подводя итог проделанной работе, можно заключить, что цель расчетов была полностью достигнута. Разработанная математическая модель доказала свою адекватность, а на ее основе было найдено эффективное решение

поставленной задачи управления. В результате сравнительного исследования было установлено, что оптимальным выбором для данной системы является PI-регулятор с параметрами $P \approx 18.86$ и $I \approx 27.09$. Данный выбор обоснован тем, что он обеспечивает наилучший компромисс между ключевыми показателями качества: высокой точностью с полным устранением установившейся ошибки, превосходным быстродействием (время регулирования 1.48 секунды) и минимальным, хорошо контролируемым перерегулированием (2.5%). Таким образом, настроенный PI-регулятор обеспечивает стабильную, точную и эффективную работу системы управления процессом сжигания газа и может быть рекомендован для практической реализации.

3.5 Принцип работы системы

Лабораторная проточная каталитическая установка с двумя реакторами фиксированного слоя представляет собой сложную систему для проведения каталитических реакций при высоком давлении и контролируемых условиях. В установке используются баллоны с газами, такими как аргон или кислород, диоксид углерода, метан и водород, каждый из которых подключен к собственному масс-расходомеру газа, что позволяет точно дозировать количество каждого реагента. Для подачи жидких компонентов применяется высоконапорный насос ВЭЖХ (HPLC насос), который обеспечивает стабильную подачу под высоким давлением. После дозирования газы проходят через систему предварительного нагрева и смешивания для получения однородной газовой смеси нужной температуры, после чего поток направляется через пост-нагреватель для достижения температуры, необходимой для протекания каталитической реакции. Реакторы оборудованы фиксированным слоем катализатора и помещены в высокотемпературную трубчатую печь, которая поддерживает заданный температурный режим. Давление в реакторах стабилизируется с помощью регуляторов обратного давления, способных работать при значениях до 750 PSI (около 50 бар) или 4 бар, что важно для контроля условий реакции и предотвращения фазовых переходов. Установка также оснащена системами безопасности, включая обратные клапаны и предохранительные клапаны, которые препятствуют обратному току реагентов и защищают оборудование от превышения давления. После прохождения реакторов продукты реакции направляются на анализ — газовая фаза поступает в газовый хроматограф для определения состава и оценки конверсии, а жидкая фаза анализируется с помощью ВЭЖХ. Нераеагировавшие вещества и отходы выводятся через систему дренажа или вентиляции. Для отделения и сбора жидких продуктов предусмотрена система конденсации, где тепло отводится с помощью охлаждения городской водой. Особенностью данной установки является наличие двух реакторов, что дает возможность проводить эксперименты в параллельном или последовательном режиме, что расширяет возможности исследования различных условий и этапов катализа. Высокое давление и точное дозирование реагентов позволяют воспроизводить

промышленные условия и получать достоверные данные о каталитических процессах. В целом установка обеспечивает комплексный контроль параметров реакции — температуры, давления, состава реагентов и продуктов, а также безопасность работы с горючими и токсичными газами, что делает её универсальной и надёжной для проведения исследований каталитических реакций в режиме непрерывного потока.

производителей. Это обеспечивает беспрепятственную интеграцию аппаратных и программных компонентов в единую систему независимо от их происхождения и технической реализации.

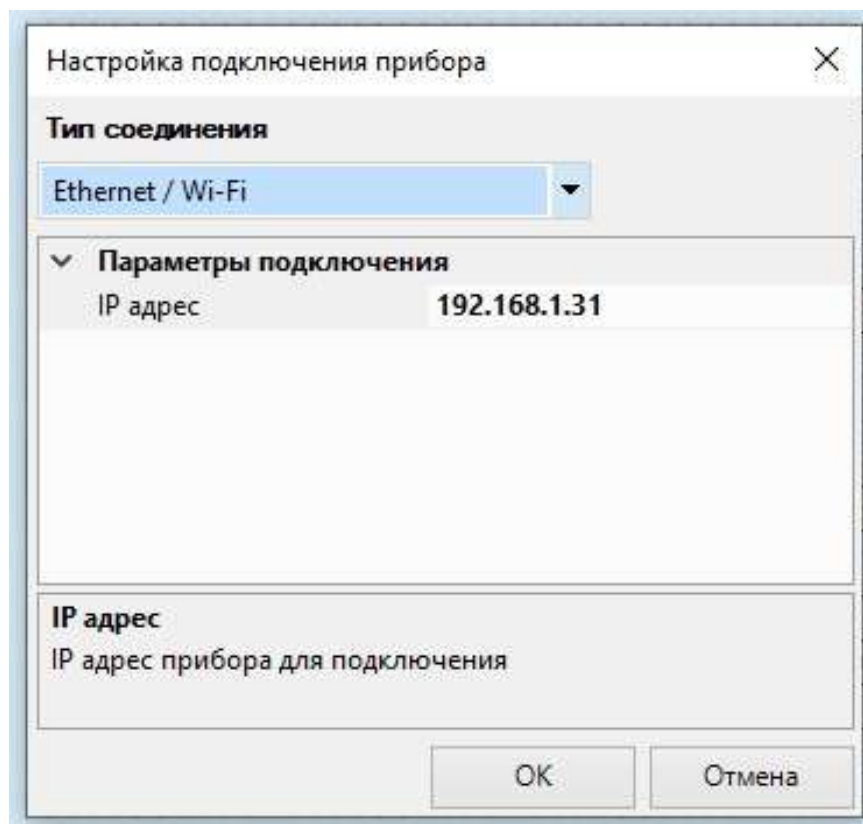


Рисунок 4.2 - Настройка OPC-сервера

2. Классификация OPC-серверов. В зависимости от функционального назначения OPC-серверы подразделяются на несколько типов:

- OPC DA (Data Access) — предназначен для работы с оперативными данными в реальном времени;

- OPC HDA (Historical Data Access) — обеспечивает доступ к архивным данным;

- OPC UA (Unified Architecture) — современная архитектура, характеризующаяся расширенными возможностями по обеспечению безопасности, масштабируемости и межплатформенной совместимости.

3. Взаимодействие с оборудованием. Серверы OPC обеспечивают передачу данных между устройствами нижнего уровня (датчики, исполнительные механизмы, контроллеры) и программными средствами верхнего уровня (SCADA, MES-системы и др.).

4. Механизмы передачи данных. Сбор и передача информации осуществляется следующим образом: сервер получает данные от устройств и преобразует их в стандартизированный формат, обеспечивающий унифицированный доступ к информации для приложений верхнего уровня. Это

позволяет пользователям работать с разнородными источниками данных через единый интерфейс.

Таким образом, OPC сервер является важной составляющей для обеспечения межсетевого взаимодействия и автоматизации в промышленных и других технологических системах.

В данной системе автоматизации лабораторной каталитической установки OPC-сервер играет ключевую роль в передаче данных между программируемыми контроллерами (ПЛК), SCADA-системой и другими программными инструментами мониторинга и управления. Он выполняет функцию промежуточного звена, обеспечивая стандартизированный обмен данными между оборудованием и программными модулями.

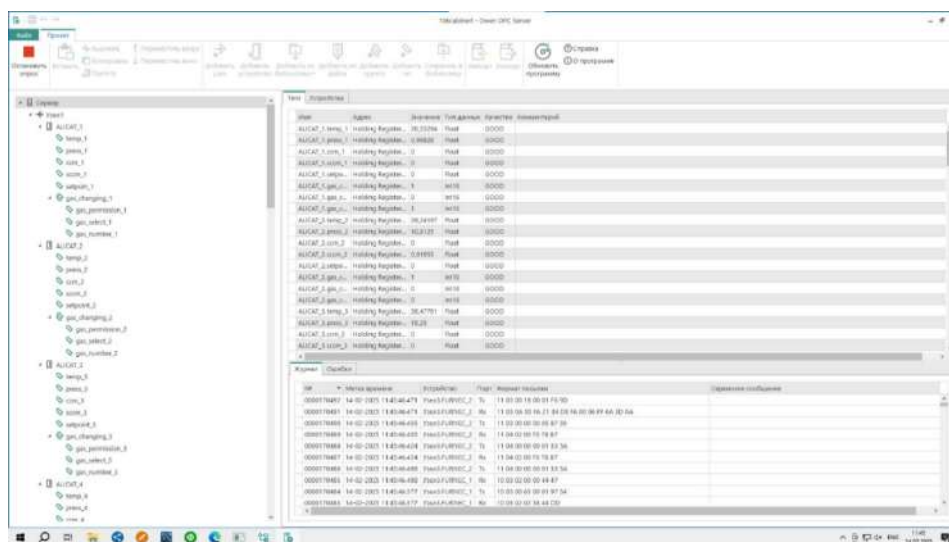


Рисунок 4.3 - Настройка OPC-сервера

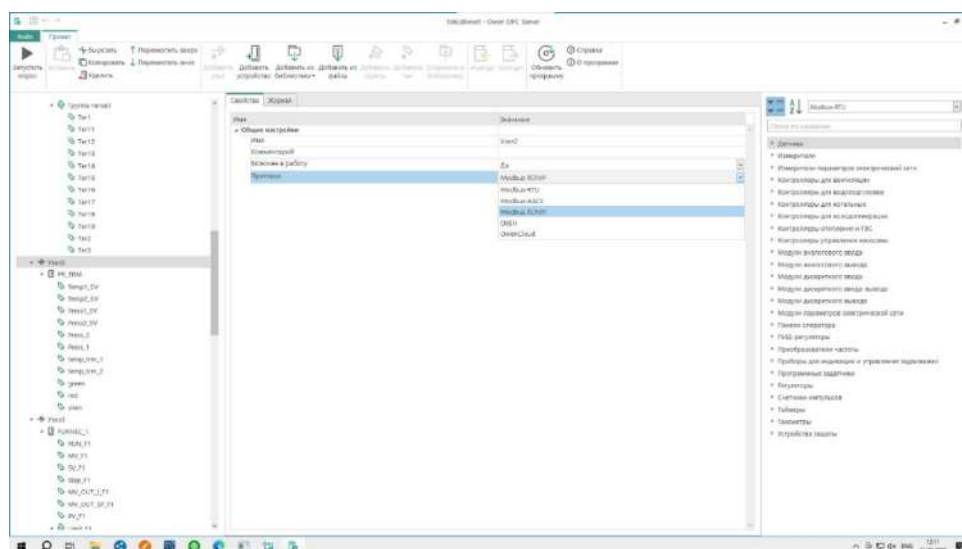


Рисунок 4.4 - Настройка OPC-сервера

В данной системе OPC-сервер выполняет функцию промежуточного звена между сетью Modbus RTU и SCADA-системой. Он принимает данные от Modbus Master, обрабатывает их и передает на верхний уровень управления, обеспечивая интеграцию с SCADA или другими системами мониторинга. (Рисунок 4.5)

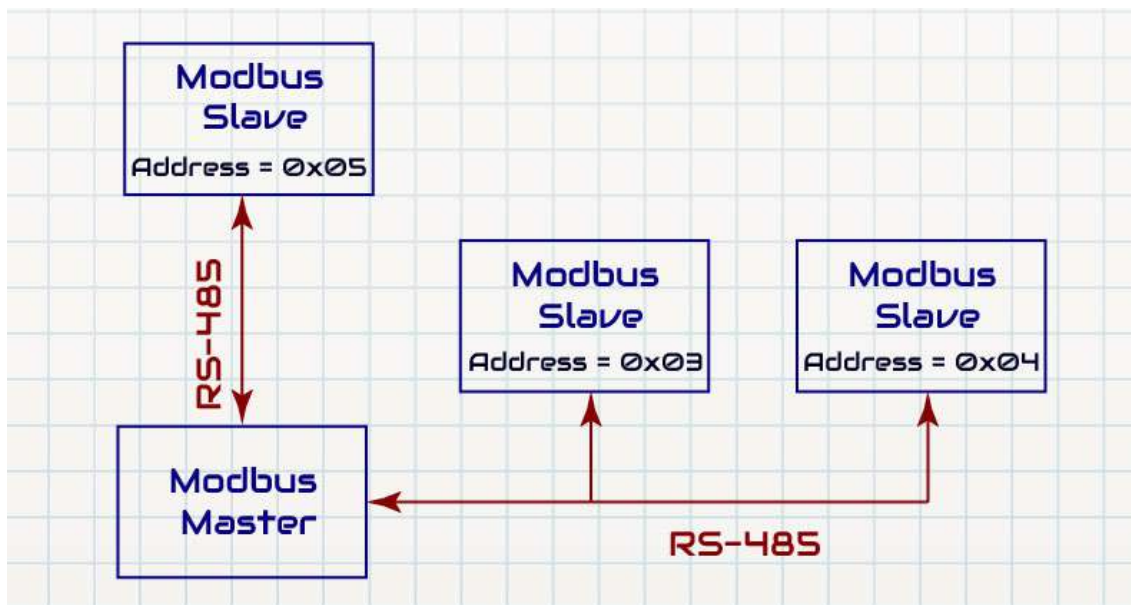


Рисунок 4.5 - Схема работы OPC сервера

4.2 SCADA-система для мониторинга и управления

SCADA-система (Supervisory Control and Data Acquisition) предназначена для оперативного контроля и управления технологическими процессами в автоматизированных системах [13].

Мониторинг технологических параметров. Одной из основных функций SCADA-системы является сбор и визуализация данных, характеризующих состояние объекта управления. К числу таких параметров относятся:

- температура в реакционной зоне;
- давление в рабочей камере;
- расход газообразных и жидких компонентов.

Визуализация параметров в реальном времени реализована через интерфейс оператора, как показано на рисунке 4.6. Такой подход обеспечивает своевременное выявление отклонений от заданных условий и позволяет персоналу оперативно реагировать на изменения в процессе.



Рисунок 4.6 - Главная страница SCADA системы

SCADA-система обеспечивает дистанционное управление режимами работы нагревателей в зависимости от заданных температурных параметров. В системе предусмотрена возможность синхронизации терморегулирующих устройств с газовыми расходомерами, что позволяет реализовать комплексное управление технологическим процессом [14].

На рисунке 4.7 показан интерфейс управления печью FURNEC 1, отображающий текущую и заданную температуру, шаги температурной программы, а также временные интервалы между ними. Это дает возможность задавать сложные термопрофили и реализовывать пошаговое управление нагревом.

Кроме того, реализованы автоматические алгоритмы защиты, которые обеспечивают аварийное отключение системы при превышении допустимых температурных значений. На рисунке 4.8 представлено окно настройки потока газов, позволяющее привязывать значения расхода к конкретным временным шагам температурного режима, что дополнительно усиливает контроль и безопасность эксплуатации оборудования.

SCADA-система поддерживает сбор, хранение и последующий анализ данных о ключевых технологических параметрах, таких как температура, давление и расход газов. Все параметры регистрируются в базе данных, что обеспечивает их доступность для анализа в различных временных разрезах [14].

Для визуального представления информации используются тренды — графики, отображающие изменение параметров во времени. Это позволяет не только оперативно оценивать текущую ситуацию, но и отслеживать отклонения от номинальных значений, выявлять повторяющиеся аномалии, тренды и причинно-следственные зависимости [15].

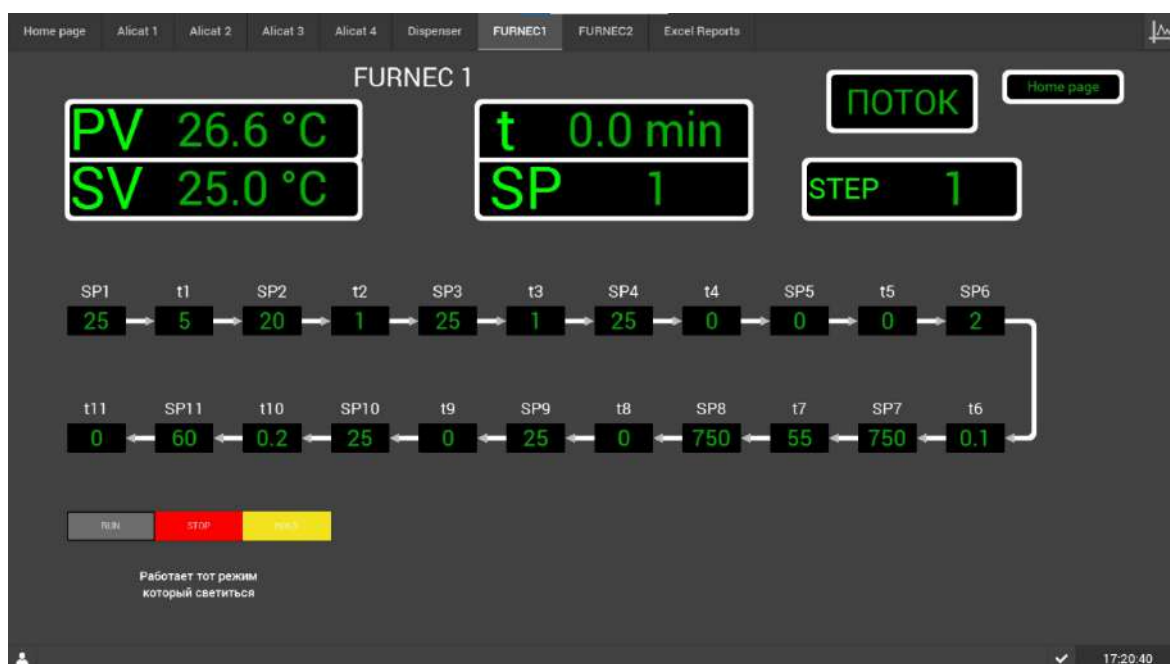


Рисунок 4.7 – Страница настройки нагрева TMCON в SCADA системе

Поток_F1

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8	SP9	SP10	SP11
Alicat1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alicat2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alicat3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alicat4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рисунок 4.8 – Страница настройки подачи газов в SCADA системе

Система также предоставляет функциональность формирования детализированных отчётов за любой выбранный период. Поддерживается экспорт данных в форматы CSV и Microsoft Excel [16], что упрощает подготовку документации, отчётности и проведение статистического анализа. Пример программной реализации экспорта данных с формированием имён файлов и записью параметров показан на рисунке 4.9.

Кроме того, результаты экспорта хранятся в структурированном виде в отдельной директории, где каждый файл именуется в соответствии с типом устройства, датой и временем сбора данных. Такой подход обеспечивает

удобную навигацию и архивирование технологической информации (см. рисунок 4.10).

```
procedure reportexcel(Variable: TM_Variable);
1 var
2   CurrentDay, aBegin, aEnd: TDateTime;
3   FURNEC1FileName, FURNEC2FileName, REACTOR1FileName, REACTOR2FileName: String;
4 begin
5   if ScadaReport.Value = 0 then
6   begin
7     aEnd := Now; // Конец интервала: текущая дата
8     aBegin := IncDay(aEnd, -1); // Начало интервала: текущая дата - 1 день
9
10    CurrentDay := aBegin; // Начинаем с первого дня в интервале
11
12    while CurrentDay <= aEnd do
13    begin
14      // Формируем имя файла для FURNEC1
15      FURNEC1FileName := 'FURNEC1temperature_' + IntToStr(DayOf(CurrentDay)) + '_' +
16        IntToStr(MonthOf(CurrentDay)) + '_' +
17        IntToStr(YearOf(CurrentDay)) + '.xlsx';
18
19      // Формируем имя файла для FURNEC2
20      FURNEC2FileName := 'FURNEC2temperature_' + IntToStr(DayOf(CurrentDay)) + '_' +
21        IntToStr(MonthOf(CurrentDay)) + '_' +
22        IntToStr(YearOf(CurrentDay)) + '.xlsx';
23
24      // Формируем имя файла для REACTOR1
25      REACTOR1FileName := 'REACTOR1temperature_' + IntToStr(DayOf(CurrentDay)) + '_' +
26        IntToStr(MonthOf(CurrentDay)) + '_' +
27        IntToStr(YearOf(CurrentDay)) + '.xlsx';
28
29      // Формируем имя файла для REACTOR2
30      REACTOR2FileName := 'REACTOR2temperature_' + IntToStr(DayOf(CurrentDay)) + '_' +
31        IntToStr(MonthOf(CurrentDay)) + '_' +
32        IntToStr(YearOf(CurrentDay)) + '.xlsx';
33
34      // Экспорт данных для каждого устройства
35      PV_F2.ToExcel(FURNEC1FileName, CurrentDay, IncDay(CurrentDay, 1), evtAll, False);
36      PV_F1.ToExcel(FURNEC2FileName, CurrentDay, IncDay(CurrentDay, 1), evtAll, False);
37      temp_tm 1.ToExcel(REACTOR1FileName, CurrentDay, IncDay(CurrentDay, 1), evtAll, False);
38    end;
39  end;
40 end;
```

Рисунок 4.9 – Формирование отчетов в Excel формате в SCADA системе

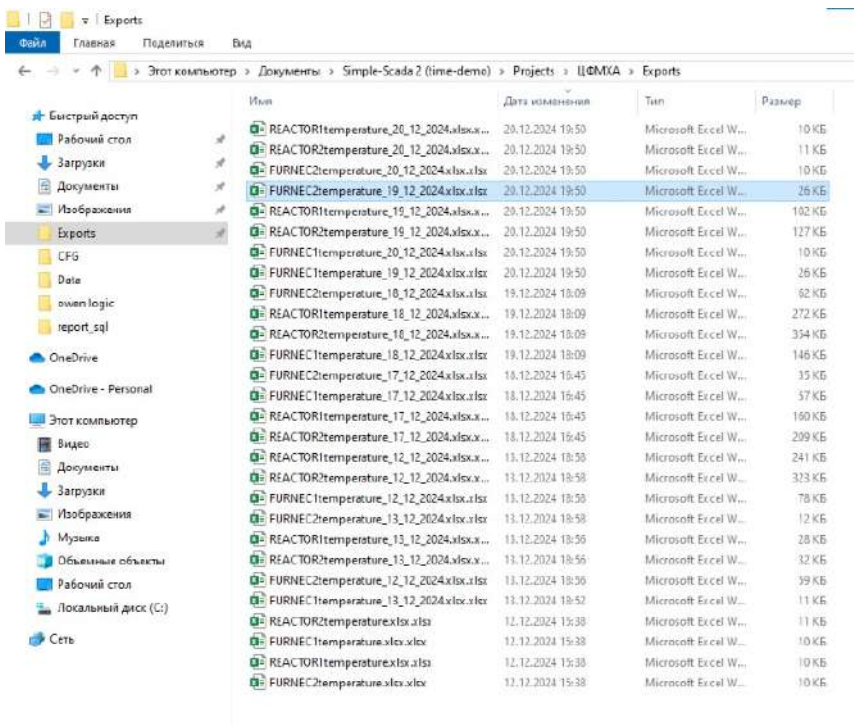


Рисунок 4.10 –Хранение отчетов в Excel формате

5 Разработка функциональной схемы автоматизации системы управления процессом

5.1 Функциональная схема автоматизации

Функциональная схема автоматизации представляет собой графическое отображение структуры и взаимодействия основных элементов автоматизированной системы управления технологическим процессом каталитического сжигания газов (см. приложение В). В данной схеме показаны все ключевые компоненты, их связи и порядок взаимодействия, что обеспечивает полное понимание работы системы.

На схеме отображены два реактора, каждый из которых оснащен температурными датчиками (термопарами), а также системой подачи и контроля газовых потоков. Газовые линии оборудованы клапанами и расходомерами для точного дозирования и регулировки подачи газов.

Основным управляющим элементом схемы является контроллер ПР-103, который взаимодействует с аналоговыми и цифровыми входами и выходами (AI, AO, DI, DO), а также с интерфейсом RS-485 для обмена данными с периферийными устройствами.

Через SCADA-систему осуществляется мониторинг и управление процессом, предоставляя оператору удобный интерфейс для контроля параметров, анализа данных и быстрого реагирования на возможные отклонения.

Приведённая функциональная схема автоматизации служит основой для разработки алгоритмов управления и настройки системы, а также обеспечивает надёжную и безопасную эксплуатацию установки.

Подробное изображение и все обозначения можно увидеть в приложении В — функциональная схема автоматизации.

5.2 Выбор аппаратной базы

Выбор аппаратной базы для автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) каталитического сжигания газов основывается на нескольких ключевых критериях, таких как надёжность, способность работать в условиях повышенных температур и давления, а также совместимость с датчиками и исполнительными механизмами.

Для данной системы необходимо выбрать оборудование, которое будет обеспечивать высокую точность измерений, долговечность и устойчивость к внешним воздействиям. Важными компонентами аппаратной базы являются серверы, рабочие станции, программируемые логические контроллеры (ПЛК), а также сетевое оборудование, датчики давления, температуры, расхода.

5.2.1 Выбор датчика температуры

Для измерения температуры в реакторе в составе автоматизированной системы был выбран термопарный датчик WRNK-291 (тип K). Данная термопара обеспечивает высокую точность и стабильность измерений, соответствующую требованиям к надёжному контролю температурных режимов в условиях высоких температур и динамично меняющейся среды. Диапазон измеряемых температур составляет от 0 до +1000 °С, что делает её подходящей для процессов каталитического сжигания газов, где возможны резкие температурные колебания. Термопара имеет аналоговый выходной сигнал 4–20 мА и поддерживает протокол HART, что облегчает её интеграцию в современную систему управления и диагностики. Внешний вид и конструктивные особенности термопары WRNK-291 показаны на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Внешний вид и конструктивные особенности термопары WRNK-291

Конструктивно WRNK-291 выполнена с применением термоэлектродов из хромеля и алюмеля, что обеспечивает высокую термоэлектрическую стабильность и устойчивость к агрессивным средам. Герметичный корпус с классом защиты IP65, а также диапазон рабочей температуры окружающей среды от –40 до +70 °С позволяют использовать данный датчик в условиях высокой влажности, пыли и перепадов температур.

Для обоснования выбора данной термопары была проведена сравнительная оценка её технических характеристик с другим типом — термопарой ТТПЖ 187 (тип J), которая также широко используется в

промышленной практике. Таблица 5.1 содержит подробное сравнение ключевых параметров этих двух типов термопар, включая материалы термоэлектродов, диапазон измеряемых температур, класс защиты, устойчивость к внешним воздействиям, выходной сигнал и рабочие условия.

Анализ показал, что термопара WRNK-291 (тип К) обладает рядом значительных преимуществ: более широким температурным диапазоном (0–1000 °С против –40...+600 °С у ТТПЖ 187), более высоким классом защиты (IP65 против IP40), а также лучшей устойчивостью к температурным нагрузкам и агрессивной среде. Кроме того, WRNK-291 имеет более широкий диапазон эксплуатации по окружающей температуре и выполнена в более прочном конструктиве, что делает её предпочтительным выбором для задач измерения температуры в реакторе установки каталитического сжигания.

Таким образом, по большинству технических параметров термопара WRNK-291 (тип К) превосходит термопару ТТПЖ 187 (тип J) и представляет собой наиболее рациональный выбор для применения в данной системе. Подробное сравнение технических характеристик представлено в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнение технических параметров термопары WRNK-291 (тип К) и термопары ТТПЖ 187 (тип J)

Наименование оборудования	Термопары WRNK-291 (тип К)	термопары ТТПЖ 187 (тип J)
Параметр	Значение	Значение
Материал положительного термоэлектрода	Хромель	Железа
Материал отрицательного термоэлектрода	Алюмель	Константан
Диапазон измеряемых температур, °С	От 0 до +1000	От -40 до +600
Степень защиты от пыли и влаги	IP65	IP40
Условное давление, Мпа	50	30
Температура окружающей среды, °С	От -40 до +70	От -20 до +60
Выходной сигнал	4-20 мА, HART	4-20 мА

5.2.2 Выбор датчика давления

Для измерения давления в реакторе и трубопроводах в составе автоматизированной системы был выбран преобразователь давления РТ205. Этот датчик обеспечивает высокую точность измерений, соответствующую требованиям к устойчивой и безопасной работе установки. Диапазон измерений

устройства составляет от 0 до 10 бар, а точность — $\pm 0,25\%$ от диапазона. Преобразователь оснащён аналоговым выходом 4–20 мА и дополнительным диапазоном 0–10 В, что обеспечивает универсальность при подключении к различным типам контроллеров. Благодаря высокой степени защиты от пыли и влаги (IP65), температурной устойчивости от -10 до $+70$ °С, а также прочному корпусу из нержавеющей стали и алюминиевого сплава, датчик РТ205 подходит для эксплуатации в сложных промышленных условиях с высокими нагрузками. Внешний вид и конструктивные особенности преобразователя давления РТ205 представлены на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Внешний вид преобразователя давления РТ205

Для обоснования выбора данного прибора была проведена сравнительная оценка его технических характеристик с другим распространённым датчиком давления — SENSORTech SDPS-S01. Таблица 5.2 содержит полное сравнение ключевых параметров двух устройств, включая тип чувствительного элемента, диапазон измерений, точность, разрешающую способность, тип выходного сигнала, тип подключения, наличие дисплея, диапазон питающих напряжений, рабочую температуру, степень защиты корпуса, а также материалы исполнения.

Сравнение показывает, что РТ205 обладает более широким диапазоном измерений (0–10 бар против 0–5 бар у SDPS-S01), лучшей точностью ($\pm 0,25\%$ против $\pm 1\%$), более высоким разрешением (0,01 бар против 0,1 бар), расширенной рабочей температурой и более прочной конструкцией. Кроме того, наличие дисплея и поддержка протокола HART дают дополнительные преимущества в диагностике и интеграции с современными АСУ ТП.

Таким образом, по большинству технических параметров преобразователь давления РТ205 превосходит SDPS-S01 и представляет собой наиболее

рациональный выбор для условий работы установки каталитического сжигания газов. Подробное сравнение представлено в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Сравнение технических параметров преобразователя давления PT205 и датчика давления SENSORTECH SDPS-S01

Наименование оборудования	Преобразователя давления PT205	Датчика давления SENSORTECH SDPS-S01
Параметр	Значение	Значение
Тип датчика	Кремниевый	Пьезорезистивный
Диапазон измерений	0-10 бар	0-5 бар
Точность	$\pm 0,25\%$ от диапазона	$\pm 1\%$ от диапазона
Разрешение	0,01 бар	0,1 бар
Выходной сигнал	4-20 мА, 0-10 В	0-5 В
Электрическое подключение	3 проводное	2 проводное
Тип дисплея	LED / LCD	Без дисплея
Питание	24 ВDC	12-24 ВDC
Рабочая температура	От -10 до +70°C	От 0 до +50°C
Защита от пыли и влаги	IP65	IP40
Материал корпуса	Нержавеющая сталь, алюминиевый сплав	Пластик

5.2.3 Выбор массового расходомера

Для измерения расхода газов в процессе каталитического сжигания используется массовый расходомер Alicat MC-20SLPM-D. Это устройство предназначено для высокоточного контроля подачи газа в различных технологических условиях. Оно обеспечивает измерение расхода в диапазоне от 0 до 20 SLPM (стандартных литров в минуту) с точностью $\pm 1\%$ от текущего показания. Расходомер поддерживает несколько типов выходных сигналов, включая 0–5 В, 4–20 мА, а также цифровой интерфейс RS-485 с поддержкой протокола Modbus, что делает его универсальным для использования в составе различных АСУ ТП. Внешний вид и основные характеристики расходомера Alicat MC-20SLPM-D представлены на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Внешний вид расходомера Alicat MC-20SLPM-D

Одним из ключевых преимуществ расходомера является высокая разрешающая способность — 0,01 SLPM, что позволяет точно отслеживать малейшие изменения расхода газа. Устройство работает при давлениях до 50 PSIG (примерно 3,45 бар), оснащено цифровым дисплеем для визуализации параметров в реальном времени и может питаться как от источника 24 В DC, так и через USB. Дополнительное преимущество модели — возможность калибровки под несколько типов газов, что расширяет область применения и повышает точность измерений.

Для объективной оценки эффективности применения данного расходомера была проведена сравнительная характеристика с другой моделью — расходомером OMEGA FMA-1500. В сравнении учитывались такие параметры, как диапазон измерений, точность, разрешение, выходной сигнал, диапазон рабочих давлений, требования к питанию, температурные режимы работы, степень защиты от пыли и влаги, а также возможности калибровки.

Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 5.3. Анализ показывает, что расходомер Alicat MC-20SLPM-D обладает более широким диапазоном измерений, лучшей точностью, более высокой разрешающей способностью, поддерживает больше вариантов интерфейсов и обладает более гибкой системой калибровки. Кроме того, его конструкция обеспечивает надёжную защиту от пыли и влаги, что особенно важно для эксплуатации в условиях промышленной среды. Расходомер OMEGA FMA-1500 при этом ограничен меньшим диапазоном, меньшей точностью и более простой конструкцией.

Таким образом, по совокупности параметров массовый расходомер Alicat MC-20SLPM-D является предпочтительным решением для установки

каталитического сжигания газов, обеспечивая надёжность, точность и гибкость настройки. Подробное сравнение двух моделей представлено в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Сравнение технических параметров массовый расходомер Alicat MC-20SLPM-D и расходомера OMEGA FMA-1500

Наименование оборудования	Массовый расходомер Alicat MC-20SLPM-D	Расходомер OMEGA FMA-1500
Параметр	Значение	Значение
Тип датчика	Массовый расходомер	Массовый расходомер
Диапазон измерений	0-20 SLPM (стандартные литры в минуту)	0-5 SLPM
Точность	±1% от показания	±2% от показания
Разрешение	0,01 SLPM	0,1 SLPM
Выходной сигнал	0-5 V, 4-20 mA, RS-485, Modbus	0-5 V
Рабочее давление	До 50 PSIG (до 3,45 бар)	До 25 PSIG (до 1,72 бар)
Тип дисплея	Цифровой LCD	Цифровой LCD
Питание	24 VDC или USB	12-24 VDC
Рабочая температура	От -10 до +60°C	От 0 до +50°C
Защита от пыли и влаги	IP40	IP30
Калибровка	Доступна калибровка с несколькими газами	Один газ, ограниченные возможности

5.2.4 Выбор цифровой регулятор температуры

Для контроля температуры в системе каталитического сжигания газов применяется цифровой регулятор температуры FT815 TMCON. Это устройство предназначено для точного измерения и регулирования температуры в широком диапазоне — от -50 °C до +1370 °C, что делает его подходящим для работы в условиях высокотемпературных технологических процессов. Регулятор

поддерживает работу с термопарами типа K и S, а также с аналоговыми входами 4–20 мА. Благодаря поддержке промышленного интерфейса RS485 с протоколом Modbus, FT815 легко интегрируется в систему автоматизации и может взаимодействовать с другими компонентами АСУ ТП. Внешний вид и технические характеристики цифрового регулятора FT815 TMCON представлены на рисунке 5.4.



Рисунок 5.4 – Внешний вид цифрового регулятора FT815 TMCON

Основными преимуществами данного регулятора являются высокая точность ($\pm 0,2\%$ от диапазона), надёжность, наличие PID-регулирования и функции самонастройки, а также степень защиты IP65, позволяющая использовать прибор в условиях высокой влажности и запылённости. Устройство оснащено цифровым дисплеем и обеспечивает выходной сигнал 4–20 мА, а также релейный выход для управления исполнительными механизмами.

Для объективной оценки эффективности и соответствия требованиям была выполнена сравнительная характеристика FT815 TMCON с другим регулятором — RTD-301, который также используется в промышленности. Сравнение проводилось по ряду параметров: диапазону рабочих температур, поддерживаемым входным сигналам, интерфейсам связи, точности, типу управления, условиям питания, разрешению и уровню защиты.

Результаты анализа представлены в таблице 5.4. Как видно из сравнительной таблицы, FT815 TMCON имеет более широкий диапазон рабочих температур, лучшую точность, а также более высокий класс защиты корпуса (IP65 против IP20 у RTD-301), что делает его предпочтительным выбором для работы в условиях агрессивной промышленной среды. Несмотря на то, что RTD-301 поддерживает дополнительный интерфейс Ethernet и более широкий набор термопар (включая RTD Pt100), его точность, температурный диапазон и защищённость уступают FT815 TMCON. Кроме того, оба устройства поддерживают PID-регулирование и самонастройку, что говорит о схожем уровне интеллектуальной обработки сигнала.

Таким образом, по совокупности характеристик цифровой регулятор температуры FT815 TMCON более адаптирован для применения в условиях технологического процесса каталитического сжигания газов. Подробное сравнение регуляторов представлено в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Сравнение технических параметров FT815 TMCON и RTD-301

Наименование оборудования	FT815 TMCON	RTD-301
Параметр	Значение	Значение
Тип датчика	Цифровой регулятор температуры	Цифровой регулятор температуры
Рабочая температура	От -50 до +1370°C	От -20 до +400°C
Входной сигнал	Термоэлектроды (термопара типа K, S), 4-20 мА	RTD (Pt100), термопара (типы K, J, T, R, S)
Интерфейсы	RS485 Modbus	RS485 Modbus, Ethernet
Выходной сигнал	4-20 мА, релейный выход	4-20 мА, релейный выход
Точность	±0.2% от диапазона	±0.5% от диапазона
Питание	АС 100-240 В, 50/60 Гц	АС 100-240 В, 50/60 Гц
Разрешение	0.1°C	0.1°C
Защита от пыли и влаги	IP65	IP20
Управление	PID, самонастройка	PID, самонастройка

5.2.5 Выбор контроллера

Для управления технологическим процессом и обработки данных, поступающих с различных датчиков, используется контроллер ПР-103. Этот контроллер является основным устройством для обработки информации и управления исполнительными механизмами в системе автоматизации. ПР-103 работает в широком температурном диапазоне от -40 °С до +70 °С, что обеспечивает его надежную эксплуатацию в различных условиях. Важным преимуществом контроллера является поддержка нескольких протоколов

передачи данных — PROFINET IO, PROFIBUS DP и ASInterface, что значительно расширяет возможности его интеграции в комплексные системы управления. Кроме того, ПР-103 оснащен множеством интерфейсов, включая Ethernet, RS232, RS485 и USB, что позволяет обеспечить гибкое подключение к различным устройствам и периферии.

Внешний вид контроллера ПР-103 представлен на рисунке 3.6. Его конструкция и набор интерфейсов позволяют легко интегрировать устройство в различные промышленные автоматизированные системы, обеспечивая надежное и эффективное управление технологическими процессами.

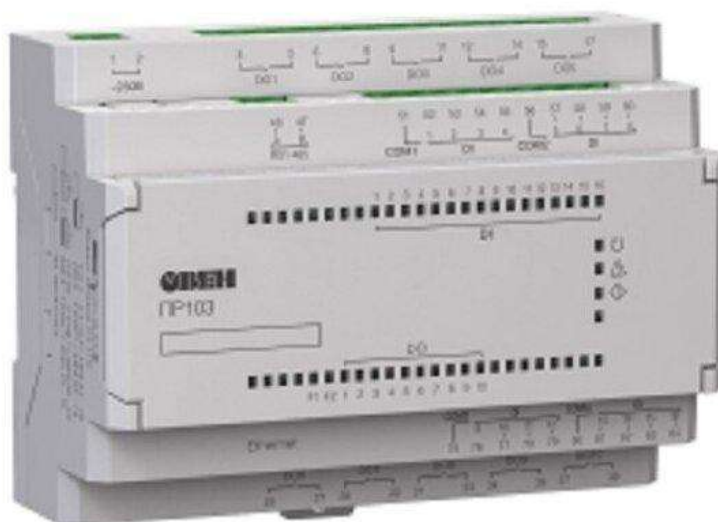


Рисунок 5.5 – Внешний вид контроллера ПР-103

Для объективного сравнения и выбора оптимального контроллера была проведена сравнительная характеристика ПР-103 с другим контроллером — ПР-102. В таблице 5.5 приведены основные технические параметры обоих устройств: рабочий температурный диапазон, поддерживаемые протоколы передачи данных, доступные интерфейсы, а также количество дискретных и аналоговых входов/выходов и время выполнения операций. Как видно из таблицы, ПР-103 имеет более широкий температурный диапазон, больший набор интерфейсов и протоколов, а также более высокую скорость обработки данных. В то же время, ПР-102 характеризуется меньшим количеством входов/выходов, что может ограничивать его применение в более сложных системах.

Учитывая технические характеристики, функциональные возможности, а также высокий уровень надежности и адаптивности, контроллер ПР-103 является предпочтительным выбором для реализации задач автоматизации и управления в сложных технологических условиях. Он обеспечивает стабильную работу даже в агрессивных промышленных средах, поддерживает широкий спектр интерфейсов связи и легко интегрируется с различными видами оборудования и программного обеспечения.

Таблица 5.5 – Сравнение технических параметров ПП 103 и ПП 102

Наименование оборудования	ПП 103	ПП 102
Рабочая температура, °C	От -40 до +70	От 0 до +60
Протокол передачи данных	PROFINET IO, PROFIBUS DP, AS Interface	PROFIBUS DP
Интерфейсы	Ethernet, RS232, RS485, USB	RS232, RS485
Дискретный ввод/вывод	24/6	16/4
Аналоговый ввод/вывод	4/2	2/1
Время выполнения операции	0.1 мкс	0.5 мкс

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дипломном проекте была проведена комплексная разработка автоматизированной системы управления процессом каталитического сжигания газов, включающая описание технологического процесса, создание математической модели, проектирование и практическую реализацию системы автоматизации. Актуальность темы связана с необходимостью повышения эффективности и экологической безопасности при утилизации газовых выбросов.

Изучен процесс каталитического сжигания с использованием лабораторной установки, оснащённой двумя трубчатыми реакторами высокого давления и оборудованием для точного дозирования и контроля параметров. Особое внимание уделено поддержанию оптимальных условий для высокой активности катализатора и минимизации вредных побочных продуктов.

Разработаны ключевые алгоритмы управления параметрами процесса — температурой, давлением и расходом газов. Для реализации применён программируемый контроллер ОВЕН ПР-103 и ПО Simple SCADA, что обеспечивает надёжность работы и удобство управления. Система включает средства аварийной сигнализации и защиту технологических лимитов, повышая безопасность эксплуатации.

Создана математическая модель, учитывающая кинетику химических реакций и динамику системы, что позволило оптимизировать параметры PID-регуляторов методом итерационного подбора. Моделирование подтвердило эффективность и стабильность управления процессом.

Практическая реализация обеспечена подбором точных и надёжных датчиков, регуляторов и контроллера с использованием промышленных протоколов Modbus и OPC для интеграции с SCADA-системой. Пользовательский интерфейс обеспечивает удобство мониторинга и управления.

Экспериментальная проверка показала высокую надёжность и эффективность системы в условиях изменения технологических параметров, что способствует снижению расхода сырья и повышению экологической безопасности. Снижение влияния человеческого фактора повышает оперативность и предотвращает аварии.

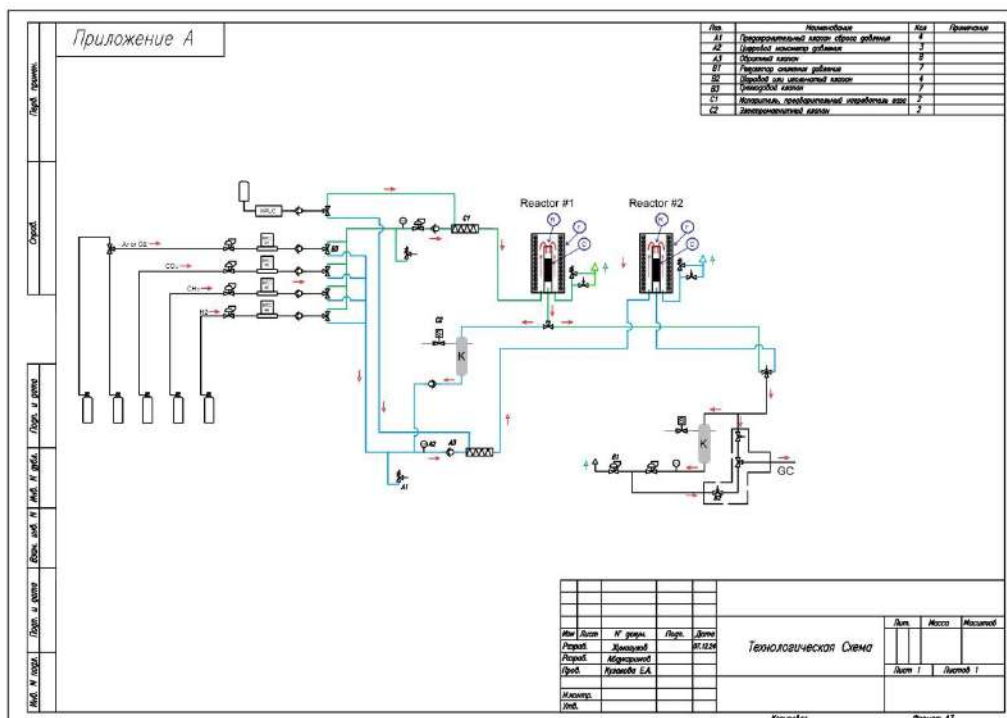
Разработанная система является основой для дальнейших исследований и модернизации промышленных установок, с перспективами внедрения интеллектуальных алгоритмов и анализа больших данных для оптимизации работы и продления срока службы катализатора.

Все поставленные задачи успешно решены: описан процесс, создана математическая модель, реализована система управления с эффективным регулятором и обеспечена надёжная аппаратная база и программное обеспечение. Работа имеет значимый научный и практический вклад в развитие экологически безопасных технологий и повышение энергоэффективности промышленных процессов.

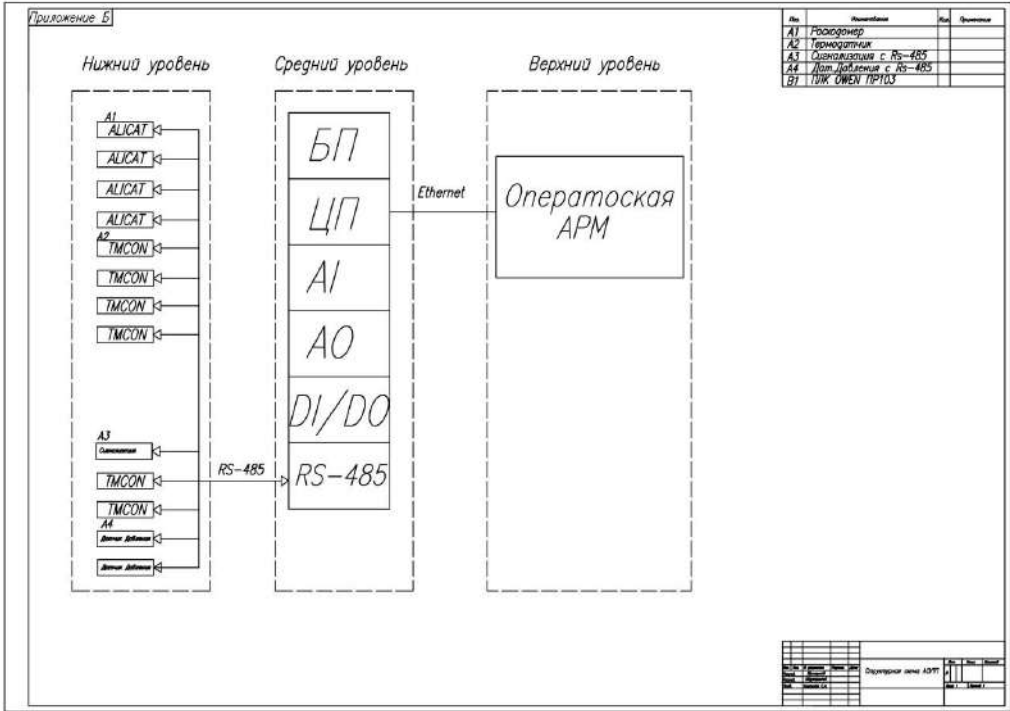
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Иванов А.В. Каталитическое сжигание газов: современные технологии и перспективы. – М.: Техносфера, 2021. – 320 с.
- 2 Петров С.М., Кузнецова Е.В. Каталитическое сжигание промышленных газов: теория и практика. – СПб.: Химия, 2023. – 275 с.
- 3 Смирнов Д.Н. Новые материалы для каталитического сжигания газов // Вестник химической промышленности. – 2022. – № 4. – С. 45–52.
- 4 Ли В.Ю., Ким Т.С. Каталитическое сжигание и экология. – Новосибирск: Наука, 2020. – 210 с.
- 5 Zhang L., Wang H. Catalytic Combustion of Gaseous Fuels: Advances and Applications. – London: Elsevier, 2024. – 340 p.
- 6 Михайлов К.П. Matlab для инженеров: руководство по применению. – М.: Бином, 2020. – 400 с.
- 7 Brown J., Smith A. MATLAB Programming for Numerical Computation. – New York: Springer, 2021. – 350 p.
- 8 Романов П.В. Моделирование процессов в Matlab. – Екатеринбург: УрФУ, 2022. – 280 с.
- 9 Johnson M. MATLAB: An Introduction with Applications. – Boston: Cengage Learning, 2023. – 320 p.
- 10 Кузнецова И.Н. Анализ данных с помощью Matlab. – М.: ДМК Пресс, 2024. – 250 с.
- 11 ООО «Овен». Оборудование Овен: руководство пользователя. – Москва, 2022. – 150 с.
- 12 Simple SCADA: основы и практика применения / Под ред. В.А. Коваленко. – СПб.: Питер, 2021. – 270 с.
- 13 Иванов С.В. Автоматизация на базе Simple SCADA. – Казань: Казанский университет, 2023. – 220 с.
- 14 Petrov A., Sidorova M. SCADA Systems and Industrial Automation. – Berlin: Springer, 2020. – 310 p.
- 15 ООО «Овен». Техническая документация на контроллеры Овен. – Москва, 2024.
- 16 Simple SCADA для промышленной автоматизации / Под ред. Н.Н. Федорова. – Новосибирск: Наука, 2025. – 290 с.

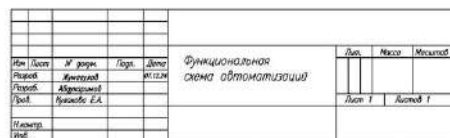
Приложение А Технологическая схема процесса



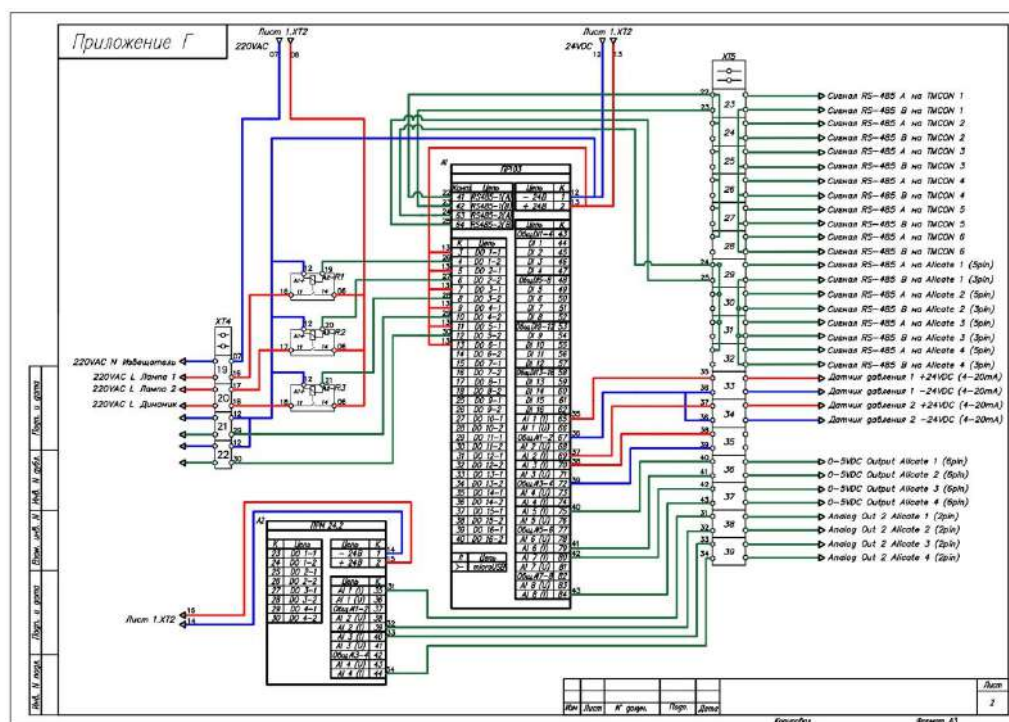
Приложение Б **Структурная схема автоматизации**



Функциональная схема автоматизации

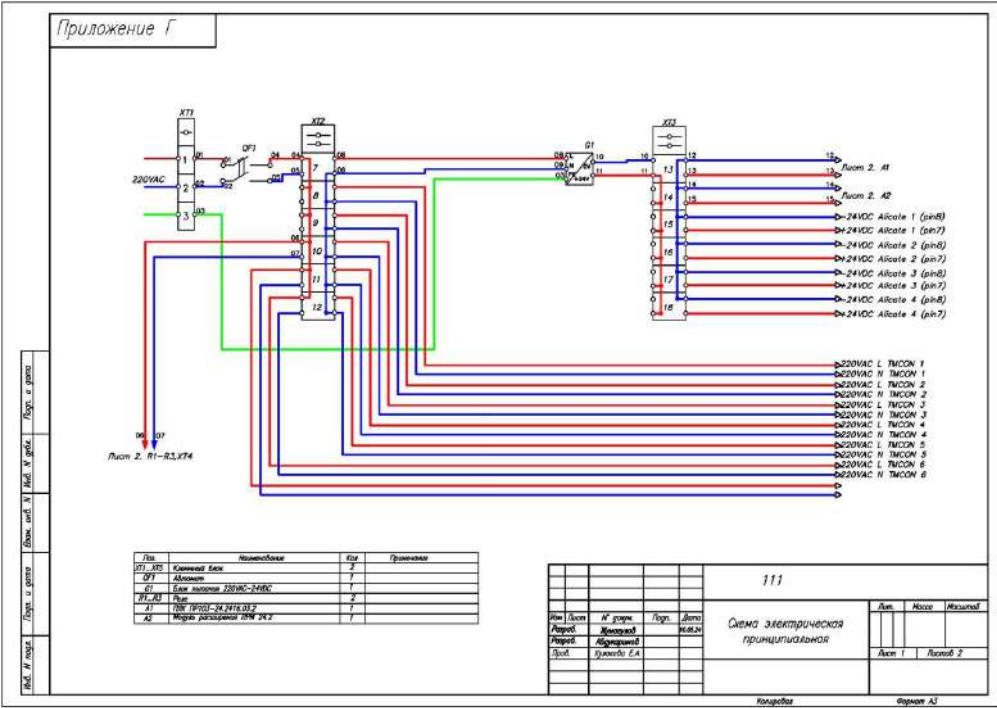


Электрическая принципиальна



я схема

Приложение Г, часть 2 Электрическая принципиальная схема



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Абдукаримов Абдулазиз Асадулло угли, Жумағұлов Бакдәулет Қуанышұлы

Соавтор (если имеется): Жумағұлов Бакдәулет Қуанышұлы

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Автоматизация процесса каталитического сжигания газов

Научный руководитель: Шамиль Кошимбаев

Коэффициент Подобия 1: 7.8

Коэффициент Подобия 2: 2.1

Микропробелы: 31

Знаки из других алфавитов: 7

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

А. А.

проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Абдукаримов Абдулазиз Асадулло угли, Жумагулов Бакдаулет Куанышулы

Соавтор (если имеется): Жумагулов Бакдаулет Куанышулы

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Автоматизация процесса каталитического сжигания газов

Научный руководитель: Шамиль Кошимбаев

Коэффициент Подобия 1: 7.8

Коэффициент Подобия 2: 2.1

Микропробелы: 31

Знаки из здругих алфавитов: 7

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

РЕЦЕНЗИЯ

На дипломный проект

Абдукаримов Абдулазиз Асадулло угли и Жұмағұлов Бақдәулет Қуанышұлы
6B07103 Автоматизация и роботизация

На тему: Автоматизация процесса каталитического сжигания газов

Выполнено:

- а) графическая часть на 5 листах
- б) пояснительная записка на 64 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Дипломный проект Абдукаримова А.А. и Жұмағұлова Б.Қ. посвящен актуальной и значимой теме – автоматизации процесса каталитического сжигания газов, направленной на повышение его эффективности и безопасности. Работа структурно разделена на пять ключевых частей. Первый раздел описывает технологический процесс и его основы. Второй посвящен разработке автоматизированной системы управления и выбору аппаратной базы. Третий раздел включает расчетную часть, моделирование и синтез регулятора. Четвертый раскрывает разработку программного обеспечения в среде Simple SCADA. И, наконец, пятый раздел представляет функциональную схему автоматизации.

В целом, в работе успешно освещены теоретические и технические аспекты автоматизации, проведен глубокий анализ процесса и грамотно подобраны технические средства, что подтверждает высокий уровень проведенных исследований. Использование среды Simple SCADA является актуальным и практичным решением для разработки программного обеспечения.

Однако, несмотря на значительный объем проделанной работы и комплексный подход к решению поставленных задач, в проекте представляется возможным усилить проработку некоторых аспектов для дальнейшего повышения его практической ценности. В частности, было бы целесообразно более полно представить результаты экспериментальной или углубленной имитационной проверки функционирования разработанной системы управления в динамических режимах эксплуатации, что значительно укрепило бы доказательную базу её эффективности и стабильности в условиях, приближенных к реальным. Существующее моделирование, заложившее основу, могло бы быть дополнено демонстрацией реакции системы на типичные возмущения. Помимо этого, в дальнейшем можно расширить рассмотрение аспектов отказоустойчивости и комплексной безопасности разработанной системы, а также предложить более детальные шаги по её интеграции в существующий технологический процесс, что сделает проект еще более готовым к потенциальному внедрению.

Оценка работы

Проект оценивается на «отлично» (95%), и студенты Абдукаримов Абдулазиз Асадулло угли и Жұмағұлов Бақдәулет Қуанышұлы заслуживает присвоения степени бакалавра по образовательной программе 6B07103 – Автоматизация и роботизация.

Рецензент

Доктор PhD, доцент

Кафедра «Автоматизация и управление»

АУЭС им. Г.Мукеева

Оракбаев Е.Ж.



«12» июнь 2025 г.

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломный проект
студентов Абдукаримова Абдулазиза Асадулло угли
и Жұмағұлова Бакдәулеті Қуанышұлы
по образовательной программе 6B07103 – «Автоматизация и
роботизация»

на тему: *«Автоматизация процесса каталитического сжигания газов»*

Дипломный проект студентов посвящен актуальной теме повышения эффективности и безопасности технологического процесса путем автоматизации каталитического сжигания газов. Разработка соответствует современным требованиям по экологичности и энергоэффективности, а также представляет ценность для промышленных предприятий, сталкивающихся с необходимостью утилизации и обезвреживания газовых выбросов.

Проект включает в себя пять логически взаимосвязанных разделов. В первой части подробно раскрыта суть технологического процесса и его особенности. Во второй – обоснован выбор архитектуры автоматизированной системы управления и аппаратной части. Третья часть содержит необходимые инженерные расчеты и синтез регулятора. Четвертый раздел посвящён программной реализации проекта в среде Simple SCADA, что делает работу актуальной с точки зрения цифровизации производств. Пятая часть включает функциональную схему автоматизации, которая отражает структуру и принципы работы всей системы.

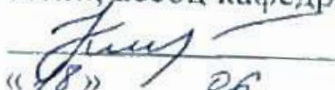
Студенты продемонстрировали высокий уровень подготовки, уверенно работали с технической литературой, программным обеспечением, а также грамотно подошли к обоснованию проектных решений. Использование SCADA-системы для демонстрации разработанного алгоритма подтверждает практическую направленность проекта.

В целом работа выполнена на высоком уровне, все разделы оформлены в соответствии с методическими требованиями. Представленные материалы свидетельствуют о самостоятельной и продуктивной работе студентов над актуальной инженерной задачей.

Считаю, что дипломный проект Абдукаримова А. А. и Жұмағұлова Б.К. присвоения академической степени бакалавра техники и технологии по образовательной программе 6B07103 – «Автоматизация и роботизация».

Научный руководитель

к.т.н., ассоц кафедры «Автоматизация и управление»

 Кошibaев Ш.К.

«18» 06 2025 г.