

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

Альмухамбетов Алишер Куатович

Разработка системы автоматического регулирования тепловыми процессами при  
переработке нефти

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
к дипломному проекту

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

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

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
к дипломному проекту

На тему: «Разработка системы автоматического регулирования тепловыми процессами  
при переработке нефти»

6В07103 – Автоматизация и роботизация

Выполнил



РЕЦЕНЗЕНТ  
PhD

Абжанова. Л.К.

(подпись)

«14» 06 2025 г.

Альмухамбетов А. К.

Научный руководитель  
канд. техн. наук

Ширяева О.И.  
(подпись)

«29» мая 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

6В07103 – Автоматизация и роботизация

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой АиУ  
канд. техн. наук

Сарсенбаев Н.С.

2025 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломного проекта**

Обучающемуся Альмухамбетову А. К.

Тема: «Разработка системы автоматического регулирования тепловыми процессами при переработке нефти».

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

Срок сдачи законченной работы: «25» мая 2025 г.

Исходные данные к проекту: принципиальная схема регулирования температуры.

Перечень подлежащих к разработке в дипломном проекте вопросов:

- а) описание технологической части;
- б) разработка структурной схемы системы автоматического управления;
- в) разработка функциональной схемы автоматизации системы управления процессом;
- г) расчетная часть;
- д) разработка программы управления.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

функциональная схема автоматизации трубчатой печи, структурная схема  
автоматизации трубчатой печи

Рекомендуемая основная литература:

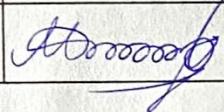
- 1 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Москва: Издательство Наука, 1975. – 759 с.
- 2 Ягудин М.Н. Тепловой и аэродинамический расчет трубчатых печей / М.Н. Ягудин. – Уфа: Издательство ГУП ИНХП РБ, 2008. – 210 с.
- 3 Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Физматлит, 2006. – 319 с.

**ГРАФИК**  
подготовки дипломного проекта

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологический раздел Описание процессов работы трубчатой печи	13.02.2025 г.	
Технологический раздел Разработка структурной схемы системы автоматического управления	06.03.2025 г.	
Технологический раздел Разработка функциональной схемы автоматизации системы управления процессом	28.03.2025 г.	
Расчетный раздел Анализ и синтез систем автоматического регулирования трубчатой печи	14.04.2025 г.	
Расчетный раздел Разработка алгоритма и программы управления системой трубчатой печи	25.05.2025	

**Подписи**

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

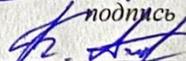
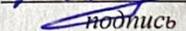
Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Технологический раздел	О. И. Ширяева канд. техн. наук	29.05	
Расчетный раздел	О. И. Ширяева канд. техн. наук	29.05	
Нормоконтролер	К. А. Манатов магистр техн. наук	05.06	

Научный руководитель



Ширяева О. И

Задание принял к исполнению обучающийся

  
подпись  
  
подпись

Альмухамбетов А. К.

Дата

«31» января 2025 г.

## АНДАТПА

Дипломдық жоба аясында мұнайды бастапқы айдау кезінде қолданылатын құбырлы пешті автоматты реттеу жүйесі жасалды. Жобаның технологиялық бөлімінде пештің мұнай өңдеу процесіндегі негізгі функциялары сипатталған, автоматтандыру объектісінің құрылымы талданған және оның жұмыс принципі сипатталған. Сондай-ақ, аппараттық бөлікті таңдау жасалды, бақылау мен басқарудың негізгі параметрлері анықталды, автоматтандырудың Функционалды және құрылымдық схемалары жасалды, олардың негізінде технологиялық процесті басқарудың автоматтандырылған жүйесінің құрылымы құрылды.

Жобаның екінші бөлігінде шығыс шикізатының температурасын басқаруды қамтамасыз ететін реттегішті синтездеу тәсілі іске асырылды. Жүйенің тұрақтылығы және оның өтпелі сипаттамаларының сапасы бойынша зерттеулер жүргізілді. Классикалық әдістерді де, генетикалық алгоритмді де қолдана отырып, реттегіш орнатылды, содан кейін әзірленген модель кейінірек енгізу үшін дискретті түрге ауыстырылды. Соңғы кезең ТИА portal ортасында бағдарламалық жасақтаманы енгізу болды, оның ішінде алгоритмді әзірлеу, аппараттық конфигурация, басқару логикасын жазу және оператор интерфейсін құру.

## АННОТАЦИЯ

В рамках дипломного проекта была разработана система автоматического регулирования трубчатой печи, применяемой при первичной перегонке нефти. В технологическом разделе проекта изложены основные функции печи в процессе нефтепереработки, проанализировано устройство объекта автоматизации и описан его принцип действия. Также выполнен выбор аппаратной части, определены ключевые параметры для контроля и управления, спроектированы функциональная и структурная схемы автоматизации, на основе которых построена структура автоматизированной системы управления технологическим процессом.

Во второй части проекта реализован подход к синтезу регулятора, обеспечивающего управление температурой выходного сырья. Проведены исследования устойчивости системы и качества её переходных характеристик. Выполнена настройка регулятора с использованием как классических методов, так и генетического алгоритма, после чего разработанная модель была переведена в дискретный вид для последующего внедрения. Финальным этапом стала реализация программного обеспечения в среде ТИА Portal, включая разработку алгоритма, конфигурацию оборудования, написание управляющей логики и создание интерфейса оператора.

## ABSTRACT

For my thesis, I developed an automatic control system for a tubular furnace used in primary oil distillation. The technical section of the project outlines the main functions of the furnace in the oil refining process, analyzes the structure of the automation object, and describes how it works. The hardware was selected, key parameters for control and management were determined, and functional and structural automation diagrams were designed, on the basis of which the structure of the automated process control system was built.

In the second part of the project, an approach to the synthesis of a regulator that controls the temperature of the output raw material was implemented. The stability of the system and the quality of its transient characteristics were investigated. The controller was tuned using both classical methods and a genetic algorithm, after which the developed model was converted into a discrete form for subsequent implementation. The final stage was the implementation of the software in the TIA Portal environment, including the development of the algorithm, equipment configuration, writing of the control logic, and creation of the operator interface.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Технологическая часть	8
1.1 Роль трубчатой печи в процессе нефтепереработки	8
1.2 Описание объекта автоматизации	9
1.3 Принцип работы трубчатой печи	10
1.4 Точки контроля, управления, регулирования и сигнализации трубчатой печи	11
1.5 Выбор аппаратной базы	14
1.6 Требования к системе управления трубчатой печью	17
1.7 Разработка функциональной схемы автоматизации	18
1.8 Структура автоматической системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) трубчатой печи	19
1.9 Разработка структурной схемы автоматизации	20
2 Синтез регулятора для автоматического регулирования температурой выходного сырья трубчатой печи	21
2.1 Постановка задачи для синтеза регулятора	21
2.2 Анализ устойчивости системы автоматического регулирования	26
2.3 Оценки качества переходного процесса замкнутой системы	27
2.4 Выбор и настройка регулятора	30
2.5 Настройка регулятора генетическим алгоритмом	34
2.6 Итоговая оценка динамических характеристик замкнутой системы	40
2.7 Преобразование из непрерывной в дискретную форму	42
3 Разработка программы системы управления трубчатой печи в среде TIA portal	45
3.1 Разработка алгоритма управления	45
3.2 Выбор и конфигурация оборудования	47
3.3 Разработка логики управления	48
3.4 Разработка интерфейса оператора	52
Заключение	57
Список использованной литературы	58
Приложение А	59
Приложение Б	60

## ВВЕДЕНИЕ

Цель дипломного проекта – разработка автоматизированной системы управления трубчатой печью для первичной перегонки нефти. Проект предусматривает создание комплексного решения контроля температурных режимов с применением современного программного обеспечения. Это включает визуализацию процессов, аварийное оповещение и хранение данных. Запланирована реализация ручного и автоматического режимов управления, а также интеграция с сервером баз данных для мониторинга и анализа ключевых параметров.

Актуальность этого исследования обусловлена необходимостью улучшения автоматизации и повышения надёжности трубчатых печей, являющихся ключевым звеном в первичной переработке нефти. В условиях строгих требований к точному контролю температур и безопасности оборудования, разработка современной системы на базе ПЛК способствует оптимизации, сокращению расхода энергии и уменьшению аварийных рисков.

Общая характеристика разработанного решения. В рамках данного проекта была создана система автоматического регулирования трубчатой печи, задействованной в первичном цикле переработки нефти. На начальном этапе был выполнен всесторонний анализ объекта автоматизации, включающий подробное описание его конструктивных особенностей, принципов функционирования и стратегической важности в технологической цепочке. Были идентифицированы и четко определены ключевые точки для контроля, оперативного управления, регулирования и аварийной сигнализации, что послужило основой для формирования функциональной и структурной схем управляющей системы. Параллельно осуществлялся подбор соответствующего аппаратного обеспечения, отвечающего всем установленным требованиям.

Для достижения максимальной достоверности математической модели управляемого объекта были задействованы методы как структурной, так и параметрической идентификации. На базе полученной модели был произведен тщательный анализ устойчивости системы, а также выполнен синтез регулятора с применением методики  $pidtune$  и генетического алгоритма. Разработанная система получила свою программную реализацию в среде TIA Portal. Она включает в себя логическую часть управления, интуитивно понятный операторский интерфейс и функционал для подключения к SQL-серверу, предназначенному для систематического хранения технологических данных.

Задачи для выполнения. Проведение детального описания технологического процесса; формирование точной математической модели объекта управления; выполнение анализа и проектирования системы автоматического регулирования; осуществление программной реализации управляющей системы с целью обеспечения её бесперебойного и высококачественного функционирования.

## 1 Технологическая часть

### 1.1 Роль трубчатой печи в нефтепереработке

Переработка нефти – это комплексный технологический процесс, цель которого состоит в трансформации сырой нефти в востребованные и ценные нефтепродукты. К таким продуктам относятся бензин, дизельное топливо, мазут, керосин, а также разнообразные нефтехимические компоненты. Нефтепереработка включает несколько последовательных стадий, среди которых ключевыми являются первичная дистилляция, последующая вторичная переработка и глубокая очистка полученных фракций.

Начальным этапом данного процесса является первичная перегонка нефти. В ходе этой стадии сырьё предварительно нагревается, после чего подаётся в ректификационные колонны для дальнейшего разделения на фракции. Компоненты с низкой температурой кипения, такие как керосин и бензин, испаряются при сравнительно невысоких температурах и отводятся с верхних уровней колонны. Более тяжёлые фракции, к примеру, мазут, конденсируются и собираются в нижней части установки. Перед поступлением в ректификационные колонны нефть подвергается предварительному нагреву в специализированных теплообменных аппаратах – трубчатых печах. Следовательно, печи служат важнейшим связующим звеном между сырой нефтью и начальной стадией её переработки.

Трубчатая печь представляет собой одно из ключевых устройств, используемых на этапе первичной нефтепереработки. Её главная функция заключается в доведении температуры исходного сырья до значений, при которых происходит интенсивное испарение углеводородов и их последующее разделение на различные фракции. Существуют два основных типа таких печей, выбор которых определяется конкретной стадией переработки: атмосферные и вакуумные. Атмосферная печь применяется для подогрева нефти перед её подачей в атмосферную ректификационную колонну, тогда как вакуумная предназначена для нагрева мазута перед его вакуумной дистилляцией. В рамках настоящего дипломного проекта используется именно атмосферная трубчатая печь, поскольку она размещена на начальном этапе производственного цикла – до стадии первичной перегонки. Её задача – нагреть нефть до определённого температурного диапазона, составляющего 340–370 °С. Благодаря такому подогреву перед колонной, сырьё эффективно разделяется на лёгкие и тяжёлые компоненты уже непосредственно в ректификационной колонне, избегая при этом глубокого термического разложения молекул.

Таким образом, атмосферная трубчатая печь выступает не только как первоначальный узел нагрева нефти, но и как жизненно важный элемент автоматизированной системы, от стабильной работы которой напрямую зависит общая эффективность всей установки первичной переработки [1].

## 1.2 Описание объекта автоматизации

Трубчатые печи являются высокотемпературным промышленным оборудованием, разработанным для эффективного нагрева разнообразных технологических сред. К таким средам относятся сырая нефть, природный газ или специализированные теплоносители. Нагрев происходит за счёт передачи тепловой энергии через стенки труб, расположенных внутри герметичного корпуса печи. В контексте нефтеперерабатывающей отрасли эти установки выполняют критически важную роль: они обеспечивают предварительный подогрев исходного сырья до строго определённой температуры перед его подачей на последующие стадии обработки. Это включает такие процессы, как дистилляция, гидроочистка, реформинг, а также различные виды термического или каталитического крекинга. Источником тепловой энергии для функционирования печи может служить как сжигание различных видов топлива (например, мазута, коксового газа или иных углеводородных смесей), так и электрический нагрев. Генерируемое тепло эффективно передаётся обрабатываемому продукту по трубам, находящимся в зоне интенсивного теплового воздействия. С точки зрения конструкции, печь разделена на две ключевые зоны. В радиационной части основная доля тепла передаётся путём инфракрасного излучения, исходящего от пламени горелок. Конвекционная зона, в свою очередь, предназначена для утилизации остаточных тепловых потоков отходящих дымовых газов, прежде чем они будут выведены из системы.

Для предотвращения критического перегрева и преждевременного износа оборудования жизненно важен непрерывный и точный контроль температурного режима. На отдельных участках внутри печи температура может достигать чрезвычайно высоких значений, вплоть до 1250–1300 °С. Превышение установленных температурных лимитов способно привести к серьёзным негативным последствиям: повреждению трубопроводов, разрушению внутренней огнеупорной футеровки, значительному увеличению эксплуатационных расходов и, как следствие, к нарушению стабильности и эффективности всего производственного процесса.

Конструкция трубчатой печи объединяет несколько основных функциональных элементов. Горелки обеспечивают оптимальное сгорание топлива и точную подачу воздуха, что позволяет поддерживать идеальный состав топливно-воздушной смеси. Теплообменные трубы, стратегически расположенные как в радиационной, так и в конвекционной зонах, выполняют основную функцию нагрева поступающей нефти. Внутри камеры сгорания протекает ключевой процесс горения и происходит первичная передача тепловой энергии. Дымовые и газовые каналы служат для эффективного отвода продуктов сгорания, способствуя одновременно снижению уровня токсичных выбросов в атмосферу. И, наконец, теплоизоляционные и конструкционные материалы применяются для надёжной защиты внутренних компонентов печи от экстремальных температурных воздействий и для минимизации потерь тепла [2].

Также общий вид трубчатой печи показан на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Общий вид трубчатой печи

### 1.3 Принцип работы трубчатой печи

Трубчатая печь – ключевое промышленное оборудование для нагрева жидких и газообразных сред. Нагрев происходит за счёт сжигания топлива в камере и теплопередачи через трубы. В нефтепереработке эти установки критически важны: они обеспечивают подогрев нефти до требуемой температуры перед дальнейшими этапами (дистилляция, гидроочистка, реформинг, крекинг). Принцип работы прост: тепло от горения передаётся продукту, циркулирующему внутри труб.

Центральный компонент конструкции – камера сгорания. Там сжигается топливо (природный газ, мазут), генерируя основное тепло. Горелки внутри камеры равномерно распределяют пламя. Это критично, так как трубчатый змеевик, по которому течёт продукт, проходит вдоль стенок и требует равномерного прогрева. В радиационной зоне тепло передаётся преимущественно излучением, обеспечивая самые высокие температуры. Помимо радиационной, в печи есть конвективная зона, обычно в верхней части. Здесь остаточное тепло дымовых газов также нагревает продукт, но уже за счёт движения газа мимо труб. Это позволяет эффективно утилизировать тепло, минимизируя потери. Для повышения КПД могут использоваться рекуператоры, "перехватывающие" часть тепла для подогрева воздуха или топлива.

В нашем проекте используется атмосферная трубчатая печь. Она размещена в начале техпроцесса – до колонны первичной перегонки нефти. Её задача, нагреть нефть до 340–370 °С. Температура нефти на входе может быть 100–150 °С, в

радиационной зоне 800–1200 °С, на выходе из змеевика около 350 °С. Важно, чтобы при этом происходило только испарение углеводородов, а не их разложение, для последующего разделения на фракции в ректификационной колонне.

Управление печью полностью автоматизировано. Системы контролируют подачу топлива, воздуха, состав газов, температуру и давление. Это обеспечивает стабильность, безопасность, минимизацию выбросов и сокращение расхода топлива. Запуск начинается с розжига горелок, затем следует постепенный нагрев. Продукт сначала проходит радиационную, затем конвективную секцию для догрева, после чего поступает в ректификационную колонну. Трубчатая печь – один из центральных элементов нефтепереработки; от её точной работы напрямую зависят эффективность и безопасность всей установки. Незначительные отклонения могут повлиять на качество продукции и стабильность процесса [2].

#### **1.4 Точки контроля, управления, регулирования и сигнализации трубчатой печи**

Трубчатая печь представляет собой технологическое оборудование для термической обработки, чья стабильность и надёжность функционирования обеспечиваются за счёт интегрированных комплексов автоматического контроля, управления, регулирования и сигнализации.

Система мониторинга позволяет оперативно отслеживать текущее состояние агрегата и ключевые рабочие параметры. Температурные показания регистрируются в трёх стратегических точках: на входе сырья (TIAR-01), внутри топочной камеры (TIARC-02) и на выходе нагретого продукта (TIAR-03). Это обеспечивает возможность мгновенного реагирования на любые отклонения – как в сторону перегрева, так и недогрева. Расход топлива контролируется прибором (FIAR-01) непосредственно перед его подачей в горелку, что гарантирует стабильность процесса горения. Дополнительно отслеживается положение клапанов: подачи сырья (ZI-01), топлива (ZIRC-02) и выхода нагретого потока (ZI-03), что предоставляет полную картину функционирования всей системы.

В составе модуля управления предусмотрены функции для настройки рабочих режимов печи. Команды управления формируются на основе данных, поступающих с датчиков температуры (TIAR-01, TIARC-02, TIAR-03) и датчика расхода топлива (FIAR-01). Инициирование розжига осуществляется нажатием кнопки (SB1), тогда как регулировка подачи нефти, топлива и готовой продукции производится сигналами положения клапанов (ZI-01, ZIRC-02, ZI-03).

Блок автоматического регулирования призван поддерживать заданные значения технологических параметров в строго допустимых пределах, предотвращая их выход за установленные рамки. Например, температура внутри печи (TIARC-02) напрямую влияет на степень открытия клапана VA02 через соответствующий управляющий сигнал (ZIRC-02).

Подсистема сигнализации оперативно оповещает оператора о любых отклонениях от нормативных показателей. Сигналы с датчиков температуры (TIAR-01, TIARC-02, TIAR-03), превышающие заданные пределы, активируют аварийные сообщения. При достижении критически высокой температуры срабатывает датчик (TAN-01), предупреждая о потенциальной аварийной ситуации. Также система отслеживает отклонения в расходе топлива (FIAR-01), низкий (LAL-01) или критически низкий уровень топлива, а также аномально низкое (PAL-01) или высокое (PAN-01) давление газа, что указывает на возможные неисправности. В случае угрозы оператор имеет возможность вручную остановить работу, активировав кнопку (SB2). Система аварийной остановки автоматически срабатывает при резком и значительном нарушении параметров. Например, при активации (TAN-01) автоматически отключается горелка, а при превышении допустимого давления газа (PAN-01) процесс немедленно останавливается для предотвращения повреждения оборудования. Комплексное взаимодействие всех интегрированных подсистем – контроля, регулирования, сигнализации и управления – гарантирует стабильную, безопасную и энергоэффективную работу трубчатой печи, значительно снижая вероятность аварий и повышая общую надежность всего технологического процесса.

Таблица 1.1 – Таблица сигналов контроля (Сигналы отображающие текущее состояние системы, но не управляют процессом.)

№	Наименование сигнала	Описание (Источник и назначение)	Диапазон измерений
1	TIAR-01 (Температура нефти)	Датчик перед клапаном VA01, контролирует температуру поступающего сырья.	100-150 °C
2	TIARC-02 (Температура в печи)	Измеряет температуру внутри печи FUR01 для контроля теплового режима.	800-1200 °C
3	TIAR-03 (Температура нагретого сырья)	Датчик после VA03, отслеживает качество нагрева сырья.	340-370 °C
4	FIAR-01 (Расход топлива)	Датчик перед VA02, измеряет количество подаваемого топлива.	0-1000 м <sup>3</sup> /ч (или кг/ч)
5	ZI-01 (Положение VA01)	Дискретный сигнал: открыт/закрыт клапан подачи сырья.	0/1 (открыт/закрыт)
6	ZIRC-02 (Положение VA02)	Аналоговый сигнал степени открытия клапана подачи топлива.	0-100 %
7	ZI-03 (Положение VA03)	Дискретный сигнал: открыт/закрыт клапан подачи сырья.	0/1 (открыт/закрыт)

Таблица 1.2 – Таблица сигналов управления (Сигналы управляющие работой оборудования.)

№	Наименование сигнала	Описание (Источник и назначение)	Диапазон измерений
1	SB1 (Запуск горелки)	Кнопка включения горелки.	Вкл./Выкл.
2	ZI-01 (Положение VA01)	Управление подачей сырья.	0/1 (открыт/закрыт)
3	ZIRC-02 (Положение VA02)	Управление подачей топлива.	0-100 %
4	ZI-03 (Положение VA03)	Управление подачей сырья	0/1 (открыт/закрыт)

Таблица 1.3 – Таблица сигналов регулирования (Сигналы участвующие в автоматическом регулировании процесса нагрева.)

№	Наименование сигнала	Описание (Источник и назначение)	Диапазон измерений
1	TIARC-02 (Температура внутри печи)	Формирует сигнал регулирования на VA02 (выпуск топлива).	800-1200 °C
2	ZIRC-02 (Положение VA02)	Выполнение команды подачи топлива.	0-100 %

Для обеспечения эффективного и безопасного управления трубчатой печью ключевое значение имеет надёжная работа подсистем сигнализации. Они служат важнейшим инструментом для оперативного выявления отклонений от параметров, способных привести к нештатным ситуациям или повреждению оборудования. Главная задача таких систем – незамедлительное информирование персонала о возникающих угрозах (например, превышение температурных лимитов, падение давления, неверный расход сырья). Эта мгновенная реакция позволяет не только предотвратить серьёзные поломки и дорогостоящий ремонт, но и обеспечить непрерывность и безопасность всего производственного цикла. Без эффективной системы оповещения риски возрастают, угрожая оборудованию и персоналу. Именно поэтому детальная проработка и мониторинг конкретных точек контроля сигнализации является неотъемлемой частью проекта.

Таблица 1.4 – Таблица сигналов сигнализации (Сигналы предупреждающие оператора о возможных неисправностях.)

№	Наименование сигнала	Описание (Источник и назначение)	Диапазон измерений
1	TIAR-01, TIARC-02, TIAR-03	Температурные сигналы, выход за пределы вызывает тревогу.	0-1200 °С
2	ТАН-01 (Критический перегрев)	Сигнализирует о превышении предельно допустимой температуры.	> 1250 °С
3	FIAR-01 (Расход топлива)	Сигнализирует о слишком большом или малом расходе топлива.	0-1000 м <sup>3</sup> /ч (или кг/ч)
4	LAL-01 (Уровень топлива)	Предупреждает о критически низком уровне топлива.	0-10% от максимума
5	PAL-01 (Низкое давление газа)	Сигнал о падении давления ниже безопасного уровня.	0-2 атм.
6	PAH-01 (Высокое давление газа)	Сигнал о превышении допустимого давления.	> 6 атм.
7	SB2 (Авар. откл)	Ручное отключение системы в случае аварии.	Выкл.

### 1.5 Выбор аппаратной базы

Для эффективной автоматизации процессов трубчатых печей была выбрана высоконадёжная аппаратная платформа Siemens. Она зарекомендовала себя исключительной точностью, стабильностью функционирования и устойчивостью к работе в сложных промышленных условиях. В основе разработанной системы лежит контроллер SIMATIC S7-1500, модель CPU 1513-1 PN, отличающийся впечатляющей скоростью обработки команд (примерно 40 нс) и полной совместимостью с такими протоколами, как Profinet, Profibus и HART. Это обеспечивает бесперебойную интеграцию со всеми периферийными устройствами. К центральному процессору подключаются различные модули ввода/вывода: SM 331 (8 AI) – для приёма аналоговых сигналов от датчиков давления, температуры и расхода; SM 332 (4 AO) – предназначен для управления исполнительными механизмами; а также SM 321 (16 DI) и SM 322 (16 DO) – отвечающие за обработку дискретных сигналов.

Питание всей системы осуществляется от блока питания SITOP PSU100 мощностью 120 Вт. Он гарантирует стабильное выходное напряжение 24 В и надёжную защиту оборудования от коротких замыканий и резких скачков напряжения, что делает его оптимальным выбором для длительной и непрерывной

промышленной эксплуатации.

Регулирование температурных показателей в различных зонах системы производится с использованием специализированных датчиков, подключенных к преобразователям SITRANS TH320. Эти преобразователи характеризуются высокой точностью (до 0,1% от полного диапазона измерений) и совместимостью с протоколом HART, что обеспечивает возможности для удалённой диагностики и оперативной настройки. На участках входа и выхода сырья задействованы датчики сопротивления RTD (Pt100), способные с высокой степенью достоверности измерять температуру в диапазоне от 0 до 600 °С. Это критически важно для постоянного контроля температур сырья и продукта. В зоне горения, где температуры наиболее высоки, установлена термопара S-типа (платина-родий) SITRANS TS500, передающая данные через тот же преобразователь TH320. Термопара обеспечивает измерения в диапазоне от 0 до +1600 °С и демонстрирует исключительную стабильность и точность даже при длительной непрерывной эксплуатации. Эти качества делают её идеальной для применения в агрессивных средах при температурах 800–1200 °С. Данный датчик регистрирует состояние зоны горения, где требуется максимальная точность, в то время как другие температурные датчики контролируют вход и выход сырья, обеспечивая безопасность процесса и стабильность качества конечной продукции.

Мониторинг перегрева осуществляется посредством температурного реле SITRANS TSH200, который функционирует в паре с термопарой S-типа (платинородий-платина). Эта комбинация обеспечивает точное фиксирование превышения критического температурного порога, например, 1300 °С, гарантируя мгновенную и надёжную реакцию управляющей системы. Благодаря прочной конструкции и устойчивой изоляции, устройство сохраняет полную работоспособность даже в условиях интенсивной вибрации и значительных термических нагрузок, выступая в качестве одного из важнейших элементов промышленной безопасности. Измерение давления производится беспроводными манометрами SITRANS P280 (PIC), размещёнными как внутри печи, так и на её выходе. Они способны измерять давление до 30 бар с высокой точностью (0,075 %) и передают данные по беспроводной технологии WirelessHART, что устраняет необходимость в прокладке кабельных линий в полевых условиях. Для учёта расхода топлива применён ультразвуковой расходомер (FIC) SITRANS FC430, обеспечивающий точность  $\pm 0,5\%$  и класс защиты IP67. За счёт цифровой фильтрации он невосприимчив к помехам и изменениям давления, а встроенная самодиагностика делает его высоконадёжным прибором для непрерывного контроля. Вибрационный сигнализатор уровня Siemens SITRANS LVL200, основанный на принципе изменения резонансной частоты вибрирующего зонда при контакте с жидкостью, позволяет избежать ошибок, связанных с образованием пены или загрязнением поверхности. Его высокая надёжность, нечувствительность к изменению свойств среды (плотности, вязкости) и степень защиты IP68 делают его оптимальным решением для контроля минимального уровня топлива в агрессивных условиях эксплуатации.

Регулирование теплового режима в трубчатой печи реализуется через

горелку, которая управляется аналоговым сигналом 4–20 мА. Это обеспечивает стабильность подачи топлива и автоматическое поддержание заданной температуры. Контроль данного процесса осуществляется посредством температурного датчика TIARC-02 и реле ТАН-01, что сводит к минимуму необходимость постоянного вмешательства оператора.

Управление тепловыми параметрами в трубчатой печи выполняется с помощью горелки, выступающей в роли исполнительного устройства, на которое подаётся аналоговый сигнал в диапазоне от 4 до 20 мА. Такой подход позволяет максимально точно дозировать подачу топлива и устойчиво поддерживать необходимую температуру в рабочей зоне, исключая потребность в постоянном присутствии оператора. Мониторинг осуществляется через температурный датчик TIARC-02.

Для обеспечения контролируемой подачи топлива был выбран регулирующий клапан VXG41, управляемый электрогидравлическим приводом Siemens SKB62. Данный привод, по сути являющийся мощным мотор-редуктором, отличается высоким усилием позиционирования (2800 Н), точным аналоговым управлением и надежной работой. Его электрогидравлический принцип обеспечивает плавное и стабильное перемещение клапана, что критически важно для точного дозирования топлива и поддержания устойчивости к значительным перепадам давления. Функционал пружинного возврата дополнительно гарантирует безопасность при потере питания. Все эти характеристики делают SKB62 высокоэффективным решением для работы с нефтью в составе системы регулирования температуры трубчатой печи.

На входе нефти в печь также установлен клапан VXG41. Для управления потоком жидкости при относительно низких температурах и умеренном давлении оптимально подходит электромоторный привод Siemens SAX81.03 (или SAX81.00). Этот привод, также являющийся мотор-редуктором, обеспечивает надежное полное открытие или закрытие клапана по дискретному сигналу, что делает его идеальным для дозированной подачи нефти на начальном этапе.

Выход продукта из печи управляется клапаном VVF61.100-450K. Для его эффективной работы при высоких температурах (до 370 °С) и обеспечения стабильной работы даже в агрессивной среде, применен мощный электрогидравлический привод Siemens SKC82. Этот мотор-редуктор специально разработан для клапанов с большим ходом штока и высоким усилием, обеспечивая надежное и быстрое открытие/закрытие потока, что критически важно для безопасной и контролируемой передачи нагретой нефти в последующую ректификационную колонну.

Для повышения уровня безопасности вокруг печи установлена аварийная кнопка SIRIUS 3SU1-1AA20 (SB2). Она оснащена механическим фиксатором и визуальной сигнализацией, что позволяет оператору мгновенно остановить весь процесс в случае возникновения чрезвычайной ситуации.

Реализация автоматизации в рамках данного дипломного проекта базировалась на использовании программного пакета TIA Portal Base от Siemens. Этот комплекс предоставляет полный набор инструментов, необходимых для

проектирования логики управления, программирования ПЛК S7-1500 и интеграции со всеми сопутствующими устройствами. Он поддерживает детальную настройку как исполнительных механизмов, так и датчиков, а также обеспечивает полноценный мониторинг и диагностику всей системы в режиме реального времени. Применение данного программного обеспечения значительно улучшает совместимость компонентов и существенно упрощает весь процесс разработки, что крайне важно при управлении сложными тепловыми процессами в нефтехимической промышленности.

Визуализация текущего состояния и взаимодействие с системой были успешно реализованы с помощью операторской панели SIMATIC HMI KTP700 от Siemens. Эта панель оснащена высокочувствительным сенсорным экраном с интуитивно понятным интерфейсом и превосходным качеством изображения. Она идеально подходит для визуализации ключевых параметров в реальном времени, таких как температура и степень открытия клапана подачи топлива. Возможности панели включают отображение графиков, трендов и других важных данных, что в сочетании с контроллером Siemens обеспечивает удобство анализа процессов и оперативность принятия решений. В данном проекте SIMATIC KTP700 гарантирует безопасную визуализацию и эффективный контроль над тепловыми режимами.

## **1.6 Требования к системе управления трубчатой печью**

Система автоматического управления трубчатой печью создана для обеспечения точного соответствия технологических параметров заданным значениям, гарантируя безопасное и стабильное функционирование оборудования. Регулирование процесса осуществляется на основе непрерывного поступления данных от измерительных датчиков. Эти сигналы обрабатываются программируемым логическим контроллером (ПЛК), который, в свою очередь, генерирует и направляет команды управления на исполнительные устройства – к ним относятся клапаны, приводы заслонок и горелки. Подобное взаимодействие обеспечивает стабильное протекание процесса горения и эффективную передачу тепловой энергии. Программное обеспечение, лежащее в основе системы, должно успешно реализовывать комплексные алгоритмы управления, осуществлять непрерывный контроль состояния оборудования, производить регистрацию всех значимых параметров и оперативно реагировать на любые отклонения от установленного нормального режима.

Управляющая система должна отвечать ряду ключевых характеристик, среди которых – интуитивно понятный интерфейс для оператора, высокая устойчивость к внешним воздействиям, возможность интеграции с системами более высокого уровня, а также наличие автоматического и ручного режимов работы. Одной из важнейших функций является точное дозирование топлива. Это не только способствует существенному снижению выбросов токсичных веществ в окружающую среду, но и значительно продлевает срок службы

эксплуатируемого оборудования.

Интерфейс оператора обязан предоставлять полную визуализацию всех критически важных параметров в режиме реального времени, возможность оперативного изменения настроек, а также чёткую сигнализацию о неисправностях. Особое внимание в разработке системы уделено строгому соблюдению правил промышленной безопасности. Система управления должна непрерывно отслеживать перегрев труб, заблаговременно предупреждать о снижении давления в камере сгорания, контролировать избыточное давление на выходе дымовых газов и сигнализировать о недостаточном уровне топлива. Всё это обеспечивает своевременное предотвращение потенциальных аварийных ситуаций, гарантируя тем самым стабильное и бесперебойное функционирование агрегата в ходе всего технологического процесса.

## **1.7 Разработка функциональной схемы автоматизации**

Схемы автоматизации играют фундаментальную роль в процессе проектирования систем управления технологическими процессами, выступая в качестве ключевого технического документа, который детализирует структуру и логику работы всей системы. Эти схемы содержат исчерпывающую информацию о задействованном оборудовании, принципах его взаимодействия и способах связи с управляемым объектом. Кроме того, в них наглядно представлены все средства автоматизации, включая удалённые устройства и вычислительные компоненты, что формирует полное и целостное представление о функционировании всей системы управления.

Функциональная схема автоматизации представляет собой графическое изображение основных компонентов системы и их взаимосвязей. Каждый элемент на такой схеме обозначается стандартизованными графическими символами, иллюстрируя, каким образом отдельные устройства обмениваются сигналами и совместно реализуют заданные алгоритмы управления. Подобная схема не только упрощает понимание общей структуры системы, но и позволяет чётко определить маршруты прохождения сигналов, их конкретное назначение, а также существенно облегчает процессы наладки, текущего обслуживания и последующей модернизации оборудования.

Процесс разработки схем автоматизации строго регламентирован и основан на соблюдении действующих нормативных требований. Это включает государственные стандарты, строительные нормы и правила, а также соответствующие технические регламенты. Помимо этого, в процессе проектирования непременно учитываются общепринятые стандартные практики и накопленный практический опыт, полученный при реализации аналогичных инженерных решений. Готовая схема (см. Приложение А) должна в полной мере соответствовать всем предъявляемым требованиям, обеспечивая корректное и бесперебойное функционирование всех элементов управляющей системы в предложенной архитектуре [3].

## 1.8 Структура автоматической системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) трубчатой печи

Автоматическая система управления технологическим процессом (АСУ ТП) трубчатой печи представляет собой иерархически организованный комплекс, предназначенный для эффективного и безопасного контроля над процессом термообработки. Её ключевое назначение – обеспечение автоматического регулирования параметров, непрерывного мониторинга состояния всего оборудования и оперативного реагирования на любые отклонения от заданных режимов. Архитектура системы реализована по трёхуровневому принципу, который включает нижний (полевой), средний (шкаф управления) и верхний (информационно-управляющий) уровни. Каждый из этих уровней выполняет строго определённые задачи в рамках общей интегрированной системы.

Нижний уровень включает первичные измерительные приборы и исполнительные механизмы, напрямую подключенные к технологическому оборудованию. Датчики, стратегически расположенные по всей установке, осуществляют непрерывное измерение таких критически важных параметров, как температура на различных этапах процесса, давление на входе и выходе газа, а также расход и уровень топлива. Эти данные жизненно необходимы для поддержания стабильной работы печи в заданных технологических условиях. Исполнительные механизмы и регулирующие клапаны функционируют как устройства, модулирующие подачу сырья и топлива в точном соответствии с текущими технологическими требованиями.

Средний уровень реализован в виде шкафа управления, который служит своего рода интерфейсом между полевыми устройствами и операторским персоналом. В нём размещается программируемый логический контроллер (ПЛК). Он получает данные от датчиков, обрабатывает их согласно заранее определённым алгоритмам и передаёт управляющие команды исполнительным устройствам. Контроллер эффективно работает как с аналоговыми, так и с дискретными сигналами через соответствующие модули ввода-вывода. Кроме того, этот уровень включает в себя комплекс устройств защиты и сигнализации, например, аварийные блоки и реле, обеспечивающие повышенную безопасность функционирования оборудования в случае нарушения заданных технологических параметров.

Верхний уровень включает специализированное программное обеспечение SCADA и автоматизированную рабочую станцию оператора. Основные цели этого уровня – визуализация технологического процесса, всесторонний анализ и надёжное хранение информации, а также возможность управления системой в режиме реального времени. SCADA-система отображает текущие рабочие параметры на интерактивных графических панелях, ведёт архивы данных и генерирует отчёты, а также своевременно предупреждает о возникновении нештатных ситуаций. Через рабочую станцию оператор может непрерывно контролировать текущую обстановку, изменять настройки, просматривать историю событий и, при необходимости, переключаться на ручной режим

управления.

Таким образом, архитектура АСУ ТП трубчатой печи направлена на обеспечение полного цикла управления производственным процессом – от первичного сбора измеряемых данных до принятия решений и глубокого анализа. Каждый уровень строго выполняет свои специфические функции: измерение и начальный контроль осуществляются на нижнем уровне; обработка информации и реализация алгоритмов – на среднем; анализ и управление – на верхнем. Подобный подход позволяет добиться высокой точности управления, минимизировать вероятность возникновения неисправностей, значительно повысить общую надёжность системы и улучшить ключевые технико-экономические показатели всей установки.

## **1.9 Разработка структурной схемы автоматизации**

Структурная схема автоматизации – это графическое представление АСУ ТП. На ней показаны ключевые элементы, их взаимодействие и способы передачи информации. Схема помогает понять распределение функций, сбор и обработку данных, а также выполнение управляющих действий. Она – ценный аналитический инструмент для исследования производительности системы, упрощающий настройку, диагностику и обслуживание.

Информация от технологического оборудования поступает в систему управления в виде аналоговых и дискретных сигналов. Датчики температуры (TIAR–01, TIARC–02, TIAR–03) и расхода топлива (FIAR–01) генерируют аналоговые сигналы 4–20 мА. Эти сигналы отражают текущее состояние процесса и служат основой для анализа. Дискретные сигналы поступают с панелей управления (SB1, SB2), от индикаторов давления (PAH–01, PAL–01) и уровня (LAL–01), контролируемых нештатные и аварийные состояния.

Все входные сигналы направляются на программируемый логический контроллер (ПЛК) с центральным процессорным блоком (ЦП). ЦП обрабатывает информацию по заранее запрограммированным алгоритмам. По результатам анализа формируются управляющие сигналы, передаваемые выходными модулями ПЛК на исполнительные устройства – электромагнитные клапаны (VA01, VA02, VA03). Они регулируют подачу топлива, воздуха и других сред, поддерживая заданные режимы.

Для визуального контроля и управления процессом используется автоматизированная рабочая станция оператора, доступ к которой осуществляется через промышленную сеть Ethernet. Интерфейс отображает актуальные параметры, принимает сигналы тревоги, сохраняет данные и позволяет устанавливать настройки. Оператор может наблюдать за процессом, изменять параметры и оперативно реагировать на нештатные ситуации.

Подробное графическое отображение базовой структуры системы, включая элементы, соединения и направление сигналов, представлено в Приложении Б.

## 2 Синтез регулятора для автоматического регулирования температурой выходного сырья трубчатой печи

### 2.1 Постановка задачи для синтеза регулятора

В рамках данного проекта формулируется задача по разработке регулятора для системы автоматического регулирования температуры трубчатой печи. Цель данного синтеза заключается в обеспечении требуемой стабильности и точности температурного режима путём эффективного регулирования подачи топлива. Учитывая, что температура материала на выходе напрямую воздействует на эффективность технологического процесса и безопасность эксплуатируемого оборудования, становится очевидной необходимость создания автоматизированной системы регулирования, способной компенсировать влияние различных внешних и внутренних возмущающих факторов, включая колебания свойств исходного сырья и присущую регулируемому объекту инерцию.

Для достижения поставленных целей необходимо разработать алгоритм управления, который сможет поддерживать температуру в допустимых пределах, оперативно реагировать на её отклонения от заданного значения и соответствовать предъявляемым требованиям к качеству переходных процессов. Опираясь на детально разработанную математическую модель управляемого объекта, проводится всестороннее исследование динамики системы, что позволяет обоснованно выбрать метод синтеза регулятора, обеспечивающий достижение желаемых прямых оценок и критериев качества. Функциональная схема управления – это логически структурированное графическое представление, отражающее основные узлы системы и принципы их взаимодействия. Она включает в себя блоки управления, измерительные приборы (датчики), сами регуляторы, исполнительные механизмы и источники помех. Такая схема позволяет визуализировать внутреннюю структуру системы, чётко определить пути прохождения сигналов, а также выделить доминирующие узлы, оказывающие ключевое влияние на точность и стабильность процесса регулирования. (Пример функциональной схемы представлен на рисунке 2.1.) По своей сути, функциональная схема служит основой для построения моделей управления и обоснованного выбора методов, направленных на достижение оптимального поведения системы в реальных технологических процессах.

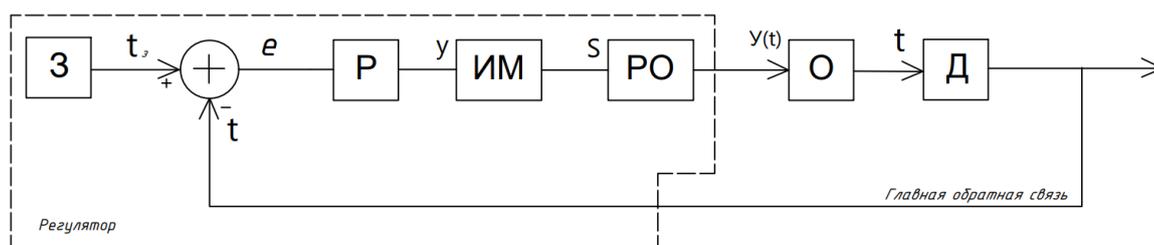


Рисунок 2.1 – Общий вид функциональной схемы управления

Ниже приведено описание звеньев функциональной схемы управления:

- З – устройство, которое формирует требуемое установочное значение регулирующей величины ( $t_3$ );
- Д – датчик (термопара, терморезистор или термометр сопротивления);
- Р – регулятор;
- ИМ – исполнительный механизм (клапаны, приводы заслонок);
- РО – регулирующий орган (заслонки, вентили);
- О – объект регулирования (печь);
- У – регулирующее (управляющее) воздействие;
- S – физическое воздействие (положение);
- t – регулируемый параметр;
- $e = t - t_3$  ошибка, возникает при отклонении параметра от задания;
- $t_3$  – заданное значение регулируемого (управляемого) параметра.

Анализ функциональной схемы автоматического регулирования температуры (см. рисунок 2.2) позволяет чётко идентифицировать ключевые контуры управления и каналы обратной связи. Это, в свою очередь, даёт возможность обоснованно подойти к выбору и последующей настройке регулятора. Опираясь на данное структурное представление, можно переходить к этапу математического моделирования всей системы, а также определять стратегии управления, направленные на обеспечение высокой стабильности температурных режимов в рамках технологических процессов нефтепереработки.



Рисунок 2.2 – Функциональная схема автоматического регулирования температурой

Представленная функциональная схема автоматического регулирования температурой (см. рисунок 2.2) наглядно иллюстрирует структуру системы. На ней отображены ключевые элементы контура: объект управления (печь), измерительный преобразователь (датчик), регулятор и исполнительный механизм (двигатель с редуктором и клапан), регулирующей подачу топлива. Анализ данного структурного представления послужит основой для дальнейшего этапа – поэлементного расчета передаточных функций и построения соответствующей структурной схемы, необходимой для исследования динамических характеристик системы и синтеза регулятора. Именно точность математической модели, полученной на основе этой

функциональной схемы, позволит провести полноценный анализ устойчивости, качества переходных процессов и эффективности регулятора до этапа физической реализации.

Линеаризованные уравнения элементов системы имеют вид.

Двигатель с редуктором:

$$T_{\text{ДВ}} \cdot \frac{d^2\mu}{dt^2} + \frac{d\mu}{dt} = k_{\text{ДВ}} \cdot u_y, \quad (2.1)$$

где  $\mu$  – перемещение клапана (%);  
 $T_{\text{ДВ}}$  – постоянная времени двигателя с редуктором (сек);  
 $k_{\text{ДВ}}$  – коэффициент передачи двигателя с редуктором (о.е.);  
 $u_y$  – управляющее напряжение (В).

Клапан:

$$y(t) = k_{\text{к}} \cdot \mu(t), \quad (2.2)$$

где  $y(t)$  – расход топлива (м<sup>3</sup>/ч);  
 $k_{\text{к}}$  – коэффициент передачи клапана (о.е.).

Печь:

$$T_0 \cdot \frac{d}{dt} t + t = k_0 \cdot y(t) - k_1 \cdot f, \quad (2.3)$$

где  $t$  – температура печи (регулируемая величина) (°С);  
 $T_0$  – постоянная времени (сек);  
 $k_0$  – коэффициент передачи от управляющего воздействия (перемещения клапана) к температуре печи (о.е.);  
 $k_1$  – коэффициент передачи от возмущения к температуре печи (о.е.);  
 $f$  – возмущение (о.е.).

Термопара:

$$T_{\text{ТП}} \frac{dt_{\text{изм}}}{dt} + t_{\text{изм}} = k_{\text{ТП}} \cdot t, \quad (2.4)$$

где  $t_{\text{изм}}$  – измеренная температура (°С);  
 $T_{\text{ТП}}$  – постоянная времени термопары (сек);  
 $k_{\text{ТП}}$  – коэффициент передачи термопары (о.е.).

Таблица 2.1 - Исходные данные для уравнений

№	$T_0$	$k_0$	$k_1$	$k_K$	$T_{ТП}$	$k_{ТП}$	$T_{ДВ}$	$k_{ДВ}$	$f$
	с	-/см	-/см	В/-	о.е.	о.е.	с	см/Вс	см
1	1,8	4,5	1,5	0,9	0,02	15	0,04	0,15	$2\sin 2t$

Следовательно передаточные функции элементов АСУ ТП печи имеют вид:

Двигатель с редуктором(звено интегрирования с замедлением):

$$G_{ДВ}(s) = \frac{k_{ДВ}}{T_{ДВ}s^2+s} = \frac{0,15}{0,04s^2+s}. \quad (2.5)$$

Клапан (пропорциональное звено):

$$G_K(s) = k_K = 0,9. \quad (2.6)$$

Печь(апериодическое звено 1-го порядка):

$$G_0(s) = \frac{k_0}{T_0s+1} = \frac{4,5}{1,8s+1}. \quad (2.7)$$

Термопара(апериодическое звено 1-го порядка):

$$G_{ТП}(s) = \frac{k_{ТП}}{T_{ТП}s+1} = \frac{15}{0,02s+1}. \quad (2.8)$$

Основываясь на определенных линеаризованных математических моделях и передаточных функциях для каждого элемента системы регулирования температуры трубчатой печи, теперь можно построить структурную схему разомкнутой системы управления. Эта схема будет представлена на рисунке 2.3 и является следующим шагом в анализе динамических характеристик объекта управления.

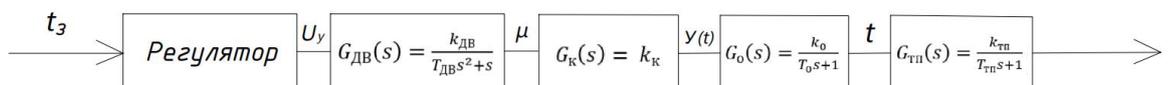


Рисунок 2.3 – Структурная схема разомкнутой системы автоматического регулирования (САР)

Передаточная функция разомкнутой системы:

$$G_{pc} = G_{дв} \cdot G_k \cdot G_o \cdot G_{тп}. \quad (2.9)$$

Подставляем передаточные функции:

$$G_{pc} = \frac{4.5}{1.8s+1} \cdot 0.9 \cdot \frac{15}{0.02s+1} \cdot \frac{0.15}{0.04s^2+s}. \quad (2.10)$$

Следовательно передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$G_{pc} = \frac{9.112}{0.00144s^4 + 0.1088s^3 + 1.86s^2 + s}.$$

Теперь мы можем представить структурную схему замкнутой системы автоматического регулирования (САР), которая будет отражать взаимодействие всех звеньев, включая обратную связь. Эта схема показана на рисунке 2.4.

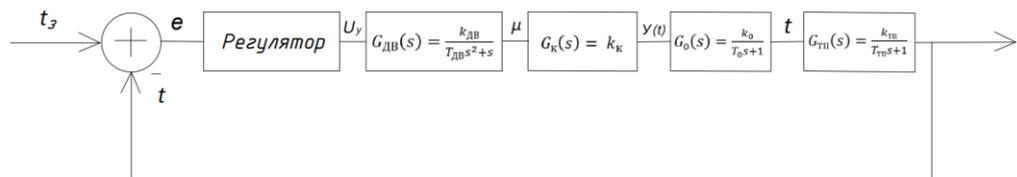


Рисунок 2.4 – Структурная схема разомкнутой системы автоматического регулирования (САР)

Передаточная функция замкнутой системы:

$$G_{зс}(s) = \frac{G_{pc}(s)}{1 + G_{pc}(s)}. \quad (2.11)$$

Следовательно, передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

$$G_{зс} = \frac{9.112}{0.00144s^4 + 0.1088s^3 + 1.86s^2 + s + 9.112}.$$

**Постановка задачи.** Основываясь на разработанной математической модели замкнутой системы контроля температуры трубчатой печи и определённых требованиях к качеству процесса, ключевая задача состоит в синтезе типового регулятора для стабилизации температуры, действующего по принципу обратной связи. Основными критериями для этого регулятора являются обеспечение устойчивости всей замкнутой системы, достижение необходимой динамики отклика, а также его эффективное функционирование в рамках технологического процесса.

## 2.2 Анализ устойчивости системы автоматического регулирования

Для изучения динамических особенностей управляемого объекта была получена передаточная функция. Она демонстрирует взаимосвязь между управляющим воздействием на входе и откликом системы на выходе. Эта математическая модель характеризует динамику объекта в частотной области и служит теоретическим фундаментом для проведения анализа и разработки системы автоматического регулирования.

Моделируя систему в MATLAB были рассчитаны полюса указанные на рисунке 2.5.

```
>> G = tf([9.122],[0.00144 0.1088 1.86 1 0])
G =
          9.122
-----
0.00144 s^4 + 0.1088 s^3 + 1.86 s^2 + s
Continuous-time transfer function.

>> pole(G)
ans =
         0
    -50.0000
    -25.0000
    -0.5556
```

Рисунок 2.5 – Математическая модель и полюса исследуемой системы

В соответствии с критериями устойчивости Ляпунова, динамическое поведение системы можно охарактеризовать следующим образом. Асимптотически устойчивой система считается тогда, когда все корни её характеристического уравнения (именуемые полюсами) расположены исключительно в левой полуплоскости комплексной плоскости, то есть обладают отрицательными действительными частями. Если же обнаруживается хотя бы один корень с положительной действительной частью, система признаётся неустойчивой. Особый случай возникает, когда один из полюсов равен нулю, при этом остальные находятся в левой полуплоскости – в такой конфигурации система демонстрирует нейтральную устойчивость, и окончательная оценка её поведения требует дополнительного анализа.

Проведённый анализ полюсов полученной математической модели выявил присутствие одного нулевого значения при отрицательных действительных частях у всех остальных корней. Это обстоятельство указывает на пограничное состояние устойчивости и требует более глубокого изучения.

Была построена и впоследствии проанализирована модель переходного процесса для разомкнутой системы, результаты которой представлены на рисунке 2.6. На графике чётко видно, что выходной сигнал не только не достигает стабилизации, но и продолжает неограниченно возрастать во времени. Такое поведение однозначно свидетельствует о неустойчивости системы в её текущей открытой конфигурации.

В связи с этим возникает острая необходимость во введении обратной связи и последующем синтезе системы автоматического регулирования с замкнутым контуром. Это позволит обеспечить устойчивость, эффективно ограничить амплитуду выходного сигнала и гарантировать надёжную и стабильную работу системы.

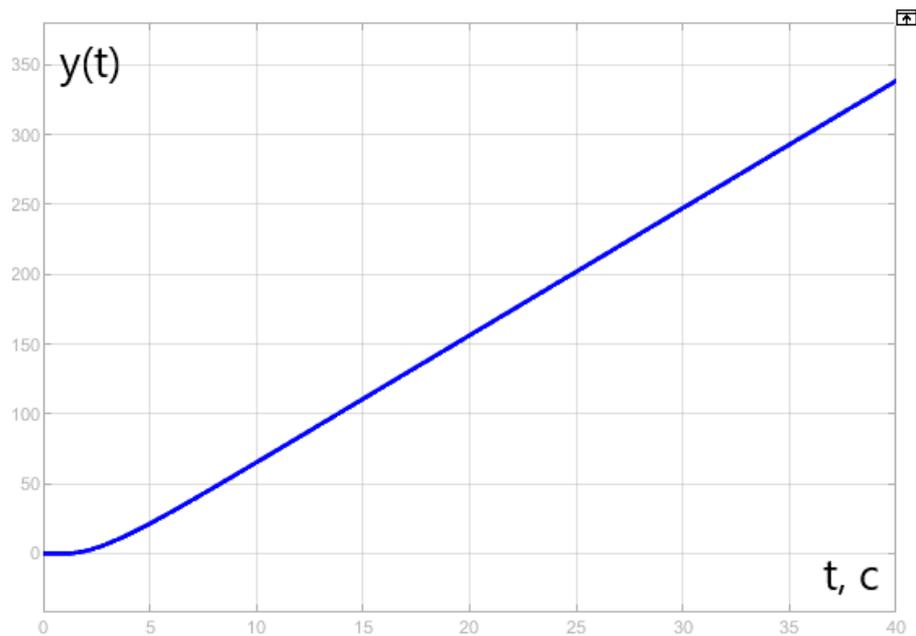


Рисунок 2.6 – Переходной процесс разомкнутой системы

### 2.3 Оценки качества переходного процесса замкнутой системы

Анализ качества переходного процесса предоставляет возможность оценить динамические свойства системы автоматического управления. Для проведения такой оценки основное внимание фокусируется на следующих ключевых характеристиках (см. рисунок 2.8).

Время установления ( $T_{set}$ ) – это временной промежуток, в течение которого значение выходного сигнала достигает и удерживается в пределах допустимого отклонения от своего установившегося значения. Как правило, в качестве ориентира для такого допустимого отклонения принимаются значения  $\pm 2\%$  или  $\pm 5\%$  от установившегося состояния.

Перерегулирование ( $P_{ov}$ ) – является показателем, характеризующим величину превышения выходного сигнала над его конечным установившимся

значением. Данный параметр выражается в процентах и служит свидетельством колебательного характера процесса. Его расчёт производится по соответствующей формуле с учётом максимального отклонения выходного значения, наблюдаемого в процессе перехода к установившемуся состоянию.

$$P_{ov} = \frac{Y_{max} - Y_{ss}}{Y_{ss}}, \quad (2.12)$$

где  $Y_{max}$  – максимальное значение отклика.

Число колебаний ( $M$ ) – это количество завершённых колебательных циклов, которые выходная переменная совершает до момента достижения системой своего устойчивого состояния. Этот параметр служит для оценки степени выраженности колебательного характера переходного процесса и общего динамического поведения системы.

Коэффициент колебательности ( $\mu$ ) описывает затухание колебаний и определяется как процентное соотношение разности между двумя последовательными пиковыми значениями выходной величины и первым максимумом. Этот показатель отражает скорость уменьшения амплитуды колебаний в ходе перехода к установившемуся состоянию.

$$\mu = \frac{\Delta y_{max2}}{\Delta y_{max1}} \cdot 100\%, \quad (2.13)$$

где  $\Delta y_{max1}$ ,  $\Delta y_{max2}$  – амплитуды последовательных колебаний.

Частота колебаний ( $\omega_{osc}$ ) характеризует скорость колебательного движения выходного сигнала в процессе перехода. Этот параметр определяет, как часто происходят колебания за единицу времени. Частота колебаний непосредственно связана с их периодом и может быть выражена через него с использованием следующего соотношения.

$$\omega_{osc} = \frac{2\pi}{T}, \quad (2.14)$$

где  $T$  – период колебаний.

Установившаяся ошибка ( $\varepsilon_{ss}$ ) – это разница между установившимся значением выходной величины и требуемым значением:

$$\varepsilon_{ss} = |y_{уст} - y_{зад}|, \quad (2.15)$$

где  $y_{зад}$  – желаемое установившееся значение. Данный показатель важен для оценки точности системы.

Время достижения первого максимума ( $T_{max}$ ) – это временной интервал, в течение которого выходной сигнал впервые достигает своего максимального значения после управляющего воздействия на вход системы. Этот параметр используется для оценки оперативности отклика системы на управляющее воздействие.

Время нарастания ( $T_R$ ) – описывает интервал времени, за который выходной параметр увеличивается от 10% до 90% от установившегося уровня. Этот показатель отражает быстродействие системы и может быть вычислен на основе характеристик передаточной функции модели.

Декремент затухания ( $X$ ) – представляет собой величину, показывающую, с какой скоростью снижается амплитуда колебаний в переходном процессе. Он определяется как натуральный логарифм отношения амплитуд двух последовательных пиков колебательной составляющей выходного сигнала.

$$X = \frac{|y_{max1} - y_{ss}|}{|y_{max2} - y_{ss}|}, \quad (2.16)$$

где  $y_{max1}$ ,  $y_{max2}$  – последовательные амплитуды отклика используются для определения декремента затухания, который показывает, насколько быстро уменьшаются колебания выходного сигнала. Этот показатель связан с логарифмическим декрементом, применяемым для оценки устойчивости системы: чем он больше, тем быстрее затухают колебания и выше устойчивость.

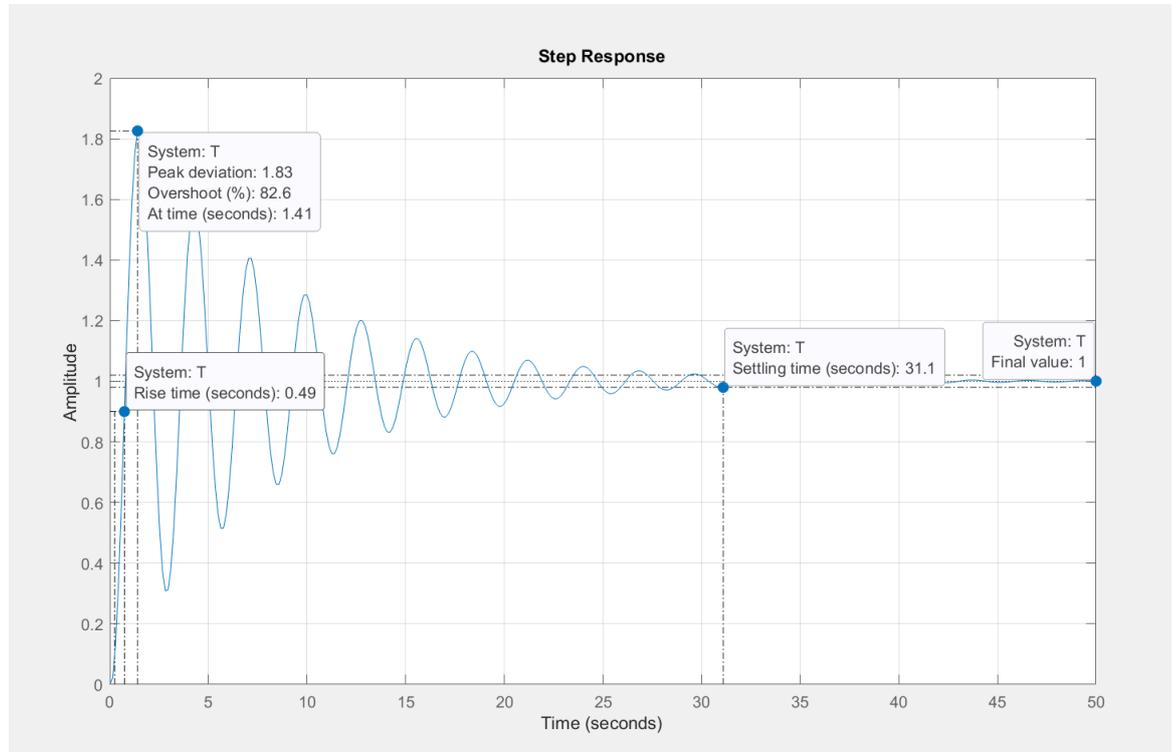


Рисунок 2.7 – Переходной процесс замкнутой системы

Прямые оценки качества

- 1) Время регулирования:  $T_{set} = 31.1$  сек;
- 2) Перерегулирование:  $P_{ov} = 82.6\%$ ;
- 3) Число колебаний:  $M = 9$ ;
- 4) Колебательность:  $\mu = \frac{\Delta y_{max2}}{\Delta y_{max1}} \cdot 100\% = 86.4\%$ ;
- 5) Частота колебаний:  $\omega_{osc} = \frac{2\pi}{T} = 2.19$ ;
- 6) Установившаяся ошибка:  $\varepsilon_{ss} = 0$ ;
- 7) Время достижения первого максимума:  $T_{max} = 1.41$  сек;
- 8) Время нарастания:  $T_R = 0.49$  сек;
- 9) Декремент затухания:  $X = 1.42$ .

Анализ переходного процесса замкнутой системы, функционирующей без регулятора, выявил неудовлетворительные динамические характеристики. Отмечаются такие признаки нестабильности и низкого качества регулирования, как значительное перерегулирование (82,6%), высокая колебательность (86,4%) и продолжительное время регулирования (31,1 с). Кроме того, статическая ошибка в установившемся режиме составляет 0, что является идеальным значением для систем автоматического регулирования. Однако, несмотря на отсутствие статической ошибки, указанные характеристики (перерегулирование, колебательность, время регулирования) являются недопустимыми для применений, требующих быстрой и стабильной стабилизации, в частности, для систем регулирования температуры в технологических процессах. Это обуславливает необходимость разработки специализированного регулятора, способного существенно повысить эффективность системы.

## 2.4 Выбор и настройка регулятора

В системах автоматического управления находят применение различные типы регуляторов, к которым традиционно относятся пропорциональные (P), пропорционально-интегральные (PI), пропорционально-дифференциальные (PD) и пропорционально-интегрально-дифференциальные (PID) регуляторы.

Пропорциональный регулятор (P) формирует управляющее воздействие, исходя из текущего рассогласования между фактическим и заданным значениями параметра. Его действие напрямую пропорционально абсолютному отклонению. Несмотря на простоту реализации и высокую скорость срабатывания, P-регулятор не способен полностью устранять статическое отклонение (постоянную ошибку) и может способствовать возникновению колебаний в системе.

Пропорционально-интегральный регулятор (PI) учитывает не только мгновенное отклонение, но и его интеграл по времени. Это позволяет эффективно подавлять установившуюся ошибку и повышать общую стабильность системы. Однако, при чрезмерно интенсивном интегральном

действию, колебания в процессе регулирования могут стать более выраженными.

Пропорционально-дифференциальный регулятор (PD), в свою очередь, учитывает производную по времени от скорости изменения ошибки. Такой подход позволяет ускорить реакцию системы и существенно уменьшить перерегулирование. Тем не менее, PD-регулятор не способен устранить постоянную ошибку и может проявлять высокую чувствительность к высокочастотным возмущениям, что приводит к нежелательным резким скачкам управляющего сигнала.

PID -регулятор включает все три слагаемых:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (2.17)$$

где  $K_p$  – коэффициент пропорциональности;

$K_i$  – коэффициент интегральной составляющей;

$K_d$  – коэффициент дифференциальной составляющей.

Использование регулятора в системе управления позволяет достичь оптимального баланса между быстродействием, точностью и устойчивостью. Однако для этого критически важен корректный подбор его параметров. Неверная настройка несёт в себе значительный риск потери устойчивости и возникновения нежелательных колебаний в динамике системы.

Выбор конкретного типа регулятора всецело определяется спецификой управляемого технологического процесса. Так, пропорциональный (P) регулятор целесообразен для относительно простых систем, где допускается наличие остаточной ошибки. Пропорционально-интегральный (PI) регулятор предпочтителен в случаях, требующих полного устранения статической ошибки. Если же задача предполагает необходимость высокой скорости отклика, эффективным решением становится пропорционально-дифференциальный (PD) регулятор. Наиболее универсальным и широко применяемым в промышленной автоматике является пропорционально-интегрально-дифференциальный (PID) регулятор, который обеспечивает сбалансированное управление при различных типах возмущений и разнообразных параметрах объекта [4].

В рамках проведённого моделирования были рассмотрены три типа регуляторов: P, PD и PID. Их настройка осуществлялась с помощью встроенного инструмента `pidtune` в среде MATLAB. Это позволило автоматически подобрать оптимальные значения коэффициентов для каждого из анализируемых случаев. На базе структурного синтеза, представленного на рисунке 2.9 – "Структурный синтез типовых регуляторов", был проведён сравнительный анализ переходных характеристик, по результатам которого удалось выявить наиболее эффективную конфигурацию регулятора для исследуемой системы.

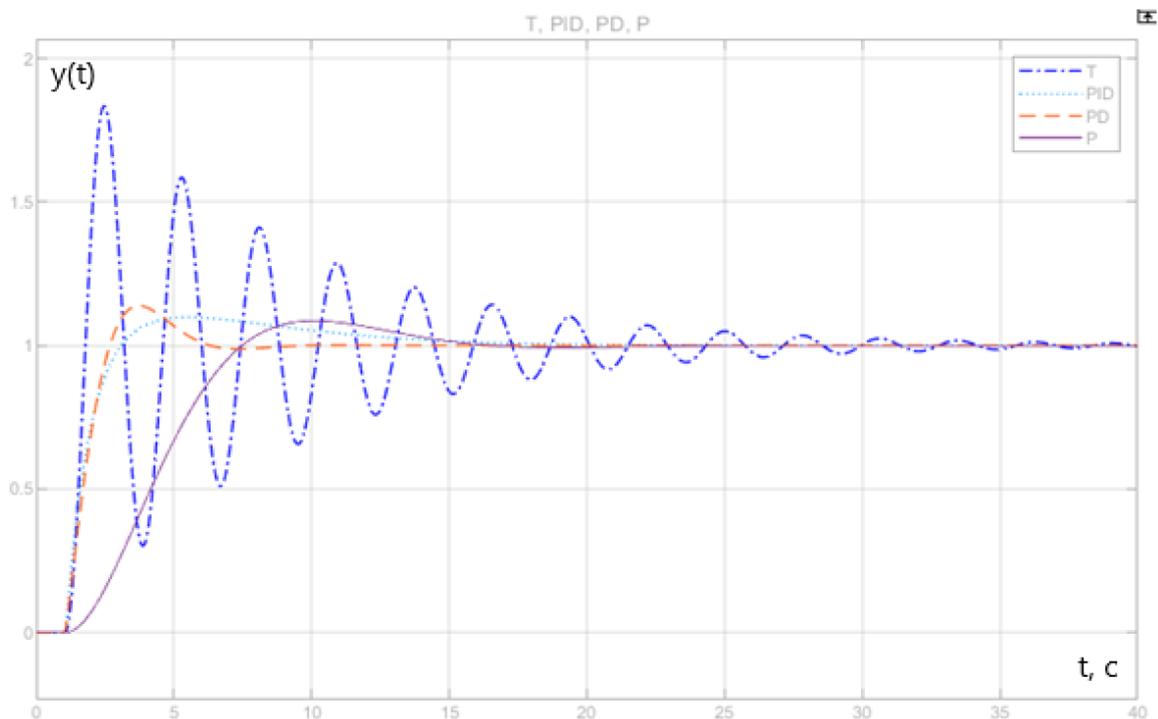


Рисунок 2.8 – Структурный синтез типовых регуляторов

В данной системе наиболее подходящим регулятором признан пропорционально-дифференциальный (PD) регулятор, что обусловлено несколькими факторами: Повышенная скорость срабатывания: PD-блок демонстрирует значительно меньшее время нарастания сигнала по сравнению с P-регулятором. Это подтверждается результатами моделирования: система быстрее выходит на заданное значение. Сниженное перерегулирование: В отличие от PID-регулятора, схема с PD-регулятором показывает меньшую склонность к выраженным колебаниям в начальной фазе переходного процесса. Это особенно важно в случаях, когда чрезмерное превышение уставки является нежелательным. Улучшенная стабильность: По сравнению с P-регулятором, PD-устройство более эффективно демпфирует колебания, при этом не вызывая избыточного перерегулирования, характерного для PID-регулирования. Это обеспечивает более предсказуемое и стабильное поведение системы. Отсутствие необходимости в интегральном компоненте: С учётом специфики параметров данной задачи, интегральный компонент не оказывает существенного влияния на выходной сигнал системы – стабильное состояние достигается как при его наличии, так и без него [5].

Таким образом, PD-регулятор обеспечивает баланс между скоростью отклика, стабильностью и минимальными колебаниями, что делает его наиболее логичным выбором для повышения эффективности рассматриваемой системы автоматического управления. Переходной процесс для PD-регулятора представлен на рисунке 2.9.

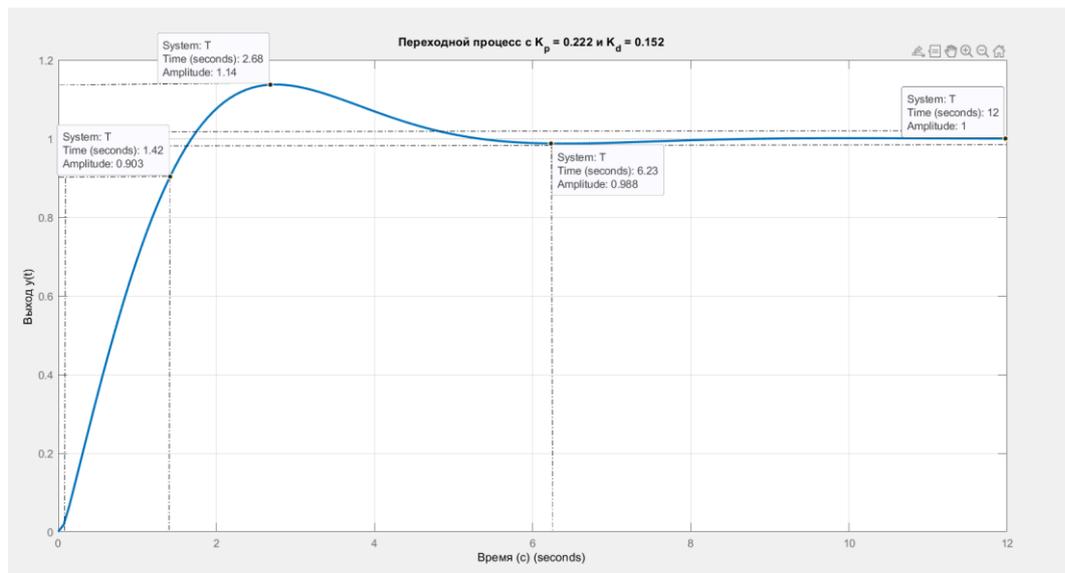


Рисунок 2.9 – Переходной процесс PD-регулятора

В результате выполненных расчётов и последующей автоматизированной настройки параметров регулятора с применением инструмента `pidtune` в программной среде MATLAB, была определена и сформулирована управляющая формула PD-регулятора следующего вида:

$$u(t) = 0.222 \cdot e(t) + 0.152 \cdot \frac{de(t)}{dt}. \quad (2.18)$$

Для оценки эффективности внедрения PD-регулятора произведено сопоставление ключевых характеристик переходного процесса замкнутой системы как до, так и после его интеграции. Полученные значения показателей были всесторонне проанализированы и представлены в таблице 2.2, что позволяет наглядно оценить влияние PD-регулирования на динамическое поведение системы.

Таблица 2.2 – Анализ прямых оценок качества

№	Наим.	Замкнутая система без регулятора	Замкнутая система с ПД-регулятором
1	$T_{set}$	31.1 сек	6.23 сек
2	$P_{ov}$	82.6%	13.3%
3	M	9	1
4	$\mu$	86.4%	0
5	$\omega_{osc}$	2.19	0
6	$\varepsilon_{ss}$	0	0
7	$T_{max}$	1.41 сек	2.68 сек
8	$T_R$	0.49 сек	1.42 сек
9	X	1.42	0

Внедрение PD-регулятора способствовало значительному улучшению динамических характеристик системы. В частности, время перехода в устойчивое состояние существенно сократилось – с 31.1 до 6.23 секунд, а величина перерегулирования уменьшилась с 82.6% до 13.3%. Система утратила выраженную склонность к колебаниям, что положительно сказалось на её устойчивости. Статическая ошибка в установившемся режиме остается нулевой в обоих случаях, что является идеальным для систем автоматического регулирования. Однако, несмотря на достигнутые улучшения, наблюдается увеличение максимального отклонения и времени нарастания сигнала, указывающее на более сглаженный, но потенциально всё ещё не оптимальный отклик в части быстродействия и точности стабилизации. Таким образом, применение PD-регулятора позволило добиться улучшенной устойчивости и повышенной скорости реакции, но требуется дальнейшая оптимизация.

Первоначальная настройка регулятора производилась функцией pidtune в MATLAB. Несмотря на достигнутые положительные сдвиги в характеристиках по сравнению с исходной замкнутой системой, полученные показатели всё же оказались недостаточными для обеспечения требуемого качества управления, особенно в части точности температурной стабилизации.

В связи с этим возникает необходимость в дополнительной корректировке параметров PD-регулятора. На практике для рассматриваемой системы особо критичными являются такие показатели, как быстродействие и точность стабилизации в установившемся режиме. Эти параметры во многом определяют эффективность регулирования тепловых процессов, где важна как оперативность реакции на возмущения, так и минимальное отклонение от заданной температуры в стационарном режиме. Конечная цель – минимизировать суммарную абсолютную ошибку (SAE), представляющую собой интегральную меру отклонения выходной величины от заданного значения. Для решения данной задачи предлагается использовать генетический алгоритм как мощный инструмент глобального поиска, способный эффективно подобрать параметры, удовлетворяющие всем требованиям регулирования [6].

## 2.5 Настройка регулятора генетическим алгоритмом

Для достижения наилучшего качества управления был задействован генетический алгоритм (ГА), который относится к методам глобальной оптимизации, основанным на принципах естественного отбора и эволюции. Подобные алгоритмы демонстрируют свою эффективность в ситуациях, когда традиционные аналитические или численные методы оказываются неэффективными или неприменимыми. Применительно к настройке регулятора, ГА использовался для автоматизированного подбора его коэффициентов (например, пропорционального  $K_p$  и дифференциального  $K_d$ ), что способствовало достижению более быстрого и стабильного отклика системы.

Работа генетического алгоритма строится на имитации эволюционного

процесса, где каждое потенциальное решение – это "хромосома" (набор параметров  $K_p$  и  $K_d$ ). Оптимизация параметров выполняется по следующим этапам:

1. Инициализация популяции: Создание первой популяции случайных наборов параметров. Для обеспечения стабильности и ускорения сходимости, границы этих случайных значений ( $K_p$ ,  $K_d$ ) предварительно ограничиваются с использованием критерия Гурвица, что гарантирует поиск решений только в области устойчивости системы.

2. Оценка приспособленности: Каждое решение оценивается по критерию качества (например, суммарная абсолютная ошибка – SAE), определяющему его эффективность.

3. Селекция: Отбор "лучших" решений на основе их приспособленности для формирования "родительской" группы.

4. Кроссинговер: Комбинирование параметров "родительских" решений для создания новых "потомков".

5. Мутация: Внесение случайных изменений в параметры "потомков" для поддержания разнообразия и исследования новых областей.

6. Формирование нового поколения: Новые, эволюционировавшие решения заменяют предыдущую популяцию.

7. Проверка критерия остановки: Процесс повторяется до достижения заданных условий (например, максимального числа поколений или требуемой точности), что приводит к нахождению оптимальных параметров.

В соответствии с этой стратегией, были установлены предельные значения для коэффициентов  $K_p$  и  $K_d$ , которые впоследствии использовались в алгоритме как ограничения оптимизации. Это позволило исключить неустойчивые режимы и значительно повысить точность итоговой настройки.

В качестве критерия оптимизации для генетического алгоритма была выбрана сумма абсолютных ошибок (SAE). Этот показатель предоставляет комплексную оценку качества управления, поскольку учитывает все отклонения выходной величины от заданного значения на протяжении всего процесса. Применение SAE способствует формированию более "мягкого" алгоритма управления, что является особенно важным в условиях регулирования температуры трубчатой печи, где приоритетом является общая стабильность системы, а не стремление к устранению каждого незначительного отклонения.

Были также рассмотрены альтернативные подходы к оценке качества, такие как интеграл квадрата ошибки (ISE) и интеграл времени, умноженного на квадрат ошибки (ITSE). Однако их использование было признано менее подходящим: ISE требует значительных вычислительных ресурсов, а ITSE зачастую приводит к излишне агрессивной настройке регулятора, что может нарушить устойчивость технологического процесса.

Предварительное определение диапазона предельных значений коэффициентов регулятора с помощью критерия Гурвица позволило эффективно

ограничить область поиска и исключить неустойчивые режимы, что существенно повысило эффективность и точность процесса оптимизации [7].

С учетом того, что коэффициенты должны быть больше нуля, далее определим их граничные значения:

Шаг 1. Нужно составить уравнение

$$W_{pc}(S) = \frac{9.112}{0.00144s^4 + 0.1088s^3 + 1.86s^2 + s},$$

$$W_{pd}(S) = K_p + K_d s, \quad (2.29)$$

$$W(S) = W_{pc}(s) \cdot W_{pd}(S) = \frac{(K_p + K_d s)9.112}{0.00144s^4 + 0.1088s^3 + 1.86s^2 + s}, \quad (2.20)$$

$$W_{zc}(S) = 1 + W(S) = 1 + \frac{(K_p + K_d s)9.112}{0.00144s^4 + 0.1088s^3 + 1.86s^2 + s}. \quad (2.21)$$

Шаг 2. Приведем к стандартному виду:

$$0.00144s^4 + 0.1088s^3 + 1.86s^2 + s + 9,122K_p + 9,122K_d s = 0. \quad (2.22)$$

Шаг 3. Сгруппировать

$$0.00144s^4 + 0.1088s^3 + 1.86s^2 + (1 + 9,122K_d)s + 9,122K_p = 0. \quad (2.23)$$

Шаг 4. Составляем определитель Гурвица

$$D(s) = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.1088 & 1 + 9.122K_d & 0 \\ 0.00144 & 1.86 & 9.122K_p \\ 0 & 0.1088 & 1 + 9.122K_d \end{vmatrix}. \quad (2.24)$$

Отсюда получим неравенство:

$$-0.1198K_d^2 + 1.8197K_d - 0.1080K_p + 0.2009 > 0, \quad (2.25)$$

$$0 < K_p < -1.1092K_d^2 + 16.849K_d + 1.860. \quad (2.26)$$

Шаг 5. Подобрать границы

Границы допустимых значений параметров регулятора могут быть определены аналитически, например, с использованием критерия Гурвица. Этот

подход позволяет выявить такие значения коэффициентов  $K_p$  и  $K_d$ , при которых система не утратит своей устойчивости. Однако данный метод зачастую требует трудоёмкого ручного вычисления характеристического уравнения и склонен к возникновению ошибок. В связи с этим на практике часто отдают предпочтение численным методам, реализованным в программной среде MATLAB.

Наличие встроенных функций для проверки устойчивости и автоматизированного анализа системы в MATLAB значительно упрощает процесс. Это позволяет с лёгкостью определить рабочий диапазон параметров и наглядно продемонстрировать влияние каждого из них на динамическое поведение системы. Подобная стратегия ускоряет процесс выбора оптимальных значений и минимизирует риск человеческой ошибки, присущий ручным расчётам.

Затем осуществляется компьютерный поиск значений коэффициентов  $K_p$  и  $K_d$  PD-регулятора для последующего анализа устойчивости каждой пары. Для каждой комбинации параметров строится модель замкнутой системы, после чего исследуются её полюса с целью обнаружения стабильных альтернатив для дальнейшей оптимизации. Данные, полученные с помощью среды MATLAB, представлены на рисунке 2.11.

```

*** Устойчивые комбинации Kp и Kd ***

```

Kp	Kd	Stable	SettlingTime	Overshoot
0.1	0.01	1	11.761	24.946
0.1	0.056234	1	7.6421	12.327
0.1	0.31623	1	8.0577	0
0.1	1.7783	1	NaN	0.65599
0.1	10	1	1.695	67.229
0.56234	0.01	1	17.376	66.027
0.56234	0.056234	1	11.558	53.195
0.56234	0.31623	1	2.8356	17.989
0.56234	1.7783	1	0.96778	3.5261
0.56234	10	1	1.5073	67.522
3.1623	0.31623	1	6.3008	66.451
3.1623	1.7783	1	1.1572	18.748
3.1623	10	1	1.5003	69.165
17.783	1.7783	1	2.3531	77.602
17.783	10	1	1.9335	78.312

Рисунок 2.11 – Результаты моделирования

По результатам моделирования были получены границы для параметров:  $K_p \in [0.1; 17.783]$  и  $K_d \in [0.01; 10]$ . Эти значения критически важны для обеспечения устойчивости системы и повышения эффективности процесса оптимизации.

Исходя из этих обоснованных границ, при работе генетического алгоритма в MATLAB, процесс поиска оптимальных параметров протекает следующим образом:

1. Инициализация популяции: На этом начальном этапе генерируется первая "популяция" случайных наборов параметров  $K_p$  и  $K_d$ . Количество таких наборов определяется размером популяции (например, 30 особей), а их значения случайным образом выбираются строго в пределах установленных границ. Это обеспечивает охват потенциальных решений в области устойчивости системы.

2. Оценка приспособленности: Каждый сгенерированный набор параметров ( $K_p$ ,  $K_d$ ) оценивается на предмет его "пригодности". Для этого моделируется переходный процесс замкнутой системы с данными параметрами, и вычисляется критерий качества, такой как суммарная абсолютная ошибка (SAE). Чем меньше значение ошибки, тем выше "приспособленность" данного набора параметров к решению задачи.

3. Эволюционные операторы (Селекция, Кроссинговер, Мутация, Формирование нового поколения): После оценки приспособленности запускаются итерационные процессы, имитирующие эволюцию. Сначала происходит селекция, при которой отбираются "лучшие особи" (наборы параметров с наименьшей ошибкой). Затем эти "родители" подвергаются кроссинговеру (скрещиванию), где их "гены" (параметры) комбинируются для создания новых "потомков". Для поддержания генетического разнообразия и исследования новых областей поиска, в параметры некоторых "потомков" вносятся небольшие случайные изменения через операцию мутации. В результате этих операций формируется новое поколение решений, которое потенциально является более "приспособленным" и эффективным.

4. Проверка критерия остановки и вывод значений: Весь цикл (оценка приспособленности, эволюционные операторы) повторяется итеративно до тех пор, пока не будет выполнен заданный критерий остановки. Чаще всего это достижение максимального количества поколений (например, 100 итераций). По завершении работы алгоритма, производится вывод оптимальных значений  $K_p$  и  $K_d$ , которые обеспечили наилучший критерий качества в ходе всей оптимизации[8].

По завершении работы генетического алгоритма, направленного на оптимизацию параметров PD-регулятора, были получены следующие оптимальные коэффициенты:  $K_p = 2.8652$  и  $K_d = 5.1577$ . Найденные оптимальные параметры приведены на рисунке 2.12.

85	2412	15.86	15.86	21
86	2440	15.86	15.86	22
87	2468	15.86	15.86	23

Optimization terminated: average change in the fitness value less than options.FunctionTolerance.  
Оптимальные параметры:  $K_p = 2.8652$ ,  $K_d = 5.1577$   
Минимальная ошибка  $J = 15.8645$

Рисунок 2.12 – Найденные оптимальные параметры

Переходной процесс данной системы с новыми коэффициентами (Рисунок 2.13)

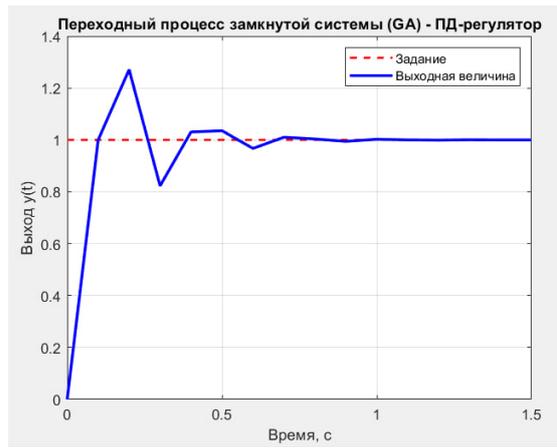


Рисунок 2.13 – Переходной процесс замкнутой системы (Генетический алгоритм)

Поскольку уровень перерегулирования, полученный после первоначальной настройки, превысил допустимые пределы, было принято решение скорректировать параметры регулятора. Для этого оптимальные значения коэффициентов  $K_p$  и  $K_d$ , найденные в результате работы генетического алгоритма, были уменьшены вдвое. Подобный подход был направлен на снижение амплитуды колебаний в переходном процессе и повышение плавности отклика без какого-либо ущерба для устойчивости системы. В результате этой модификации получены значения  $K_p = 1.4326$  и  $K_d = 2.5788$ .

После выполнения численных расчётов и последующей корректировки параметров, основанной на результатах генетической оптимизации, удалось сформировать закон управления для PD-регулятора:

$$u(t) = 1.4326 \cdot e(t) + 2.5788 \cdot \frac{de(t)}{dt}. \quad (2.28)$$

Переходной процесс после модификации (Рисунок 2.14)

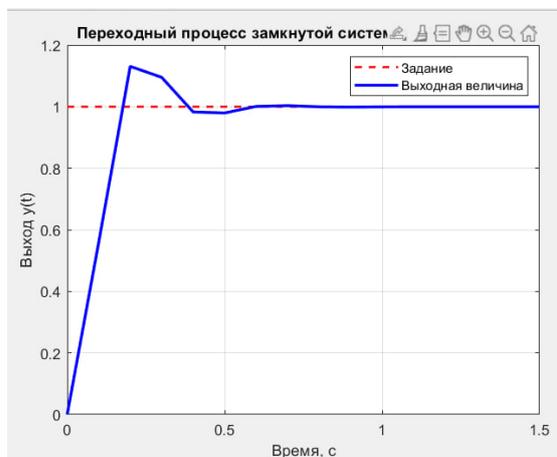


Рисунок 2.14 – Переходной процесс замкнутой системы

Полученные в результате работы генетического алгоритма коэффициенты  $K_p$  и  $K_d$  не в полной мере удовлетворяли всем требованиям, предъявляемым к качеству динамических характеристик системы. В связи с этим было принято решение о дополнительной модификации этих параметров. После внесения корректировок, система продемонстрировала значительно улучшенные показатели, что позволило достичь необходимого уровня качества и стабильности регулирования.

Теперь, имея оптимизированные параметры, можно провести сравнительный анализ для оценки преимуществ данного подхода и демонстрации улучшений в динамических характеристиках системы по сравнению с исходным состоянием.

## 2.6 Итоговая оценка динамических характеристик замкнутой системы

Для выбора наиболее эффективного метода настройки PD-регулятора было проведено сопоставление двух подходов: автоматизированной настройки с использованием команды `pidtune` в MATLAB и оптимизации параметров на основе генетического алгоритма. Цель исследования заключалась в определении оптимальных динамических характеристик и требуемой стабильности системы управления трубчатых печей.

Основным инструментом визуального сравнения служили графики переходных процессов замкнутой системы. На рисунке 2.15 представлены два варианта реакции: красная пунктирная линия соответствует отклику, полученному с помощью функции `pidtune`, а синяя цельная линия демонстрирует реакцию, достигнутую путём оптимизации генетическим алгоритмом. Сравнительный анализ показывает, что регулятор, настроенный через `pidtune`, обеспечивает более плавную и стабильную реакцию. В то же время, подход с генетическим алгоритмом характеризуется более колебательным, но значительно более быстрым поведением, что в условиях, требующих оперативной стабилизации, является более предпочтительным.

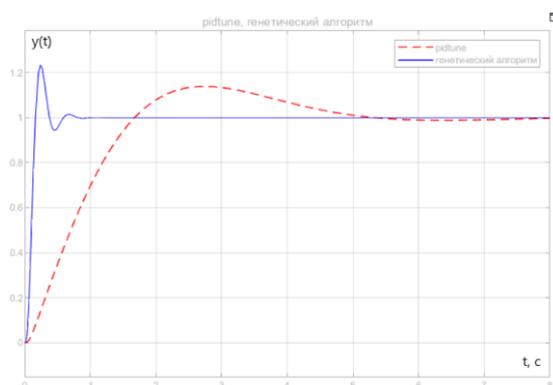


Рисунок 2.15 – Переходные процессы двух методов настройки PD-регулятора

Далее были выполнены сравнительные расчёты по прямым оценкам качества регулирования. Анализ этих параметров позволил всесторонне оценить надёжность функционирования системы при каждом из применённых подходов. Проведённое сопоставление переходных процессов и полученных характеристик дало основание для определения наиболее эффективного метода настройки регулятора.

Для детального исследования прямых оценок качества системы был построен переходной процесс, отображённый на рисунке 2.16.

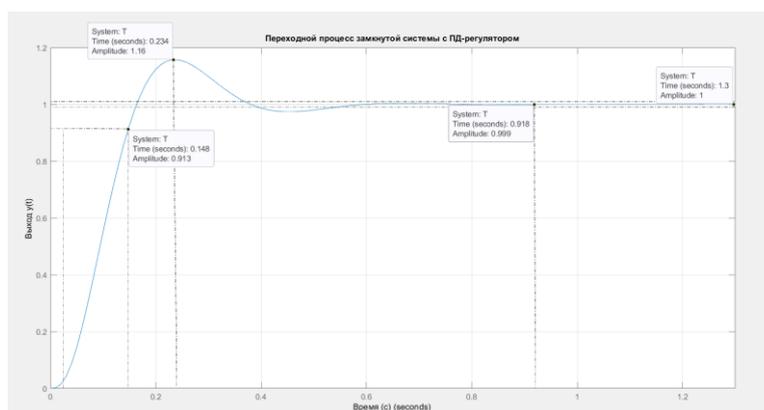


Рисунок 2.16 – Прямые оценки качества (Генетический алгоритм)

Полученные данные были сопоставлены и проанализированы, что позволило сравнить эффективность каждого из подходов. Итоговые результаты представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Анализ прямых оценок качества

№	Наим.	Коэффициенты полученные автоматически через pidtune	Коэффициенты подобранные при помощи генетического алгоритма
1	$T_{set}$	6.23 сек	0.918 сек
2	$P_{ov}$	13.3%	16%
3	M	1	2
4	$\mu$	0	0.86
5	$\omega_{osc}$	0	14.95
6	$\varepsilon_{ss}$	0	0
7	$T_{max}$	2.68 сек	0.234 сек
8	$T_R$	1.42 сек	0.148 сек
9	X	0	16.16

В процессе анализа настройки PD-регулятора, предпочтение было отдано параметрической оптимизации посредством генетического алгоритма перед

автоматической конфигурацией (pidtune). Это обосновано более эффективным управлением для трубчатых печей.

Учитывая инерционность теплотехнической системы, ключевыми критериями стали устойчивость, быстрота реакции и точность. Генетический алгоритм обеспечил существенное сокращение времени установления – до 0.918 с (против 6.23 с для pidtune). Статическая ошибка в обоих случаях нулевая, подтверждая высокую точность.

Несмотря на кратковременные колебания в начальной фазе (14.95%), они не влияют на стабильность. Перерегулирование в 16% находится в допустимых пределах. Быстрое время нарастания (0.148 с) и достижения максимума (0.234 с) подтверждают высокую динамическую отзывчивость.

Интегральные показатели качества, такие как декремент затухания ( $X = 16.16$ ), также свидетельствуют о превосходстве генетического алгоритма. Это особенно важно для промышленной эксплуатации, где стабильное и точное управление в изменяющихся условиях критично для энергоэффективности и производительности.

Таким образом, оптимизированные генетическим алгоритмом параметры обеспечивают наилучший баланс динамики, точности и устойчивости, делая этот метод предпочтительным для управления трубчатыми печами и аналогичными объектами, где надежность, эффективность и адаптивность регулирования играют решающую роль.

## 2.7 Преобразование из непрерывной в дискретную форму.

Поскольку управление системой будет осуществляться посредством цифрового контроллера, все разработанные алгоритмы и расчёты необходимо представить в виде дискретных моделей. Это предполагает обязательный переход от непрерывного математического описания объекта управления к его дискретной форме.

Первым этапом данного процесса является определение адекватного интервала дискретизации. Вслед за этим необходимо выполнить моделирование системы уже в дискретном представлении с использованием среды MATLAB. Такой подход позволяет адаптировать модель для последующей реализации в цифровом управляющем устройстве, а также проверить корректность её функционирования в условиях, максимально приближенных к реальным.

Процедура определения шага дискретизации представляет собой важный подготовительный этап и может быть реализована с применением следующих подходов:

$$T_s = \frac{T_{set}}{20}, \quad (2.29)$$

где  $T_{set} = 6.23$  сек, следовательно шаг дискретизации равен 0.31.

Исходя из этого промоделируем систему и получим (Рисунок 2.17):

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
Модель замкнутой системы (непрерывная):
closed_loop =
          1.385 s + 2.023
-----
0.00144 s^4 + 0.1088 s^3 + 1.86 s^2 + 2.385 s + 2.023
Continuous-time transfer function.
Модель замкнутой системы (дискретная):
d_closed_loop =
    0.1927 z^3 - 0.07265 z^2 - 0.03329 z - 7.955e-06
-----
z^4 - 1.588 z^3 + 0.6753 z^2 - 0.0005819 z + 1.432e-10
Sample time: 0.3 seconds
Discrete-time transfer function.
fx >> |

```

Рисунок 2.17 – Результаты моделирования

В процессе моделирования замкнутой системы управления удалось определить передаточные функции как для непрерывного, так и для дискретного вариантов описания.

Непрерывная модель. В результате симуляции системы в непрерывной форме была получена следующая передаточная функция:

$$G(s) = \frac{1.385s+2.023}{0.00144s^4+0.1088s^3+1.86s^2+2.385s+2.023}.$$

Представленная модель описывает поведение системы в непрерывном времени, демонстрируя, каким образом входной сигнал трансформируется в выходной с учётом всех её динамических элементов.

Для осуществления цифровой реализации система была преобразована в дискретный формат с периодом дискретизации  $T=0.3$  секунды. В результате данного преобразования была получена дискретная передаточная функция, которая адекватно отражает динамику системы уже в дискретном времени.

$$G(z) = \frac{0.1927z^3-0.07265z^2-0.03329z-7.955 \cdot 10^{-6}}{z^4-1.588z^3+0.6753z^2-0.0005819z+1.432 \cdot 10^{-10}}.$$

Эта модель была получена с помощью встроенных функций MATLAB и может быть использована для проектирования цифрового регулятора.

Дополнительно был смоделирован переходной процесс непрерывной и дискретной системы на рисунке 2.18.

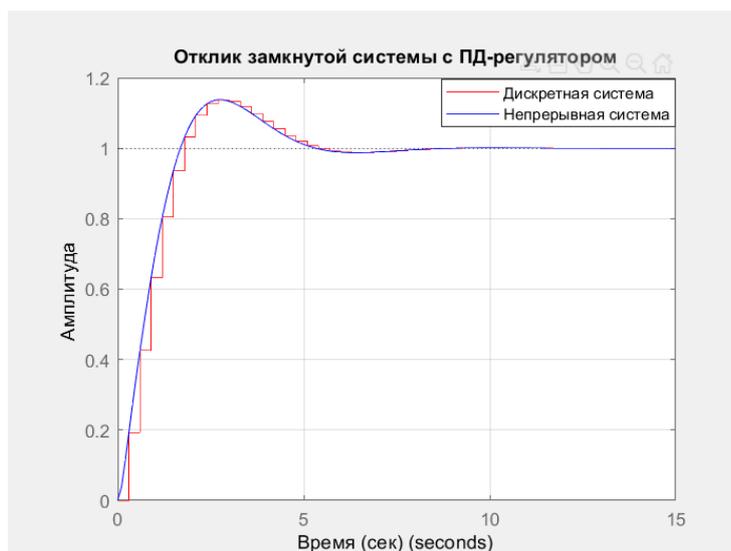


Рисунок 2.18 – Переходной процесс непрерывной и дискретной системы

В MATLAB была смоделирована работа системы в трёх вариантах: без регулятора, с непрерывным регулятором и с дискретным регулятором. Это позволило сравнить влияние разных типов управления на динамику и точность выхода системы (Рисунок 2.19).

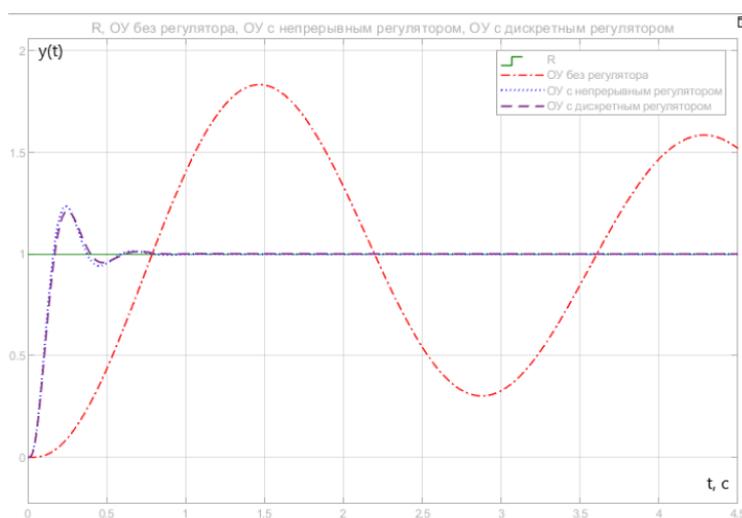


Рисунок 2.19 – Результат моделирования

В ходе работы собраны данные для создания программы системы управления. Разработана математическая модель объекта с анализом динамических характеристик. Выполнен структурный синтез типовых регуляторов. Для оптимизации параметров регулятора применён генетический алгоритм. После точной настройки коэффициентов регулятор дискретизирован для цифровой реализации. По завершении этапов моделирования и дискретизации регулятора можно приступить к следующему разделу.

### **3 Разработка программы системы управления трубчатой печи в среде TIA portal**

TIA Portal – это комплексная среда инжиниринга от Siemens, выбранная для управления трубчатой печью благодаря своей универсальности и обширной функциональности. Платформа объединяет возможности работы с программируемыми логическими контроллерами (ПЛК) серий S7-1200/1500, человеко-машинными интерфейсами (HMI), частотными преобразователями и сетевыми интерфейсами, что позволяет конструировать комплексные автоматизированные системы без использования стороннего ПО.

Поддержка различных языков программирования (LAD, FBD, SCL, STL) упрощает реализацию сложных алгоритмов, а встроенные библиотеки, включая PID-регуляторы, ускоряют разработку и снижают риск ошибок. Возможность предварительного тестирования через PLCSIM и HMI-эмулятор повышает надёжность и сокращает сроки ввода в эксплуатацию.

Полная совместимость с основными промышленными протоколами (PROFIBUS, PROFINET, OPC UA) обеспечивает бесшовную интеграцию со всеми компонентами системы. Все эти преимущества делают TIA Portal высокоэффективным инструментом для построения надёжной и масштабируемой системы управления трубчатой печью.

#### **Постановка задачи:**

Необходимо разработать систему аппаратного управления, способную решать следующие задачи: реализовать PD-регулятор трубчатой печи для стабилизации температуры технологического процесса, разработать программу управления аварийными режимами и наладки положения клапанов, а также организовать архивацию технологических данных для последующего анализа.

#### **3.1 Разработка алгоритма управления**

Для организации функционирования системы управления трубчатой печью была разработана обобщённая блок-схема, отражающая последовательность ключевых операций. Данный алгоритм предусматривает этапы начальной инициализации, непрерывный контроль состояния аварийных датчиков и кнопки аварийной остановки, а также выбор одного из двух режимов функционирования – автоматического или ручного. В автоматическом режиме управление реализуется в замкнутом контуре согласно заранее заданному алгоритму. В ручном режиме оператору предоставлена возможность напрямую контролировать положение трёх клапанов и осуществлять включение или отключение горелки. Такая структура алгоритма обеспечивает необходимый уровень безопасности и одновременно позволяет гибко управлять технологическим процессом. Общий алгоритм работы системы управления представлен на блок-схеме, изображённой на рисунке 3.1.

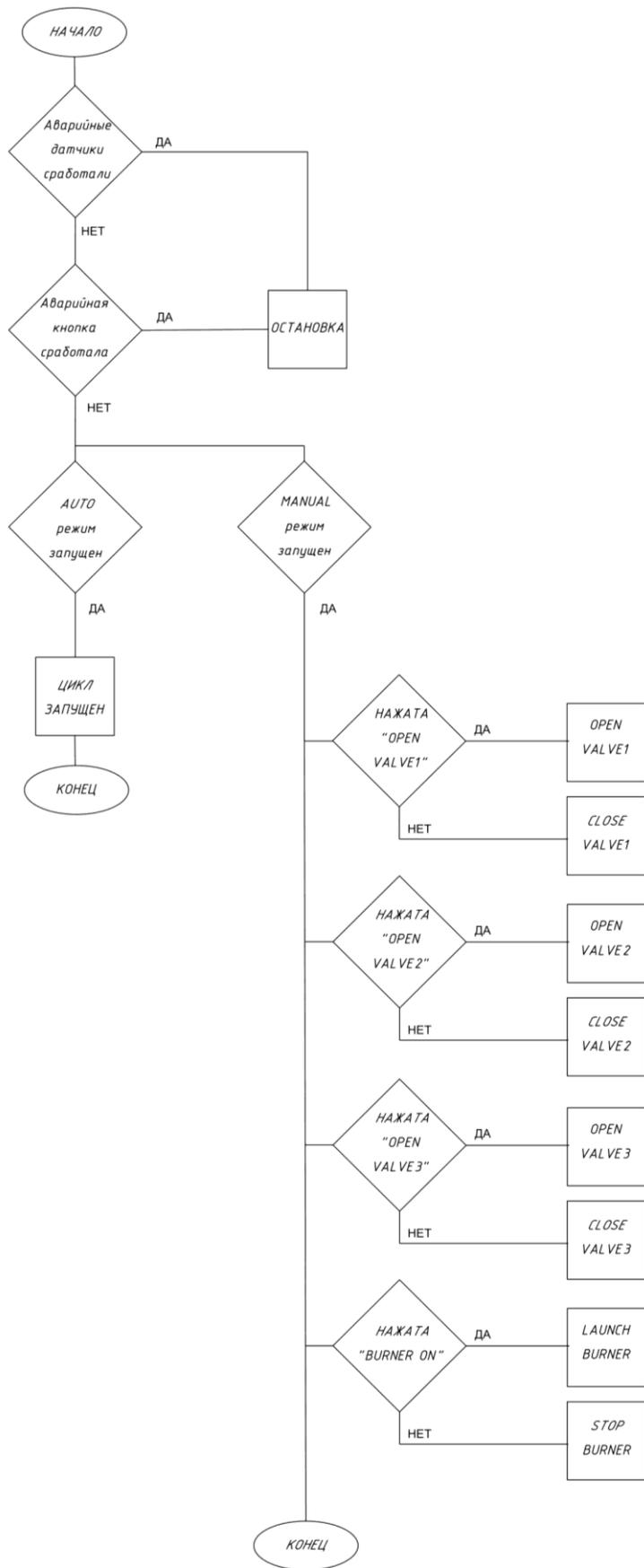


Рисунок 3.1 – Алгоритм управляющей программы

### 3.2 Выбор и конфигурация оборудования

Для безопасной работы между программируемым логическим контроллером SIMATIC S7-1500 (CPU 1513-1 PN) и системой WinCC Advanced в среде TIA Portal требуется последовательное выполнение ряда действий. Первым шагом является создание нового проекта и включение в него обоих устройств: контроллера CPU 1513-1 PN и системы WinCC Advanced, которая отображается в проекте как PC-system. Вторым этапом настраиваются параметры сети: в одной подсети назначаются индивидуальные IP-адреса и активируется поддержка протокола Profinet для обеспечения надёжной связи между всеми компонентами.

Следующий шаг – установление соединения. В свойствах WinCC Advanced в качестве источника данных указывается контроллер, выбирается соответствующий драйвер связи (S7-1500 через Profinet), и проверяется точность заданных параметров. Непосредственно перед началом программирования крайне важно убедиться в правильности физического подключения, в наличии устройств в сети с помощью команды Ping и в успешном соединении в режиме "Go online".

Выполнение этих шагов обеспечивает надёжное и корректное взаимодействие контроллера с SCADA-системой, что служит прочной основой для дальнейшей разработки и реализации алгоритма автоматического управления трубчатой печью. Данная связь продемонстрирована на рисунке 3.2.

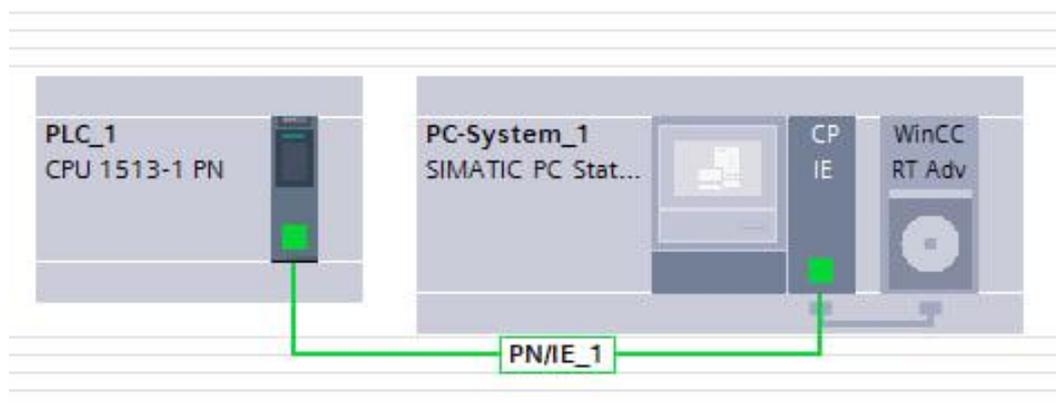


Рисунок 3.2 – Связь между PLC и PC-System

На этапе конфигурирования контроллера, с учётом выбранной аппаратной платформы и технических требований системы, осуществляется добавление ключевых аппаратных составляющих: центрального процессора, блока питания и модулей ввода-вывода. В качестве основного контроллера используется CPU 1513-1 PN, выбор которого обусловлен достаточным объёмом памяти, высокой производительностью и поддержкой интерфейса Profinet для связи с SCADA-системой.

Блок питания выбирается исходя из рабочих напряжений системы и

суммарного тока, необходимого для энергоснабжения всех подключаемых модулей и периферийных устройств. Его монтаж осуществляется слева от процессора в соответствии с правилами конфигурации.

Выбор модулей дискретных и аналоговых входов/выходов производится на основе количества задействованных датчиков, исполнительных устройств и требований к точности измерений. При добавлении каждого модуля задаются его специфические параметры – тип сигнала (например, 24 В постоянного тока для дискретных входов) и адресация входов и выходов, что впоследствии будет использоваться при разработке программного кода.

Таким образом, конфигурация контроллера формируется с точным учётом реальных условий эксплуатации и характеристик объекта управления, обеспечивая надёжную аппаратную основу для стабильного функционирования системы. (Рисунок 3.3)



Рисунок 3.3 – Конфигурация контроллера

### 3.3 Разработка логики управления

После конфигурации аппаратного обеспечения и налаживания связи с SCADA-системой начинается ключевой этап – разработка логики управления. Эта часть проекта отвечает за программирование всех режимов работы и гарантирование корректного функционирования оборудования в разнообразных условиях эксплуатации. Логика реализована с использованием релейной схемы LAD (Ladder Diagram), которая отличается простотой восприятия и широко применяется в промышленной автоматизации.

Сформированная логика включает в себя несколько базовых блоков:

автоматический режим, ручной режим, аварийную обработку и выполнение функций PD-регулятора. В автоматическом режиме процесс контролируется системой автоматически на основе поступающих параметров, измерений датчиков и управляющих воздействий, генерируемых контроллером. В ручном режиме оператор имеет возможность напрямую управлять исполнительными механизмами через интерфейс SCADA, что особенно актуально во время пуско-наладочных работ и технического обслуживания.

Особое внимание было уделено подсистеме аварийной остановки: предусмотрена немедленная обработка сигнала от кнопки аварийной остановки. При её активации управление незамедлительно переключается в безопасный режим – все выходные сигналы блокируются, а алгоритмы управления останавливаются.

Логика программы, разработанная на языке LAD, обеспечивает эффективное управление технологическим процессом, гарантирует надёжную и безопасную работу системы и полностью удовлетворяет потребности автоматизации данного предприятия. Базовая логика в активном автоматическом режиме представлена на рисунке 3.4.

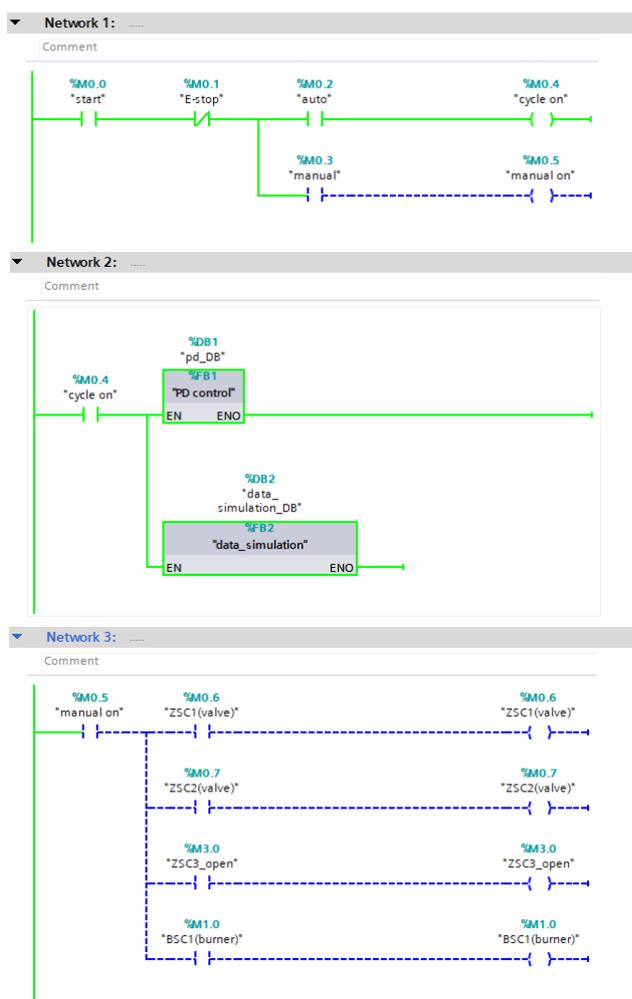


Рисунок 3.4 – Логика системы управления

Для точного контроля температуры технологического процесса в рамках функционального блока "PD control" задействован специализированный модуль "PID compact". Именно этот блок, управляя степенью открытия клапана подачи топлива, обеспечивает необходимое поддержание заданной температурной уставки (Рисунок 3.5).

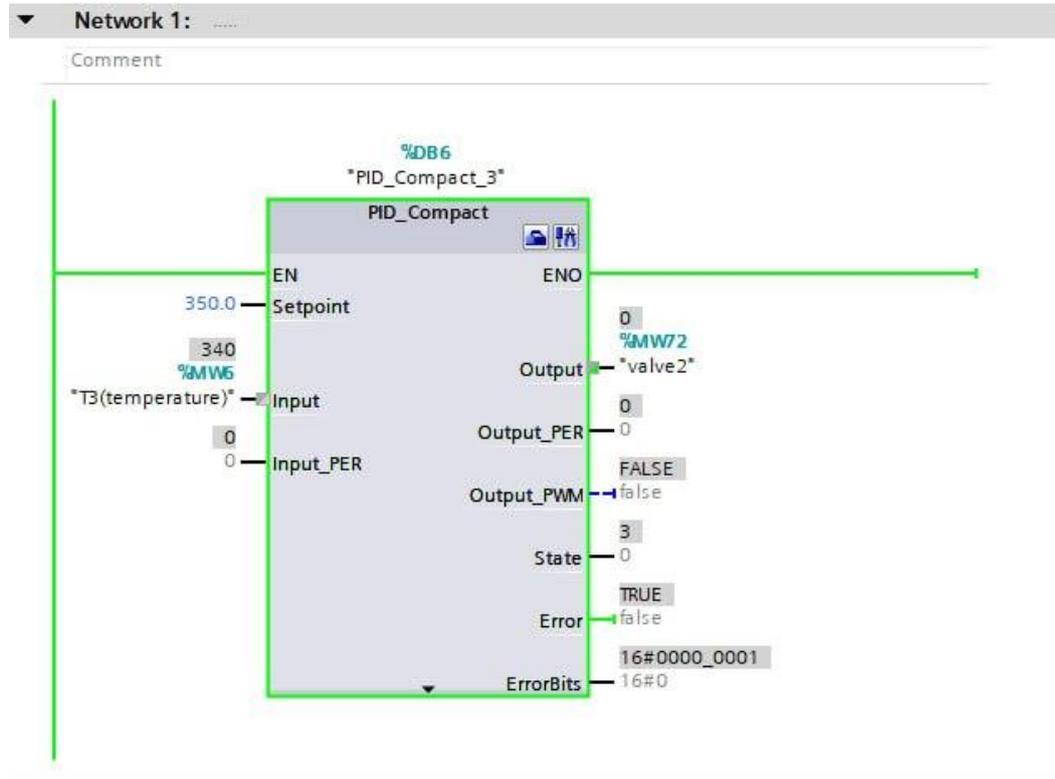


Рисунок 3.5 – Использование блока "PID compact"

Для обеспечения оптимального функционирования регулятора 'PID compact', его параметры настраиваются в специализированном окне конфигурации, представленном на рисунке 3.6.

Рисунок 3.6 – Окно настройки параметров PID регулятора

Выбор PD-регулятора для системного управления, хотя и обеспечивает высокую динамическую отзывчивость, требует глубокого понимания его потенциальных недостатков и предварительного планирования методов их устранения. Ключевым аспектом, заслуживающим пристального внимания, является погрешность дифференцирования и сопутствующие шумы.

Корень данной проблемы кроется в фундаментальных принципах численного дифференцирования. Поскольку производная традиционно вычисляется как разница между двумя близкими по значению функциями, любая относительная неточность в исходных данных неизбежно усиливается, приводя к значительному росту относительной погрешности самой производной. Этот феномен особенно критичен, поскольку дифференциатор функционирует как усилитель высокочастотных сигналов: например, входной синусоидальный сигнал при дифференцировании даст на выходе сигнал, амплитуда которого прямо пропорциональна его частоте. Вследствие этого, дифференциатор существенно усиливает высокочастотные помехи, кратковременные выбросы и общий шумовой фон, присутствующий в измеряемом сигнале. Результатом может стать "пульсирующее" управление, повышенный износ исполнительных механизмов, увеличение погрешности измерений и снижение общей точности регулирования.

В процессе практической имплементации PD-регулятора в интегрированной среде TIA Portal, в частности, задействуя функциональный блок "PID compact", разработчики имеют доступ к набору встроенных инструментов, предназначенных для эффективного устранения сложностей, обусловленных погрешностью дифференцирования и шумовыми воздействиями. Среди ключевых подходов выделяют:

Интегрированная фильтрация дифференциальной составляющей (D-Filter): Функциональность цифровой фильтрации для D-компоненты реализована непосредственно в блоке "PID compact" посредством параметра, часто обозначаемого как "фактор N" (например, в диапазоне от 2 до 20). Данный механизм эффективно нивелирует высокочастотные шумы в сигнале ошибки, тем самым предотвращая резкие и нежелательные флуктуации управляющего воздействия.

Расчёт производной по измеряемой переменной (PV-only derivative): В "PID compact" предусмотрена возможность вычисления производной исключительно на основе сигнала технологической переменной (PV). Это решение позволяет предотвратить возникновение "производного удара" – резкого всплеска управляющего воздействия, характерного при дискретных изменениях заданного значения (уставки).

Лимитирование выходного воздействия регулятора (Output Limiting): В блоке "PID compact" реализована функция конфигурирования верхнего (LMN\_HL) и нижнего (LMN\_LL) порогов для выходного сигнала регулятора. Эти ограничения служат для предотвращения генерации избыточных или недостаточных управляющих воздействий, минимизируя вероятность насыщения исполнительных механизмов и опосредованно ослабляя воздействие

шума.

Сглаживание заданного значения (Setpoint Ramping / Filtering): Несмотря на то что эта функциональность может быть реализована посредством внешних функциональных блоков в TIA Portal, возможность постепенного изменения уставки эффективно предотвращает резкие скачки заданного значения, которые могли бы спровоцировать "производный удар".

Использование данных встроенных и легко интегрируемых в TIA Portal методик существенно повышает надёжность и стабильность функционирования PD-регулятора, обеспечивая эффективное решение проблем, типичных для дифференциальной составляющей.

### **3.4 Разработка интерфейса оператора**

Для взаимодействия оператора с системой управления трубчатой печью в среде WinCC Advanced был разработан унифицированный графический интерфейс. Центральное место на экране занимает визуализация печи, включая три клапана и центральную трубу, что обеспечивает оператору наглядное представление о текущем состоянии оборудования. Мониторинг ключевых параметров процесса осуществляется посредством шкал, отображающих температуры в реальном времени (на входе, внутри и выходе печи), а также процент открытия клапана подачи топлива. Общий статус системы индицируется сигнальной лампой, изменяющей свой цвет в соответствии с режимом работы.

На основном дисплее HMI размещены шесть функциональных кнопок, каждая из которых инициирует специфические операции. Кнопка «Start» активирует рабочий процесс, тогда как «Auto» переводит систему в автоматический режим, запуская соответствующие алгоритмы управления. Клавиша «Manual» открывает интерфейс ручного контроля, предоставляя оператору возможность прямого и независимого управления исполнительными механизмами. Для доступа к текущим тревожным сообщениям и журналу событий предусмотрена кнопка «Alarms». Сохранение оперативных данных в базу данных для последующего анализа осуществляется посредством кнопки «SQL». Функциональная кнопка «E-Stop» (Аварийная остановка) предназначена для экстренной остановки: её активация немедленно прекращает все текущие процессы, приводит выходные сигналы в безопасное состояние, и система переходит в защищённый режим (Рисунок 3.7).

Разработанный интерфейс отличается высокой эргономичностью, удобством и интуитивной понятностью в управлении, что способствует быстрому реагированию на аварийные ситуации и поддержанию стабильного контроля над процессами. Расположение всех графических элементов продумано логически: визуальное представление процесса занимает центральную область экрана, тогда как элементы управления размещены в его нижней части. Это минимизирует вероятность ошибок и ускоряет принятие

оперативных решений. Цветовая кодировка была оптимизирована для обеспечения максимального контраста и мгновенного распознавания статуса оборудования – так, зелёный цвет указывает на действующее состояние, а красный – на отключенное.

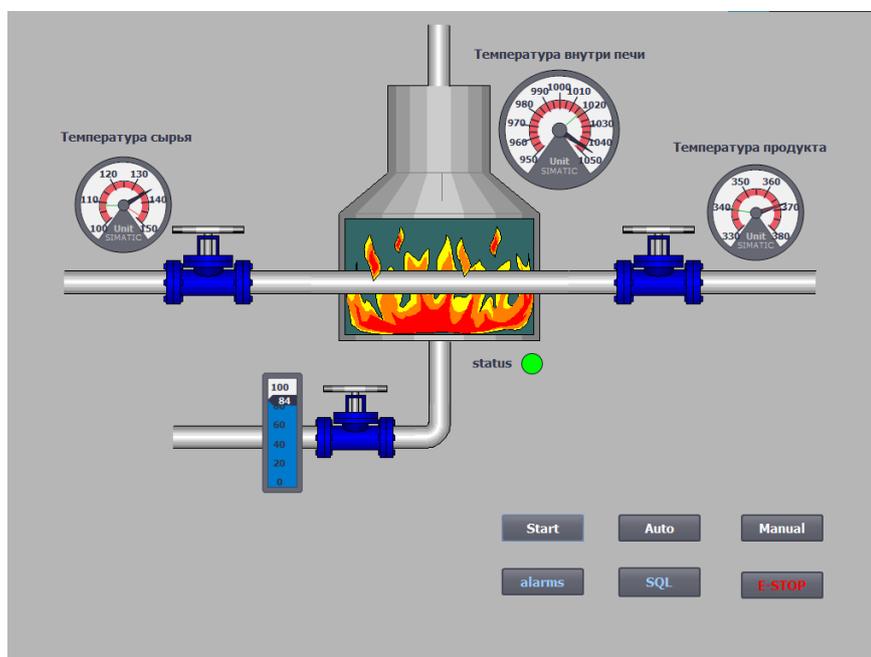


Рисунок 3.7 – Главный экран операторского интерфейса, автоматический режим

Специализированный экран оператора предоставляет доступ к режиму ручного управления, предназначенному для прямого тестирования и манипулирования исполнительными механизмами в обход автоматических алгоритмов. Визуальное оформление данного экрана полностью соответствует дизайну основного интерфейса, что существенно упрощает навигацию оператора. Тем не менее, параметры датчиков, например, температура или текущее положение клапанов, в этом режиме намеренно не отображаются, поскольку его основная задача – обеспечить непосредственный контроль над отдельными компонентами системы.

Данный режим включает три отдельные кнопки, позволяющие управлять тремя клапанами (открытие и закрытие), что дает оператору возможность напрямую регулировать их положение как для настройки, так и в случае нештатных ситуаций. Также интегрирована кнопка для ручного розжига горелки, обеспечивающая её активацию при необходимости. В нижней части экрана удобно расположены две дополнительные навигационные кнопки: «Main» для быстрого возврата к главному дисплею и «Alarms» для прямого перехода к списку текущих и зарегистрированных тревожных сообщений. Подобный набор функций обеспечивает удобство эксплуатации, увеличивает гибкость управления и позволяет осуществлять техническое обслуживание или диагностику без активации автоматических алгоритмов.

Кроме того, ручной режим предоставляет значительные преимущества операторам и техническим специалистам на этапах ввода в эксплуатацию, испытаний оборудования и диагностики неисправностей. Прямой контроль над клапанами и горелкой обеспечивает возможность детального наблюдения за состоянием системы в ситуациях, когда автоматический режим деактивирован или его использование нецелесообразно. Интерфейс разработан с акцентом на максимальную простоту и удобство для пользователя, характеризуется низкой вероятностью ошибок и оперативным откликом на управляющие команды. Наличие кнопки быстрого доступа к аварийным сообщениям служит дополнительной мерой безопасности, позволяя своевременно реагировать на критические события даже в режиме ручного управления. Окно ручного режима отображено на рисунке 3.8.

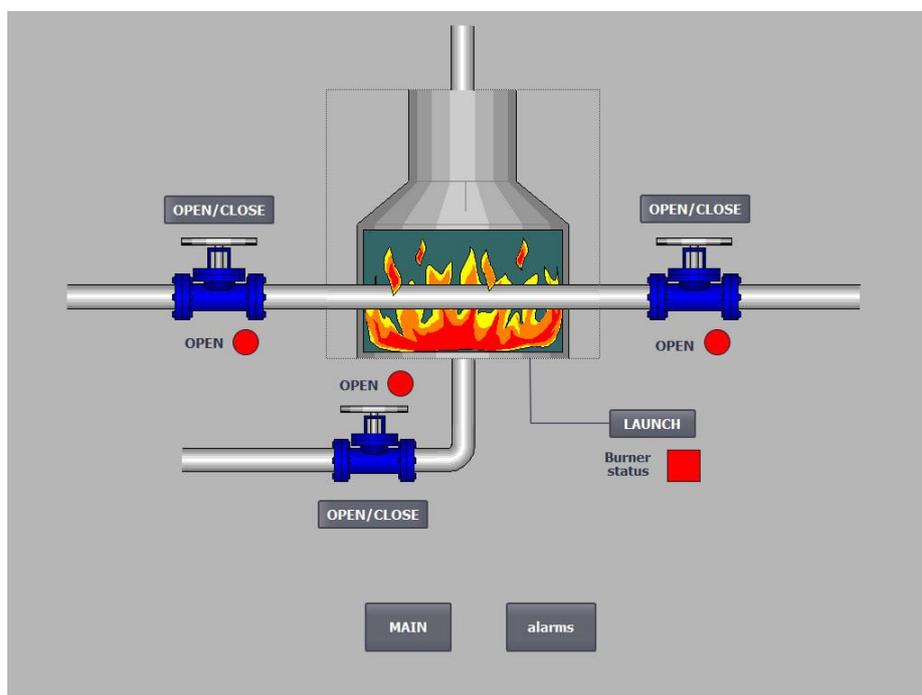


Рисунок 3.8 – Экран ручного режима управления

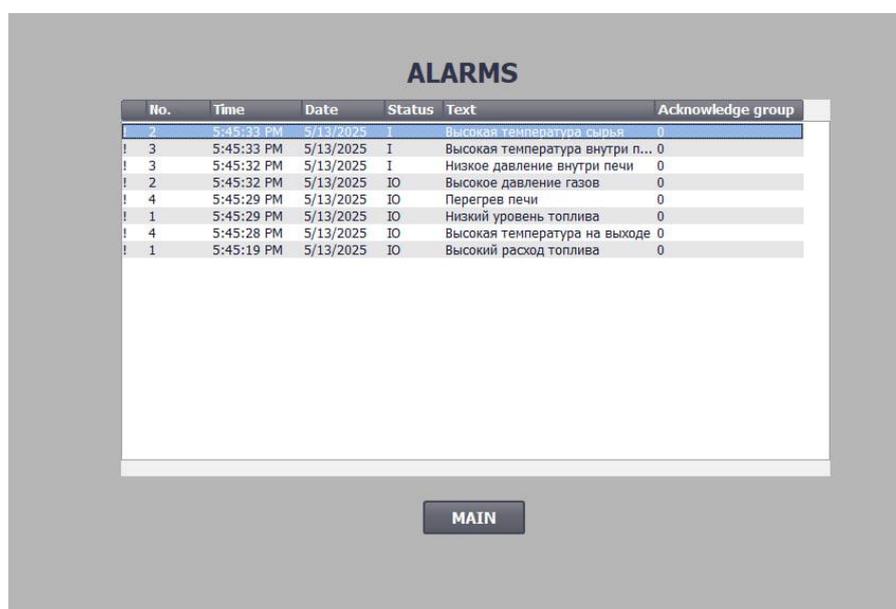
Экран «Alarms» служит центральным пунктом для отображения как активных, так и архивных сообщений о тревогах, предоставляя оператору возможность оперативно оценить состояние безопасности и текущий статус технологического процесса. Здесь представлены аналоговые и дискретные сигналы тревоги, которые классифицированы по типу и уровню критичности.

Аналоговые предупреждения включают уведомления о выходе значений параметров за установленные допустимые диапазоны. Примерами могут служить превышение температуры на входе, внутри или выходе печи, а также повышенный расход топлива. Для каждого такого сообщения выводится текущее показание параметра наряду с пороговым значением, при достижении или превышении которого инициируется тревога. Предусмотрены отдельные сигналы тревоги для критических неисправностей, таких как перегрев печи,

аномально высокое давление газа на выходе, пониженное внутреннее давление печи и недостаточный уровень топлива. Все эти оповещения сопровождаются визуальным индикатором, позволяющим оператору незамедлительно идентифицировать характер и локализацию сбоя.

Для обеспечения удобства навигации и оперативности работы, на экране имеется кнопка «MAIN», предоставляющая быстрый возврат к основному дисплею управления процессом. Этот режим представления аварийных сигналов значительно способствует своевременному обнаружению и устранению неполадок, тем самым повышая общую надёжность и безопасность функционирования системы.

Визуальное представление окна «Alarms», демонстрирующее его работу с отображением актуальных тревожных сообщений, приведено на рисунке 3.9.



No.	Time	Date	Status	Text	Acknowledge group
2	5:45:33 PM	5/13/2025	I	Высокая температура сырья	0
3	5:45:32 PM	5/13/2025	I	Высокая температура внутри п...	0
3	5:45:32 PM	5/13/2025	I	Низкое давление внутри печи	0
2	5:45:32 PM	5/13/2025	IO	Высокое давление газов	0
4	5:45:29 PM	5/13/2025	IO	Перегрев печи	0
1	5:45:29 PM	5/13/2025	IO	Низкий уровень топлива	0
4	5:45:28 PM	5/13/2025	IO	Высокая температура на выходе	0
1	5:45:19 PM	5/13/2025	IO	Высокий расход топлива	0

Рисунок 3.9 – Экран аварийных сообщений

С целью аккумуляции и архивирования технологической информации в систему была осуществлена интеграция с сервером SQL. Неотъемлемой частью данной задачи стала разработка скрипта на языке VBScript (VB\_function), инициирующего передачу актуальных данных процесса в базу данных. Этот процесс активируется соответствующей кнопкой «SQL» на операторском интерфейсе. При её нажатии автоматически считываются текущие значения ключевых параметров, таких как температура на входе, внутри и на выходе печи, расход топлива в литрах в минуту, а также процент открытия клапана подачи топлива.

Аккумуляционная информация передается на сервер базы данных, где загружается в предназначенные для неё таблицы, что даёт возможность последующего анализа, формирования отчётов и долговременного хранения. Архивация этих данных обеспечивает возможность всестороннего изучения изменений технологического процесса, выявления различных тенденций и

отклонений, а также содействует диагностике и оптимизации функционирования оборудования. Более того, накопленный массив данных служит фундаментом для составления отчётности по показателям производственной эффективности и энергопотребления, что является одним из фундаментальных элементов современной промышленной автоматизации.

Следовательно, применение технологии передачи данных на сервер SQL существенно повышает уровень мониторинга и контроля за технологическим процессом, способствуя оптимизации управления и принятию обоснованных решений, базирующихся на верифицированной информации. Таблица выведенных данных представлена на рисунке 3.10.

	ddate	Temp1	Temp2	Temp3	Flow1	ValveState
39	2025-05-29 13:43:45.000	119	1029	349	121	79
40	2025-05-29 13:44:04.000	114	1024	354	126	74
41	2025-05-29 13:44:17.000	146	1056	366	114	66
42	2025-05-29 13:44:33.000	122	1032	350	138	42
43	2025-05-29 13:46:13.000	137	1047	355	123	57
44	2025-05-29 13:46:16.000	106	1016	358	134	66
45	2025-05-29 13:46:18.000	133	1043	341	127	53
46	2025-05-29 13:46:20.000	127	1037	361	113	87
47	2025-05-29 13:46:23.000	129	1039	357	131	49
48	2025-05-29 13:46:38.000	117	1027	355	143	43
49	2025-05-29 13:46:41.000	105	1015	363	135	65
50	2025-05-29 13:46:47.000	109	1019	357	149	51
51	2025-05-29 13:46:50.000	146	1056	366	114	66
52	2025-05-29 13:46:51.000	130	1040	358	110	90
53	2025-05-29 13:46:52.000	109	1019	363	149	51
54	2025-05-29 13:46:56.000	116	1026	352	124	76
55	2025-05-29 13:47:19.000	141	1051	349	119	61
56	2025-05-29 13:47:24.000	140	1050	368	120	60
57	2025-05-29 13:47:29.000	134	1044	366	106	86

Рисунок 3.10 – Архивированные данные

В рамках выполнения программной части проекта была создана комплексная система автоматического управления трубчатой печью. Данная система охватывает разработку управляющей логики, внедрение ручного и автоматического режимов функционирования, а также интеграцию модуля мониторинга и системы аварийной сигнализации. Операторская консоль укомплектована основными встроенными панелями, предназначенными для визуального контроля технологического процесса, манипулирования исполнительными устройствами и оперативной обработки тревожных сообщений. Дополнительно предусмотрена возможность сопряжения с сервером SQL для архивирования и дальнейшего анализа критически важных параметров процесса.

Следовательно, представленное программное решение гарантирует всесторонний контроль над производственным циклом, существенно увеличивает надёжность и безопасность эксплуатации, а также обеспечивает комфортные инструменты для отслеживания операций и принятия взвешенных решений. Данная автоматизированная система полностью подготовлена к промышленному внедрению и дальнейшей эксплуатации [9].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения дипломного проекта поставленная задача выполнена: разработана автоматическая система регулирования трубчатой печью при переработке нефти.

На начальном этапе работы был проведен тщательный анализ технологического цикла и системы работы печи. Разработаны функциональные и структурные схемы, определены точки регулирования, сигнализации и управления, выбран необходимый аппаратный комплекс с учетом характеристик объекта.

В аналитической части проекта было проведено математическое моделирование системы регулирования температуры. После расчета передаточной функции установки и наблюдения за поведением системы в отсутствие регулирующего устройства было установлено, что требуется типовой регулятор. В качестве первого решения был использован ПД-регулятор с дальнейшей настройкой параметров с помощью программного инструмента pidtune. Однако качество достигнутой стабилизации было недостаточно точным, особенно при возмущении процесса.

Для минимизации отклонений выходного параметра от заданного значения был использован метод оптимизации на основе генетического алгоритма. С помощью этого подхода удалось значительно улучшить систему по критерию общей абсолютной погрешности (SAE). Полученные параметры были преобразованы в дискретный формат, чтобы их можно было применить в реальных аппаратных системах управления.

Заключительный этап проекта состоял в разработке программного обеспечения на платформе TIA Portal с использованием среды визуализации WinCC Advanced. В систему были реализованы функции автоматического/ручного переключения режимов, система сигнализации аварийных ситуаций и механизм архивирования данных в базе данных SQL, что сделало ее более удобной и надежной.

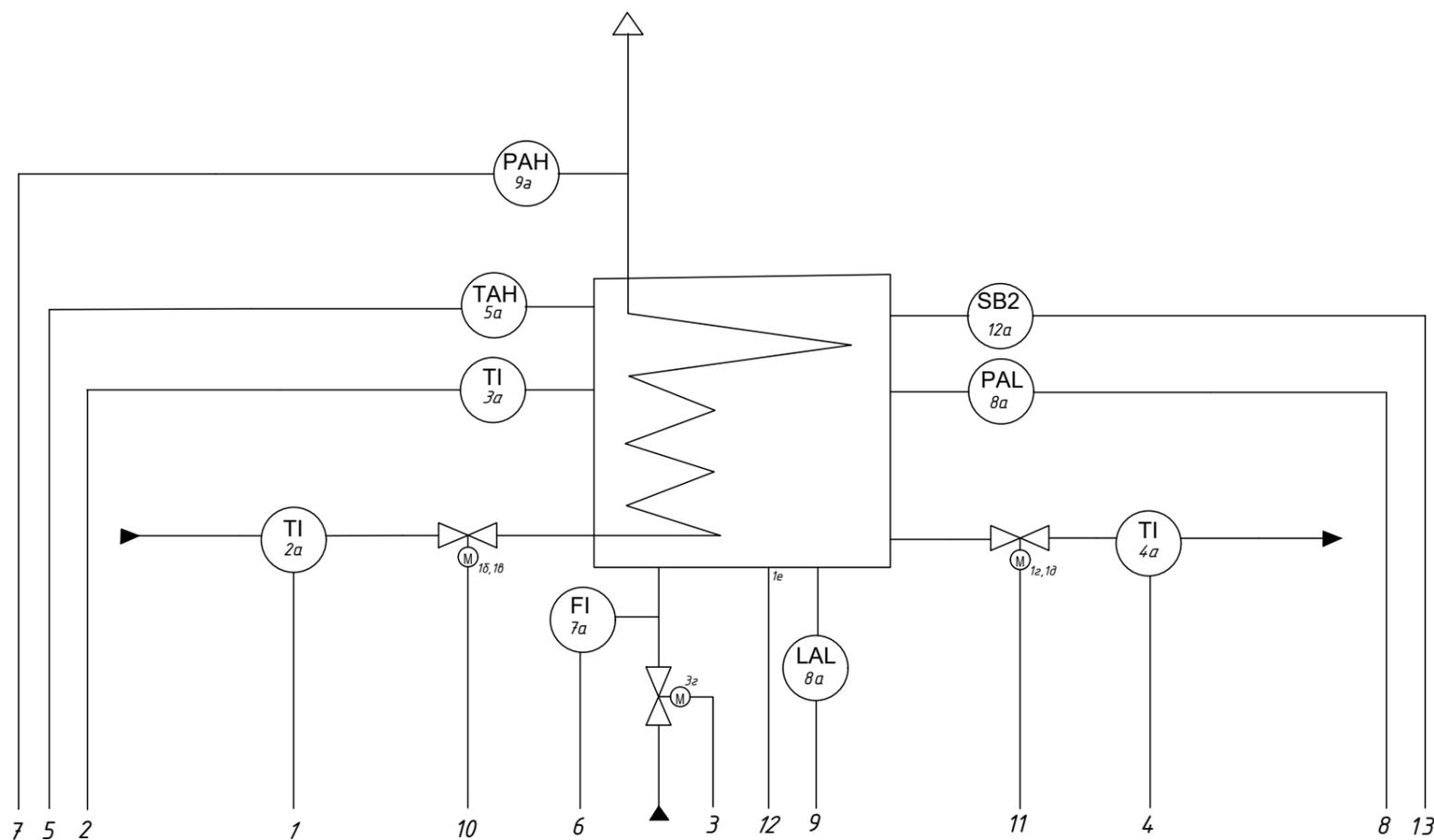
В результате выполненной работы была создана функционально завершенная система автоматического управления, охватывающая все ключевые этапы проектирования – от анализа технологического объекта до полноценной программной реализации. Разработанное решение не только обеспечивает надёжное поддержание температурного режима трубчатой печи, но и адаптировано к условиям реального производственного процесса. Реализация режимов ручного и автоматического управления, интеграция аварийной сигнализации и архивации данных в SQL-базу существенно повышают удобство эксплуатации и уровень технологической безопасности. Полученный результат подтверждает практическую применимость подхода и может служить основой для последующих инженерных разработок и модернизации существующих систем регулирования в нефтеперерабатывающей отрасли.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Ильина Т.Ф., Абакачева Е.М. Трубчатые печи: учеб. пособие / Т.Ф. Ильина, Е.М. Абакачева. – Стерлитамак: Уфимский гос. нефтяной технический ун-т, 2013. – 99 с.
- 2 Ягудин М.Н. Тепловой и аэродинамический расчет трубчатых печей / М.Н. Ягудин. – Уфа: Издательство ГУП ИНХП РБ, 2008. – 210 с.
- 3 ГОСТ 21.208-2013 «Система проектной документации для строительства. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах.»
- 4 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Москва: Издательство Наука, 1975. – 759 с.
- 5 Кошимбаев Ш.К. Автоматизация типовых технологических процессов: учеб. пособие / Ш. К. Кошимбаев, С. С. Жусупбеков. – Алматы : КазНИТУ, 2016. – 276 с.
- 6 Wang L. PID Control System Design and Automatic Tuning using MATLAB/Simulink / L. Wang. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. – 368 p.
- 7 Chemin Y.-H., Engelbrecht A. (eds.) Genetic Algorithms: Theory, Design and Programming / Y.-H. Chemin, A. Engelbrecht (eds.). – London: IntechOpen, 2024. – 100 p.
- 8 Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Физматлит, 2006. – 319 с.
- 9 Stenerson J., Deeg D. Programming Siemens Step 7 (TIA Portal), a Practical and Understandable Approach / J. Stenerson, D. Deeg. – 2nd ed. – Independent Publishing, 2023. – 350 p.

## **Приложение А**

### **Функциональная схема автоматизации**



Поз.	Наименование	Кол.	Примечание
2а, 4а	Термометр сопротивления Pt100	2	
3а	Термопара типа S	1	
1б, 1в	Клапан подачи нефти VXF41	1	
3з	Клапан подачи топлива VXF41	1	
1з, 1д	Клапан на выходе VVF61.100-450K	1	
5а	Термореле TSH200	1	
7а	Расходомер топлива FC430	1	
8а, 9а	Реле давления P280	2	
10а	Вибрационный сигнализатор уровня LVL200	1	
12а	Аварийная кнопка SIRIUS 3SU1-1AA20	1	

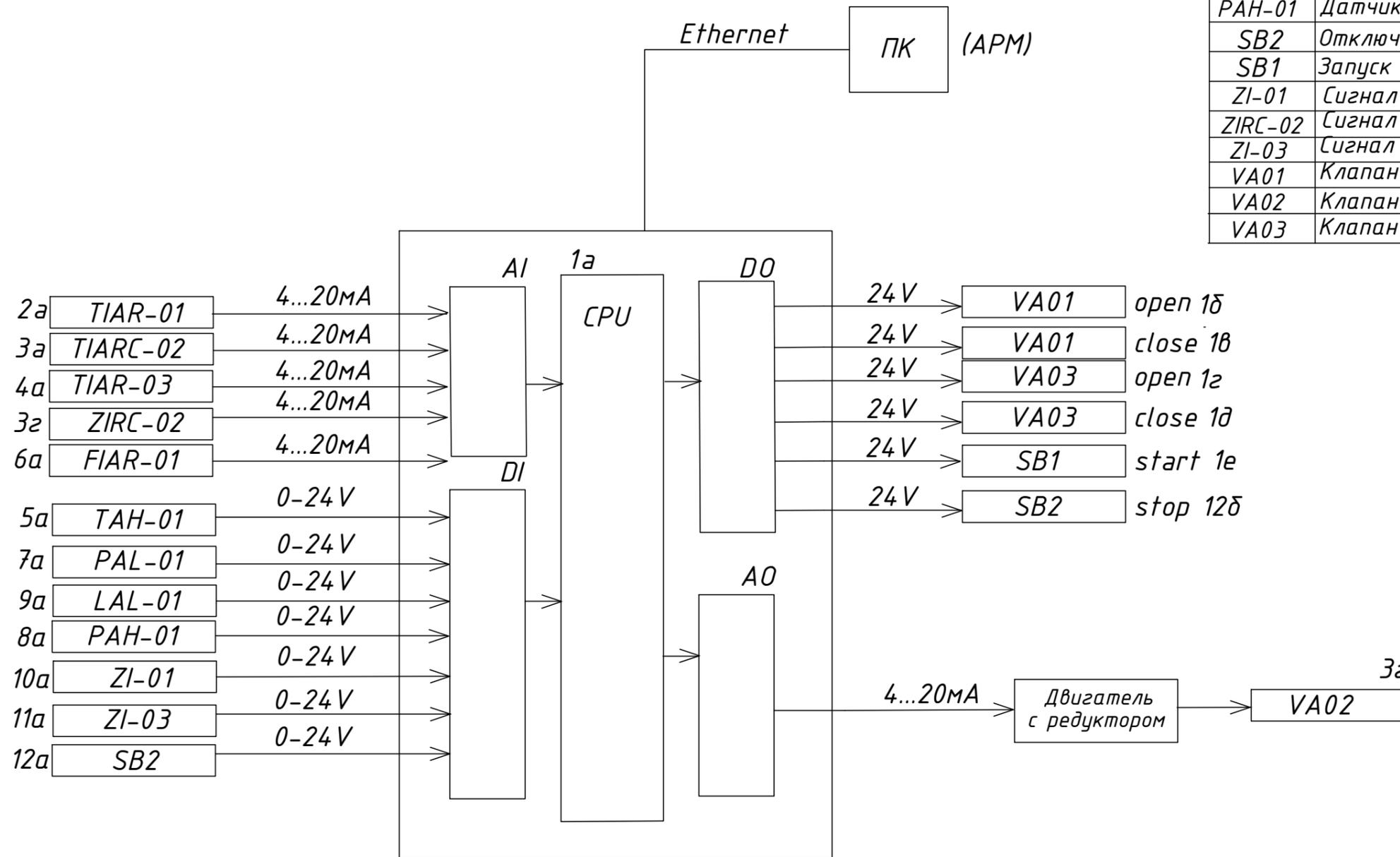
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Приборы по месту														
Электро-техническая часть проекта											NS,HS 10а	NS,HS 11а		
Щит контроллера	Приборы на щите	TIAR 2а	TIARC 3б		TIAR 4б		FIAR 6а						SB2 12б	
	CPU 1513-1 PN												SB1 1е	
	Вход AI	○	○	○	○	○	○							
	Вход DI					○		○	○	○	○	○		○
Выход AO			○											
Выход DO														
SCADA (HMI)		T1 2б	T2 3б	Z2 3д	T3 4б	T4 5б	F1 6б	P1 7б	P2 8б	L1 9б	Z1 10б	Z3 11б	SB1 1е	SB2 12б
В погале	Назначение	Измерение температур на входе трубопровода	Контроль регулирования температуры внутри печи за счет подачи топлива	Измерение температур. выходного сырья	Контроль перегрева	Измерение расхода топлива	Контроль высокого давления	Контроль низкого давления	Контроль уровня топлива	Контроль и управление открытием/ закрытием клапана	Контроль и управление открытием/ закрытием клапана	Запуск	Аварийная кнопка	

					<b>Дипломный проект</b>			
Изм	Лист	№ докум.	Погр.	Дата	Разработка системы автоматического регулирования тепловыми процессами при переработке нефти	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Альмухамбетов А.К.							1:1
Пров.	Ширяева О. И.					Функциональная схема автоматизации		
Т.контр.						Лист 1	Листов 2	
Н.контр.	Манатов К. А.				<b>Кафедра АуЧ</b>			
Утв.								

## **Приложение Б**

### Структурная схема автоматизации

Поз.	Наименование	Кол.	Примечание
TIAR-01	Датчик температуры перед VA01		
TIARC-02	Датчик температуры внутри печи		
TIAR-03	Датчик температуры после VA03		
FIAR-01	Расход топлива перед VA02		
TAH-01	Критический перегрев печи		
PAL-01	Низкое давление газа		
LAL-01	Критически низкий уровень топлива		
PAH-01	Датчик давления на выходе газов		
SB2	Отключение системы		
SB1	Запуск горелки		
ZI-01	Сигнал с клапана VA01		
ZIRC-02	Сигнал с клапана VA02		
ZI-03	Сигнал с клапана VA03		
VA01	Клапан		
VA02	Клапан		
VA03	Клапан		



					<b>Дипломный проект</b>			
Изм.	Лист	№ докум.	Погр.	Дата	Разработка системы автоматического регулирования тепловыми процессами при переработке нефти <i>Структурная схема автоматизации</i>	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Альмухамбетов А.К.							1:1
Пров.	Ширяева О. И.							
Т.контр.						Лист 2	Листов 2	
Н.контр.	Манатов К. А.				<b>Кафедра АуУ</b>			
Утв.								

## РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект студента  
Альмухамбетова Алишера Куатовича  
6B07103 – Автоматизация и роботизация

На тему: Разработка системы автоматического регулирования тепловыми процессами при переработке нефти

Выполнено:

- а) презентация на 26 слайдах
- б) пояснительная записка на 60 страницах

## ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Разработка систем автоматического регулирования тепловыми процессами при переработке нефти актуальна для повышения эффективности производства, точного контроля температур, снижения расхода энергии и минимизации аварийных рисков.

В пояснительной записке, предоставленной на рецензирование, показана разработка автоматизированной системы управления трубчатой печью для первичной перегонки нефти.

В первом разделе проведен всесторонний анализ объекта автоматизации, определены его конструктивные особенности и принципы функционирования. Идентифицированы ключевые точки для контроля, управления и сигнализации, что легло в основу функциональной и структурной схем системы.

Во втором разделе для достижения достоверности математической модели объекта применены методы структурной и параметрической идентификации. На основе модели выполнен анализ устойчивости системы и синтез регулятора с использованием методики pidtune и генетического алгоритма.

В третьем разделе разработана программная реализация управляющей системы в среде TIA Portal. Она включает логическое управление, операторский интерфейс и подключение к SQL-серверу для хранения технологических данных, с возможностью ручного и автоматического режимов управления.

Графический и текстовый материал оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ, предъявляемыми к оформлению учебных работ.

Данный дипломный проект отличает проработанность, полнота изложенного теоретического материала и глубина проведенных исследований. Приведённые исследования доказывают отличную теоретическую подготовку дипломанта.

Замечания:

1. Оценки качества переходного процесса описаны до графика (Рисунок 2.8).

## Оценка работы

Учитывая вышеизложенное, считаю, что дипломный проект заслуживает оценки «95» (отлично), а студент Альмухамбетов Алишер Куатович присвоения академической степени бакалавра по специальности 6B07103 – Автоматизация и роботизация.



Абжанова Л.К.

**ОТЗЫВ**

**НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

На дипломный проект

Альмухамбетов Алишер Куатович

6В07103 – Автоматизация и роботизация

Тема: Разработка системы автоматического регулирования тепловыми процессами при  
переработке нефти

Перед дипломантом ставилась задача разработки системы автоматического регулирования тепловыми процессами в трубчатой печи, задействованной при переработке нефти.

В первом разделе дипломного проекта был изучен и исследован технологический процесс первичной перегонки нефти. Детально был рассмотрен объект автоматизации – трубчатая печь, по которому далее была составлена функциональная и структурная схемы управляющей системы.

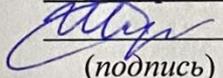
Для разработанной системы управления была получена математическая модель управляемого объекта, для достижения максимальной достоверности которой были задействованы методы как структурной, так и параметрической идентификации. На базе полученной модели был произведен тщательный анализ устойчивости системы, а также выполнен синтез регулятора с применением методики pidtune и генетического алгоритма. Разработанная система получила свою программную реализацию в среде TIA Portal. Она включает в себя логическую часть управления, интуитивно понятный операторский интерфейс и функционал для подключения к SQL-серверу, предназначенному для систематического хранения технологических данных.

В процессе выполнения проекта автор успешно продемонстрировал свою дисциплинированность, исполнительность и трудолюбие, подкрепленные прочной теоретической базой.

Заключение: Считаю, что дипломант справился с поставленной задачей, дипломный проект соответствует требованиям, предъявляемым к дипломным проектам по специальности 6В07103 – Автоматизация и робототехника. На основании характеристики выполненных исследований, уровня и качества выполненных результатов студент Альмухамбетов Алишер Куатович допускается к защите.

**Научный руководитель**

ассоциированный профессор. канд. техн. наук.

 Ширяева О.И.  
(подпись)

«05» июня 2025 г.

## Протокол анализа Отчета подобия Научным руководителем

Заявляю, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

**Автор:** Альмухамбетов Алишер Куатович

**Название:** Разработка системы автоматического регулирования тепловыми процессами при переработке нефти

**Координатор:** Ширяева Ольга Ивановна

**Коэффициент подобия 1:** 0.78

**Коэффициент подобия 2:** 0.29

**Замена букв:** 6

**Интервалы:** 0

**Микропробелы:** 13

**Белые знаки:** 0

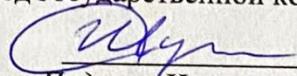
**После анализа Отчета подобия констатирую следующее:**

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, не допускаю работу к защите.

Обоснование: В результате проверки на антиплагиат были получены коэффициенты: Коэффициент подобия 1: 0.78 и Коэффициент подобия 2: 0.29. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите перед государственной комиссией.

«05» июня 2025 г.

Дата

  
Подпись Научного руководителя

**Протокол анализа Отчета подобия  
заведующего кафедрой / начальника структурного подразделения**

Заведующий кафедрой / начальника структурного подразделения заявляет, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

**Автор:** Альмухамбетов Алишер Куатович

**Название:** Разработка системы автоматического регулирования тепловыми процессами при переработке нефти

**Координатор:** Ширяева Ольга Ивановна

**Коэффициент подобия 1:** 0.78

**Коэффициент подобия 2:** 0.29

**Замена букв:** 6

**Интервалы:** 0

**Микропробелы:** 13

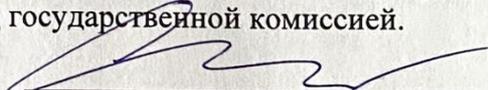
**Белые знаки:** 0

**После анализа отчета подобия заведующий кафедрой / начальника структурного подразделения констатирует следующее:**

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем не допускаю работу к защите.

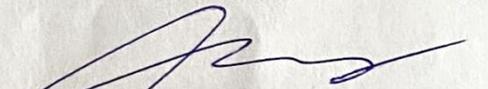
Обоснование: В результате проверки на антиплагиат были получены коэффициенты: Коэффициент подобия 1: 0.78 и Коэффициент подобия 2: 0.29. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите перед государственной комиссией.

«14» июня 2025 г.  
Дата

  
Подпись заведующего кафедрой /  
начальника структурного подразделения

**Окончательное решение в отношении допуска к защите, включая обоснование:**  
Дипломный проект допускается к защите.

«14» июня 2025 г.  
Дата

  
Подпись заведующего кафедрой /  
начальника структурного подразделения