

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

Мукашев Ахмет Серикулы

Разработка интегрированной системы управления технологическим процессом сушильной
камеры с использованием PID-регуляторов и методов машинного обучения

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

На тему: «Разработка интегрированной системы управления технологическим процессом
сушильной камеры с использованием PID-регуляторов и методов машинного обучения»

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Выполнил

Мукашев А.С.

Рецензент
доктор PhD,
доцент кафедры Автоматизации и Управления
АУЭС им. Даукеева

Оракбаев Е.Ж.
(подпись)

«13» июня 2025 г.

Научный руководитель
PhD,
старший преподаватель

Кулакова Е.А.
(подпись)

«13» июня 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

6B07103 – Автоматизация и роботизация



ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Обучающемуся Мукашеву А.С.

Тема: «Разработка интегрированной системы управления технологическим процессом
сушильной камеры с использованием PID-регуляторов и методов машинного обучения»

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

Срок сдачи законченной работы: «30» мая 2025 г.

Исходные данные к дипломному проекту: технологическая схема промышленной сушильной
камеры, математическое описание динамики системы в виде передаточной функции

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов:

а) описание структуры и принципа работы сушильной камеры, включая основные параметры
технологического процесса сушки материалов;

б) разработка автоматизированной системы управления: выбор архитектуры системы,
построение функциональной схемы автоматизации, подбор оборудования и программной
платформы;

в) математическое моделирование объекта управления и анализ устойчивости системы в
замкнутом контуре

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):
функциональная схема автоматизации процесса сушки.

Рекомендуемая основная литература:

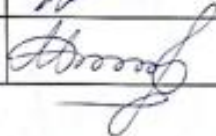
1 Огородников С.Ф. Автоматизация технологических процессов. – БХВ-Петербург, 2011. –
345 с.

2 Астром К., Хагглунд Т. – PID-регуляторы. Теория, настройка и применение – СПб: БХВ-
Петербург, 2007. – 468с.

ГРАФИК
подготовки дипломного проекта

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологический раздел Описание технологического процесса сушки материалов в сушильной камере	23.05.2025 г.	
Расчетный раздел Математическое моделирование объекта управления и анализ устойчивости системы и синтез PID-регулятора и формирование обучающей выборки	27.05.2025 г.	
Программный раздел Реализация логики управления и SCADA-системы в TIA Portal	30.05.2025 г.	

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

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Технологический раздел	Е. А. Кулакова, PhD	23.05.25	
Расчетный раздел	Е. А. Кулакова, PhD	27.05.25	
Нормоконтролер	К. А. Манатов, Магистр техн. наук	02.06.25	

Научный руководитель


подпись

Кулакова Е.А.

Задание принял к исполнению обучающийся


подпись

Мукашев А.С.

Дата

« 27 » 05 2025 г.

АНДАТПА

«PID контроллерлері мен машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы кептіру камерасын басқарудың интеграцияланған жүйесін құру» дипломдық жобасы өнеркәсіптік кептіру камерасын автоматты басқару жүйесінің құрылысын қарастырады. Жұмыс үш негізгі бөлімнен тұрады: теориялық, есептеу және бағдарламалық қамтамасыз ету.

Теориялық бөлімде кептіру камераларының жұмыс істеу принциптері, жоғары температурада кептіру кезіндегі жылу және масса алмасу ерекшеліктері және бұл процесті автоматтандыру тәсілдері қарастырылады.

Есептеу бөлімінде басқару объектісінің математикалық моделі берілген, екінші ретті тасымалдау функциясы алынған, жүйе тұрақтылығының талдауы кері байланыс қажеттілігін көрсетті. PID контроллерінің синтезі жүргізілді.

Бағдарламалық құралды енгізу TIA Portal ортасында Siemens S7-1500 сериялы контроллері арқылы жүзеге асырылды. Басқару алгоритмі объектінің температуралық және уақыттық сипаттамаларын ескере отырып жүзеге асырылады, параметрлерді визуализациялау және қашықтан басқару қамтамасыз етіледі.

АННОТАЦИЯ

В дипломном проекте «Разработка интегрированной системы управления технологическим процессом сушильной камеры с использованием PID-регуляторов и методов машинного обучения» рассматривается построение системы автоматического управления для промышленной сушильной камеры. Работа включает три основные части: теоретическую, расчетную и программную.

В теоретической части рассмотрены принципы работы сушильных камер, особенности теплообмена при высокотемпературной сушке и подходы к автоматизации данного процесса.

В расчетной части представлена математическая модель объекта управления, получена передаточная функция второго порядка, анализ устойчивости системы показал необходимость обратной связи. Проведен синтез PID-регулятора.

Программная реализация выполнена в среде TIA Portal с использованием контроллера Siemens серии S7-1500. Алгоритм управления реализован с учетом температурных и временных характеристик объекта, обеспечена визуализация параметров и дистанционное управление.

ANNOTATION

The diploma project "Development of an integrated process control system for a drying chamber using PID controllers and machine learning methods" considers the construction of an automatic control system for an industrial drying chamber. The work includes three main parts: theoretical, computational and software.

The theoretical part considers the operating principles of drying chambers, the features of heat and mass transfer during high-temperature drying and approaches to automating this process.

The computational part presents a mathematical model of the control object, a second-order transfer function is obtained, and an analysis of the system stability showed the need for feedback. A PID controller is synthesized.

The software implementation is performed in the TIA Portal environment using a Siemens S7-1500 series controller. The control algorithm is implemented taking into account the temperature and time characteristics of the object, visualization of parameters and remote control are provided.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Технологическая часть	8
1.1 Объект автоматизации	8
1.2 Технологический процесс	8
1.3 Технические характеристики сушильного шкафа	10
1.4 Требования к системе управления	11
2 Расчетная часть	12
2.1 Построение математической модели	12
2.2 Анализ динамических свойств	14
2.3 Постановка задачи для синтеза контуров управления	16
2.4 Выбор метода настройки регулятора	16
2.5 Формирование обучающего набора данных по математической модели объекта	19
2.6 Синтез ПИД-регулятора на основе численного моделирования замкнутой системы	21
3 Программная реализация	25
4 Разработка SCADA системы	30
4.1 Постановка задачи для логического управления сушильным шкафом в TiaPortal	30
4.2 Подготовка входных и выходных сигналов	32
4.3 Разработка программы в TiaPortal на языке LAD	33
4.4 Разработка SCADA системы	38
Заключение	40
Список использованной литературы	41
Приложение А	42
Приложение Б	43

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем дипломном проекте рассматривается разработка системы автоматизированного управления сушильным шкафом промышленного назначения.

Актуальность проекта обусловлена растущей потребностью в эффективных и стабильных процессах сушки материалов, где требования к качеству и однородности обработки возрастают вместе с развитием технологий производства. Современные предприятия предъявляют высокие требования к точности поддержания температурных режимов, равномерности прогрева материала и энергоэффективности оборудования, что делает внедрение автоматизированных систем управления особенно значимым.

Целью данного дипломного проекта является создание надёжной и устойчивой системы управления сушильным шкафом с применением ПИД-регуляторов, способной обеспечить высокую стабильность процесса сушки за счёт оптимизации регулирования температуры и циркуляции воздуха.

Задачи для выполнения. В ходе работы необходимо решить ряд задач, среди которых разработка математической модели объекта управления, обоснование выбора применяемых технических средств, проектирование алгоритмов регулирования, а также реализация системы управления на программируемом логическом контроллере.

Общая характеристика. Проект опирается на использование проверенных промышленных компонентов и включает создание модели динамики сушильного шкафа с учётом влияния нагревателя и системы циркуляции воздуха. Дополнительно произведены расчёты параметров ПИД-регулятора методами частотного анализа, а также реализована настройка по второму методу с учётом особенностей переходного процесса. В рамках проекта обеспечено соответствие технических решений требованиям надёжности, безопасности эксплуатации и технической эстетики, что позволяет рассматривать разработанную систему как полнофункциональное решение для автоматизации процессов сушки на промышленных объектах.

1 Технологическая часть

1.1 Объект автоматизации

Объектом автоматизации в дипломном проекте является промышленный сушильный шкаф ШСв 1,0м×1,0м×1,0м предназначенный для сушки различных материалов при контролируемых условиях температуры и циркуляции воздуха. Конструкция шкафа представляет собой термоизолированную камеру объемом 1000 литров, оснащённую электрическим нагревателем и системой принудительной вентиляции. Воздух в шкафу нагревается в отдельном воздуховоде, после чего равномерно распределяется по внутреннему объёму с помощью вентилятора, установленного в верхней части шкафа [1]. Перемещение нагретого воздуха направлено с задней стенки к размещённым на полках материалам, что обеспечивает равномерное высушивание и предотвращает образование локальных зон перегрева или переувлажнения.

Работа вентилятора осуществляется посредством электродвигателя переменного тока, который обеспечивает стабильную циркуляцию воздуха и необходимое давление внутри шкафа [2]. Нагревательный элемент управляется в зависимости от заданной температуры сушильного процесса, причём поддержание температуры осуществляется по замкнутому контуру с применением температурного датчика, размещённого в рабочей зоне. Система управления шкафом предусматривает реализацию алгоритмов регулирования температуры и скорости воздушного потока для достижения оптимального режима сушки при минимальных энергозатратах. Основные требования к автоматизации объекта включают обеспечение высокой точности поддержания заданной температуры, надёжность работы оборудования в условиях высоких температур и удобство эксплуатации для обслуживающего персонала.

1.2 Технологический процесс

Сушильный шкаф — это специализированное устройство, которое играет важную роль в технологических процессах, связанных с удалением влаги из различных материалов. Основное предназначение данного оборудования заключается в создании контролируемой среды, способствующей испарению жидкости, будь то вода или другие летучие соединения, с поверхностей или внутренней структуры обрабатываемых изделий [3]. Вид сушильного шкафа представлен на рисунке 1.1.

Принцип работы сушильного шкафа основан на использовании тепловой энергии, которая равномерно распределяется внутри рабочей камеры. Поддержание стабильного температурного режима и управление уровнями влажности позволяют обеспечивать высокую точность и равномерность сушки, что особенно важно для материалов, чувствительных к изменениям температуры [1]. Современные модели сушильных шкафов оснащены множеством функций,

включая возможность тонкой настройки температуры, скорости воздушного потока, а также контроля за временем сушки, что делает процесс управления удобным и эффективным.

Одной из главных особенностей сушильного шкафа является его универсальность. Данное оборудование находит применение в самых разных областях: от промышленного производства, где требуется обработка больших объемов материалов, до научно-исследовательских лабораторий, где важно сохранять точность и повторяемость результатов [4]. Также сушильные шкафы широко используются в пищевой, медицинской и химической промышленности, поскольку они обеспечивают надежное и качественное удаление влаги, что, в свою очередь, способствует повышению срока годности и улучшению характеристик готовой продукции.

Эффективность работы сушильного шкафа достигается за счет применения инновационных технологий, таких как системы циркуляции воздуха, которые обеспечивают его равномерное распределение внутри камеры. Это позволяет минимизировать перепады температуры, исключить появление зон с различными уровнями влажности и гарантировать равномерную обработку материалов [2].



Рисунок 1.1 – Сушильный шкаф

Таким образом, сушильный шкаф является ключевым элементом в производственных и технологических процессах, где требуется контроль за уровнем влажности [2]. Благодаря своей надежности, универсальности и

высокому уровню автоматизации он способствует достижению высокой производительности и качества обработки, что делает его незаменимым инструментом в различных отраслях [3].

1.3 Технические характеристики сушильного шкафа

Промышленный сушильный шкаф модели ШСв 1,0м×1,0м×1,0м предназначен для термической обработки материалов при температуре до 600 °С. Объем рабочей камеры составляет 1000 литров, а регулируемый диапазон температур — от +50 до +600 °С. Камера выполнена из оцинкованной стали. Вентилятор, установленный на крыше шкафа, создает воздушный поток, который направляется через воздуховод, где установлен электрический нагревательный элемент. Воздух нагревается и далее поступает в заднюю стенку камеры, где разделяется на несколько потоков. Эти потоки поступают в рабочую камеру через отверстия в полках, обеспечивая равномерное распределение горячего воздуха по всему объему [3]. После прохождения через материал воздух поднимается вверх, возвращаясь к вентилятору, тем самым обеспечивая непрерывную циркуляцию. Такое решение повышает эффективность теплопередачи и равномерность сушки. Рассмотрим краткую характеристику сушильного шкафа, описанного в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристика сушильного шкафа

Характеристика	Описание
Тип сушильного шкафа	Сушильный шкаф с принудительной циркуляцией воздуха
Размер рабочей камеры, м	1,0×1,0×1,0
Диапазон регулируемых рабочих температур, °С	+50.. +600
Объём рабочей камеры, л	1000
Температура отключения задаваемая по термоконтроллеру, °С	670
Материал рабочей камеры	Оцинкованная сталь

1.4 Требования к системе управления

К системе управления промышленным сушильным шкафом предъявляются следующие основные требования:

- а) обеспечение стабильного поддержания заданной температуры в камере с минимальными отклонениями от уставки в условиях переменных тепловых нагрузок;
- б) обеспечение надёжной работы системы циркуляции воздуха для равномерного распределения температуры по всему объёму сушильного шкафа;
- в) минимизация времени выхода системы на установившийся режим без превышения допустимого диапазона температуры материалов;
- г) высокая устойчивость к внешним возмущениям, связанным с открытием дверцы шкафа или изменением загрузки;
- д) простота эксплуатации и обслуживания, включая удобный интерфейс для оператора и наличие средств диагностики неисправностей;
- е) возможность гибкой настройки параметров процесса в зависимости от типа и свойств обрабатываемого материала;
- з) защита системы управления от перегрева, коротких замыканий и других аварийных режимов работы;

Цель автоматизации сушильного шкафа заключается в обеспечении стабильного, эффективного и безопасного технологического процесса сушки материалов путём автоматического поддержания заданных температурных режимов, оптимизации работы систем вентиляции и нагрева, а также минимизации участия оператора в процессе управления.

Назначение системы управления состоит в том, чтобы обеспечить высокое качество сушки материалов при различных производственных условиях, гарантировать равномерность температурного распределения внутри рабочей камеры, снизить энергозатраты, увеличить ресурс оборудования за счёт оптимальных режимов работы и обеспечить защиту технологического процесса от аварийных ситуаций [4].

2 Расчетная часть

2.1 Построение математической модели

В технологическом процессе используются два ключевых элемента с динамической инерцией:

а) Электрический нагревательный элемент, осуществляющий постепенный нагрев воздуха;

б) Электропривод вентилятора, обеспечивающий циркуляцию нагретого воздуха в сушильной камере.

Каждое из этих звеньев обладает инерционностью и может быть описано апериодическим звеном первого порядка.

$$W_{\text{ТЭН}}(s) = \frac{1}{0.875s + 1} , \quad (2.1)$$

$$W_{\text{вент}}(s) = \frac{1}{0.5714s + 1} . \quad (2.2)$$

Их последовательное соединение отражает совокупное динамическое поведение системы, представленное моделью второго порядка в разомкнутом виде.

$$G(s) = W_{\text{ТЭН}}(s) * W_{\text{вент}}(s) = \frac{1}{s^2 + 0.125s + 0.5} . \quad (2.3)$$

В замкнутом виде система имеет следующий вид:

$$T(s) = \frac{1}{s^2 + 0.125s + 1.5} . \quad (2.4)$$

Проверим данные математические модели на устойчивость, для этого каждое характеристическое уравнение приравняем к 0 и найдем полюса используя MATLAB [5].

Для разомкнутой системы:

$$s^2 + 0.125s + 0.5 = 0 . \quad (2.5)$$

Далее для анализа работы системы, рассмотрим рисунок 2.1, на котором представлен процесс нахождения корней характеристического уравнения.

```
>> G = tf([1],[1 0.125 0.5])
pole(G)

G =

          1
-----
s^2 + 0.125 s + 0.5

Continuous-time transfer function.

ans =

-0.0625 + 0.7043i
-0.0625 - 0.7043i
```

Рисунок 2.1 – Нахождение полюсов характеристического уравнения разомкнутой системы

Вывод: для оценки устойчивости применим первый метод Ляпунова. Первый метод Ляпунова, также известный как прямой метод Ляпунова, является фундаментальным инструментом в теории устойчивости динамических систем [6]. По первому методу Ляпунова, данная система устойчива, так как вещественные корни характеристического уравнения отрицательны [7].

Для замкнутой системы, также с нахождением полюсов характеристического уравнения замкнутой системы представлена ниже, как рисунок 2.2:

$$s^2 + 0.125s + 0.5 = 0 \quad . \quad (2.6)$$

```
>> T = feedback(G,1)
pole(T)

T =

          1
-----
s^2 + 0.125 s + 1.5

Continuous-time transfer function.

ans =

-0.0625 + 1.2231i
-0.0625 - 1.2231i
```

Рисунок 2.2 – Нахождение полюсов характеристического уравнения замкнутой системы

Вывод: как мы видим, вещественные корни характеристического уравнения отрицательны, а это значит, что по первому методу Ляпунова система устойчива.

2.2 Анализ динамических свойств

Проведем прямые оценки качества для разомкнутой и замкнутой системы, для этого используя команду `step` в MATLAB, изобразим нашу систему в виде графика (рисунок 2.3).

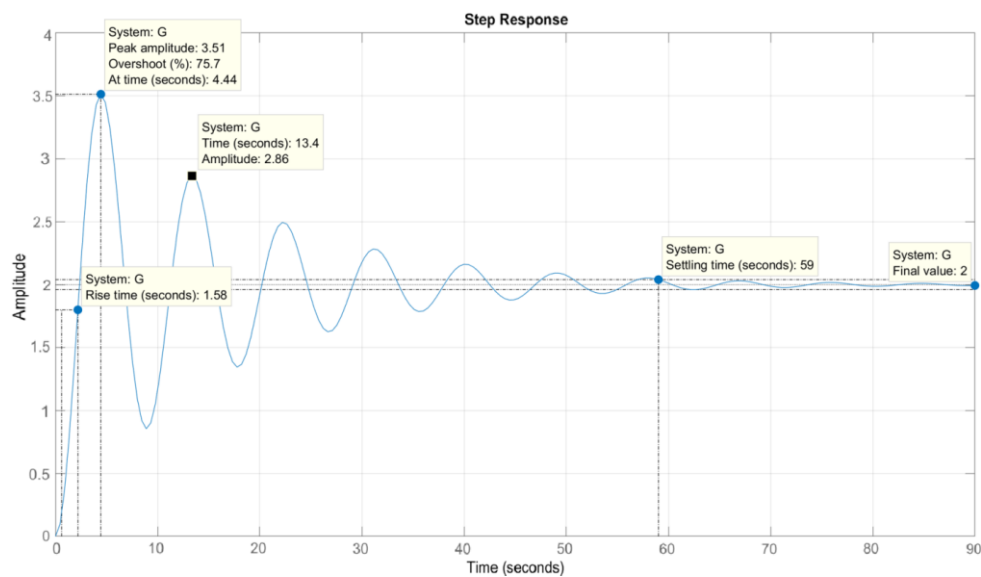


Рисунок 2.3 – Переходной процесс разомкнутой системы с прямыми оценками качества

Таблица 2.1 – Анализ оценок качества разомкнутой системы

Параметры	Разомкнутая система
T_{set}	59 с
P_{ov}	75.7%
M	6
μ	57%
T_{osc} ω_{osc}	11.3 с 0.55 c^{-1}
e_{ss}	1
T_p	4.44 с
T_R	1.58 с
χ	1.75

Вывод: Разомкнутая система в текущей конфигурации не соответствует установленным критериям качества, таким как перерегулирование менее 20%, показателю колебательности, не превышающий 2 циклов, а также требуемая точность функционирования. Для достижения более удовлетворительных характеристик, способствующих повышению производительности, предлагается перейти к рассмотрению замкнутой системы, которая потенциально может обеспечить улучшение указанных параметров [8].

Переходная характеристика замкнутой системы показана на рисунке 2.4, а анализ оценок качества замкнутой системы указан в таблице 2.2.

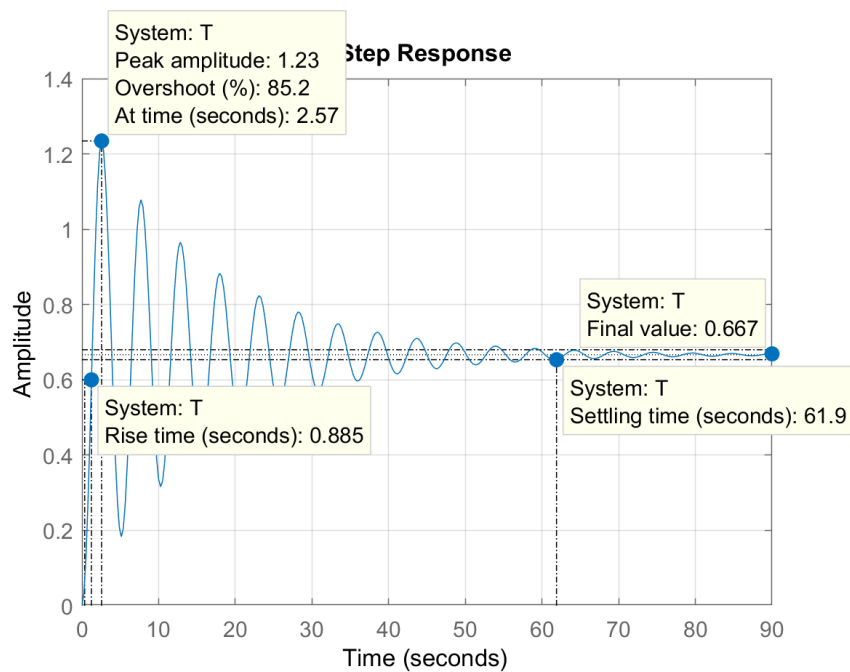


Рисунок 2.4 – Переходная характеристика замкнутой системы

Таблица 2.2 – Анализ оценок качества замкнутой системы

Параметры	Замкнутая система
T_{set}	61.9 с
P_{ov}	85.2%
M	11
μ	136%
T_{osc} ω_{osc}	5 с 1.2 c^{-1}
e_{ss}	0.333

T_p	2.57 с
T_R	0.885 с
χ	0.73

Вывод: можно заметить, что после добавления единичной обратной связи у системы появилось больше колебаний, что сказалось на их числе – 11, перерегулировании – 85%, однако стоит заметить, что выросло быстродействие, теперь время нарастания составляет 0.885 секунд, а также система стала более точной. Так или иначе данная система не отвечает желаемым оценкам качества по перерегулированию, колебательности и точности, поэтому необходимо синтезировать регулятор.

2.3 Постановка задачи для синтеза контуров управления

Для обеспечения высокой точности и устойчивости технологического процесса автоматизированная система должна включать элементы мониторинга в реальном времени, а также механизмы для динамической корректировки параметров [9]. В рамках проектирования таких систем целесообразно использовать регуляторы, которые сочетают пропорциональные, интегральные и дифференциальные компоненты, обеспечивая управление и минимизацию отклонений [10].

Ознакомившись с технологическим процессом, сформулируем две постановки задачи:

Постановка задачи №1. В соответствии с математической моделью замкнутой системы регулирования необходимо синтезировать типовой регулятор с целью стабилизации температуры в сушильном шкафу;

Постановка задачи №2. Согласно техническому заданию, необходимо разработать алгоритм логического управления, а также разработать систему для мониторинга данных в реальном времени.

2.4 Выбор метода настройки регулятора

Перед началом выбора метода настройки регулятора воспользуемся приложением Simulink. Simulink – это удобная среда моделирования, которая позволяет создавать и анализировать сложные системы с помощью блоков. Она предоставляет интуитивный интерфейс, который помогает инженерам визуально воплощать свои идеи и оптимизировать процессы [6]. Благодаря тесной интеграции с математическим анализом можно проводить подробные симуляции и изучать поведение систем под различными условиями. Такой подход упрощает

поиск решений в задачах автоматизации и диагностики, раскрывая потенциал инноваций [7].

Соберем замкнутую модель в Simulink (рисунок 2.5). Подадим уставку с помощью блока Step, разницу между входной и выходной величиной рассчитаем с помощью блока Sum, а также запишем объект управления в блок Transfer function, для построения переходной характеристики воспользуемся блоком Scope.

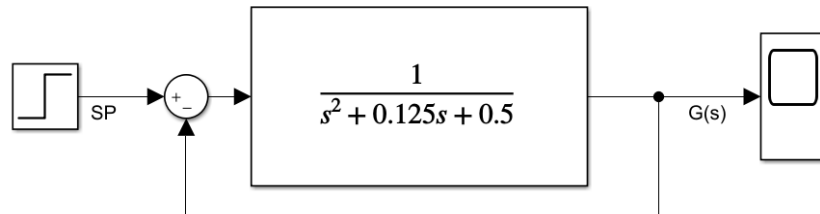


Рисунок 2.5 – Замкнутая модель в Simulink

Для данной модели смоделируем 5 типов регуляторов P, PI, I, PD и PID настроенных в autotune в среде Simulink (рисунок 2.6).

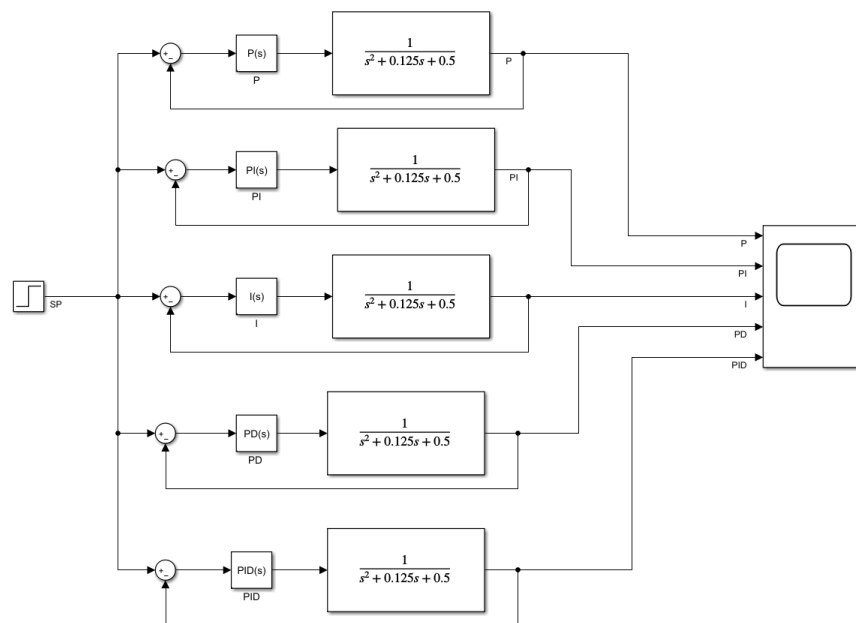


Рисунок 2.6 – Схема моделирования системы с P, PI, I, PD и PID регулятором

Далее были проанализированы переходные процессы, полученные при моделировании системы с использованием всех регуляторов (рисунок 2.7), и в таблице 2.3 указан анализ переходных характеристик.

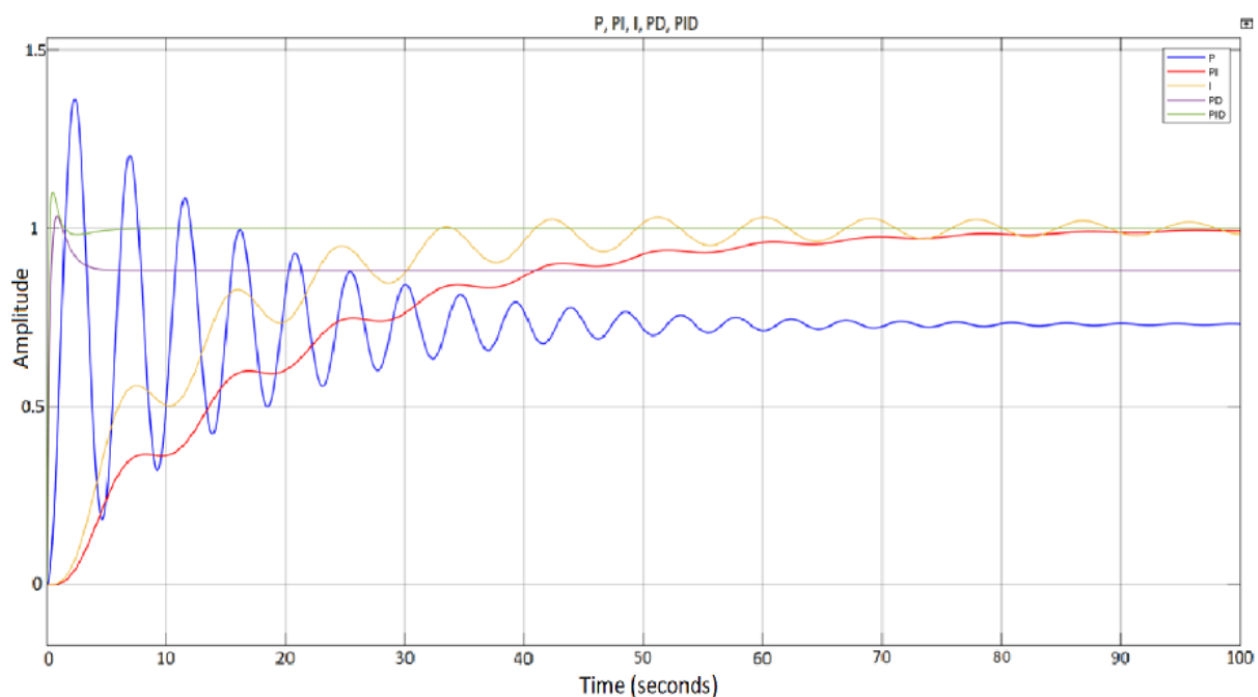


Рисунок 2.7 – Переходные процессы при моделировании в 100 секунд

Таблица 2.3 – Анализ переходных характеристик

Параметры	P	PI	I	PD	PID
T_{set}	70 с	50 с	80 с	35 с	30 с
P_{ov}	80%	10%	0%	50%	5%
M	15	6	9	0	0
μ	136%	25%	0%	70%	10%
T_{osc}	5 с	7 с	-	6 с	8 с
ω_{osc}	1.2 c^{-1}	0.9 c^{-1}	-	1.5 c^{-1}	0.78 c^{-1}
e_{ss}	0.3	0	0	0.2	0
T_p	2.57 с	2 с	4 с	1.8 с	1.5 с
T_R	0.885 с	0.75 с	1.2 с	0.6 с	0.55 с
χ	0.73	0.95	0.6	0.88	0.98

Вывод: По данным переходным процессам видно, что по количеству колебаний P-регулятор и I-регулятор не отвечают желаемым критериям качества по колебательности, PI – регулятор не отвечает желаемым требованиям по быстродействию в сравнении с PID и PD-регуляторами (рисунок 2.8). Поэтому в

дальнейшем будем рассматривать только PD и PID-регуляторы при моделировании в 6 секунд (рисунок 2.9).

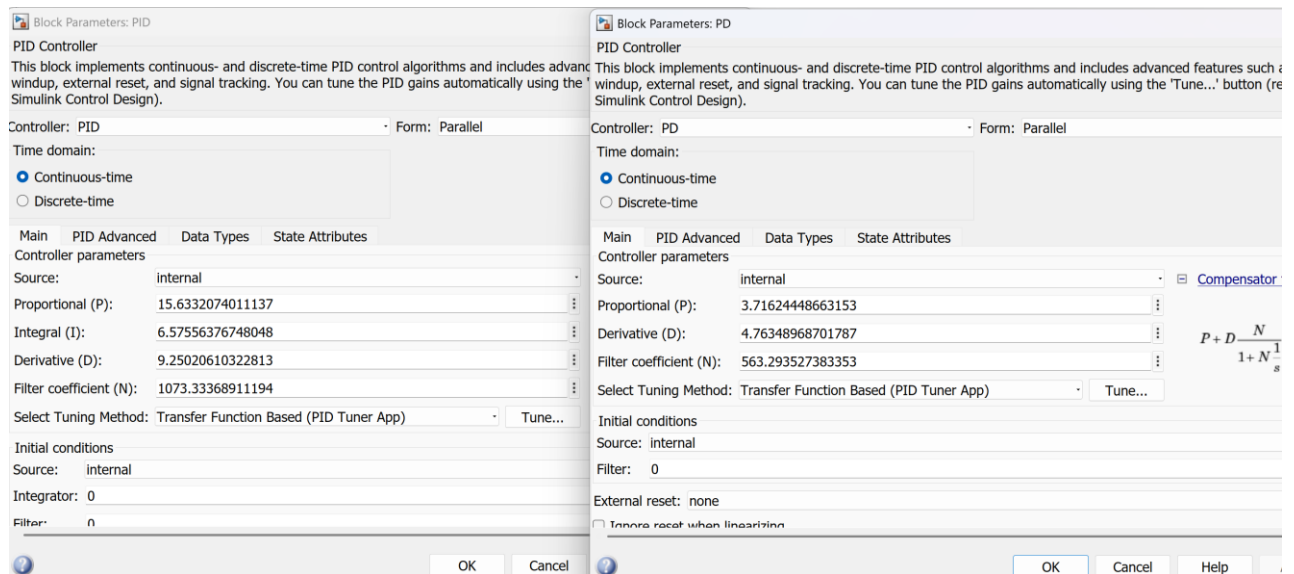


Рисунок 2.8 – Коэффициенты PID и PD регулятора

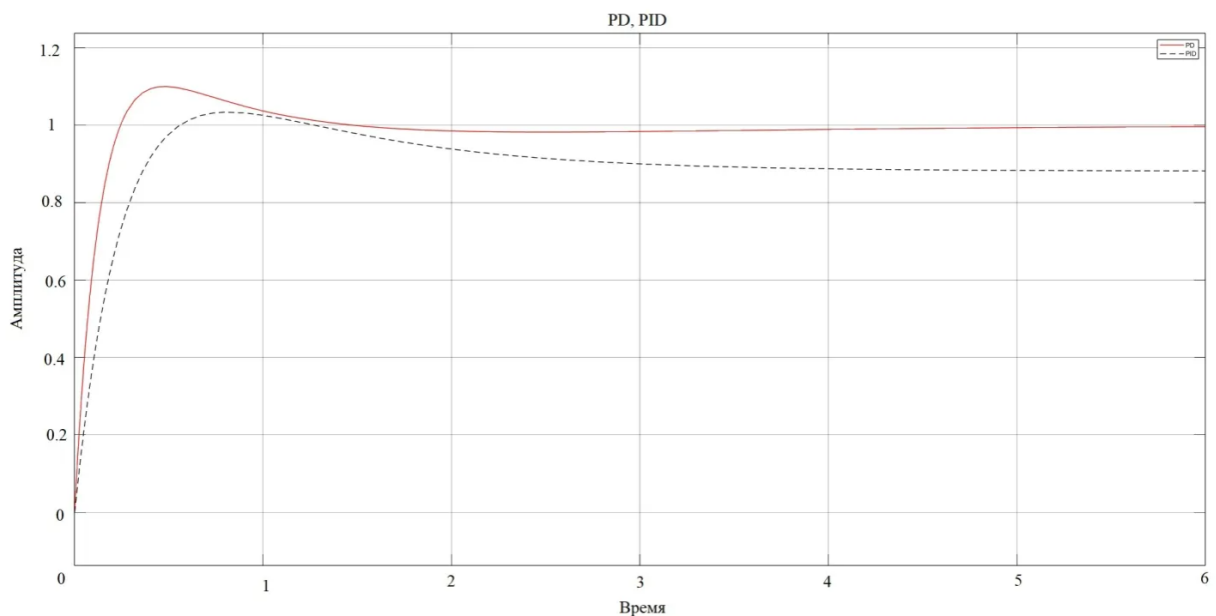


Рисунок 2.9 – Переходные процессы PID и PD-регуляторов при 6 секундах

Вывод: По данным переходным процессам видно, что PID-регулятор точнее и быстрее PD-регулятора, именно поэтому в данной работе будет рассмотрен синтез PID-регулятора.

2.5 Формирование обучающего набора данных по математической модели объекта

В рамках реализации системы с элементами интеллектуального управления была выполнена генерация обучающего набора данных на основе имитационной модели технологического объекта [11]. В качестве основы использовалась математическая модель сушильного шкафа, представленная в виде передаточной функции второго порядка. Для получения обучающей выборки система рассматривалась в разомкнутом контуре, а также написан код на Python (рисунок 2.10)

Модель была подвергнута воздействию единичного ступенчатого шага. Выходные значения системы, полученные в результате моделирования, были сохранены вместе с соответствующими управляющими воздействиями, образуя тем самым пары "вход-выход", пригодные для обучения моделей машинного обучения [11].

```
1  import numpy as np
2  import control as ctrl
3  import matplotlib.pyplot as plt
4  import pandas as pd
5
6  # Передаточная функция разомкнутой системы
7  num = [1]
8  den = [1, 0.125, 0.5]
9  plant = ctrl.tf(num, den)
10
11 # Единичный ступенчатый вход
12 t = np.linspace(0, 100, 1000) # временная ось
13 t, y = ctrl.step_response(plant, T=t)
14 u = np.ones_like(t) # ступенчатый вход
15
16 # Формирование обучающих данных
17 data = pd.DataFrame({
18     'time': t,
19     'input': u,
20     'output': y
21 })
22
23 # Сохранение в CSV
24 data.to_csv("step_response_data.csv", index=False)
25
26 # Визуализация
27 plt.plot(t, y, label='Выход системы')
28 plt.plot(t, u, '--', label='Ступенчатый вход')
29 plt.xlabel('Время (с)')
30 plt.ylabel('Амплитуда')
31 plt.legend()
32 plt.grid()
33 plt.title('Отклик системы на ступенчатое воздействие')
34 plt.show()
```

Рисунок 2.10 – Код на Python

По выполнению данного скрипта на Python была получена переходная характеристика разомкнутой системы (рисунок 2.11), а также получение обучающего набора данных, представляющего реакцию системы на стандартное входное воздействие.

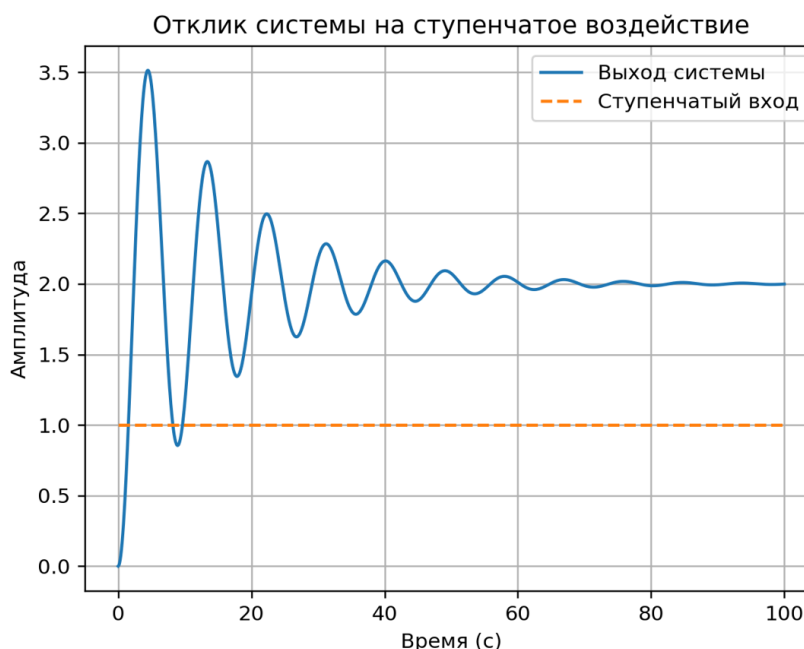


Рисунок 2.11 – Переходная характеристика из Python разомкнутой системы

Как мы можем заметить переходная характеристика, изображенная на рисунке 2.11 полностью идентична, переходной характеристике, построенной в Simulink. Переходная характеристика на Python была построена с целью определить, что модель системы правильная, а также что моделирование в Python и Simulink выполняется с использованием подходящих численных методов. Подобный результат позволяет производить дальнейшую оптимизацию и синтез регулятора с хорошей точностью.

2.6 Синтез ПИД-регулятора

Для синтеза PID-регулятора был написан скрипт, который минимизировал ошибку между откликом системы и уставкой. Для реализации данной программы использовались библиотеки `control` и `scipy.optimize`. ПИД-регулятор был параллельный, который включал фильтр по производной составляющей. Система замыкалась по отрицательной обратной связи, после чего производилось моделирование переходного процесса. Целевой функцией при оптимизации служил интеграл от модуля ошибки между входом и выходом

замкнутой системы. Переходной процесс с PID-регулятором показан на рисунке 2.12. После в консоль были выписаны все параметры ПИД-регулятора, включая фильтр. Подробнее код расписан в приложении Б.

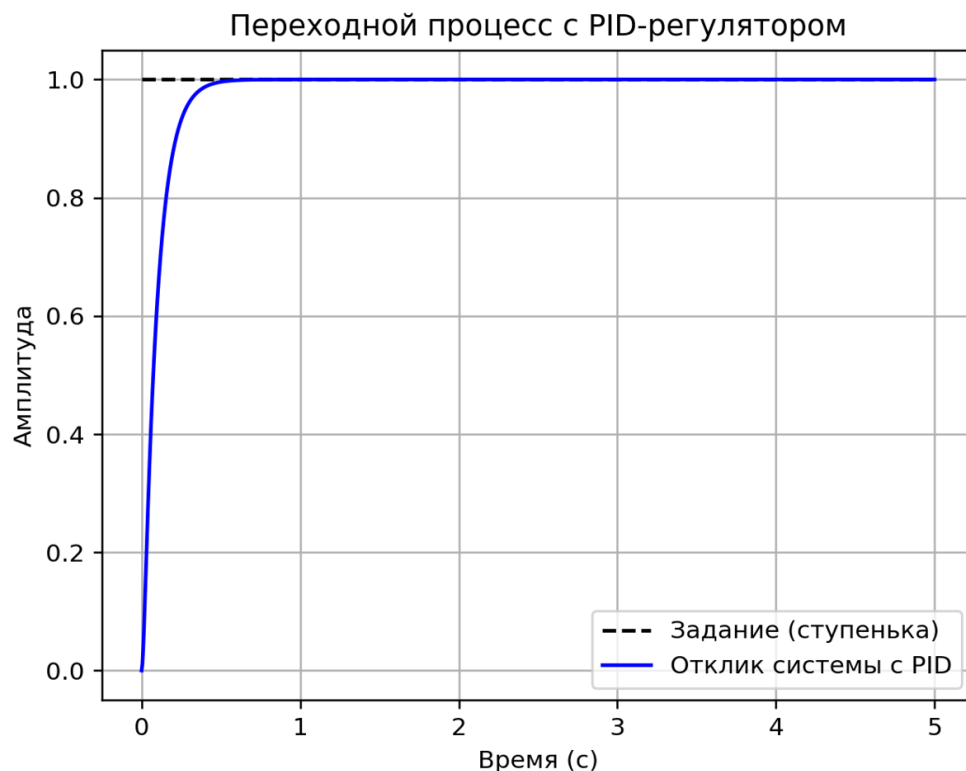


Рисунок 2.12 – Переходной процесс с ПИД-регулятором в Python

По выполнению данного скрипта были получены следующие параметры для ПИД-регулятора:

$$Kp = 1.2014$$

$$Ki = 5.0600$$

$$Kd = 10.0000$$

$$D - \text{фильтр } td = 0.0100 \text{ (задан)}$$

Полученные параметры вставим в блок ПИД-регулятора в Simulink, и проверим как выполняется моделирование в этой среде. В Simulink была собрана модель, показанная на рисунке 2.13, а в блок ПИД-регулятора были записаны параметры, показанные на рисунке 2.14. Затем были получены данные отклики системы на единичное ступенчатое воздействие (рисунок 2.15), а на рабочую уставку (рисунок 2.16)

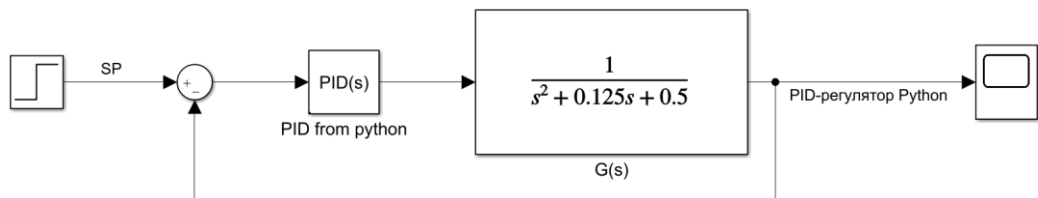


Рисунок 2.13 – Модель с ПИД-регулятором

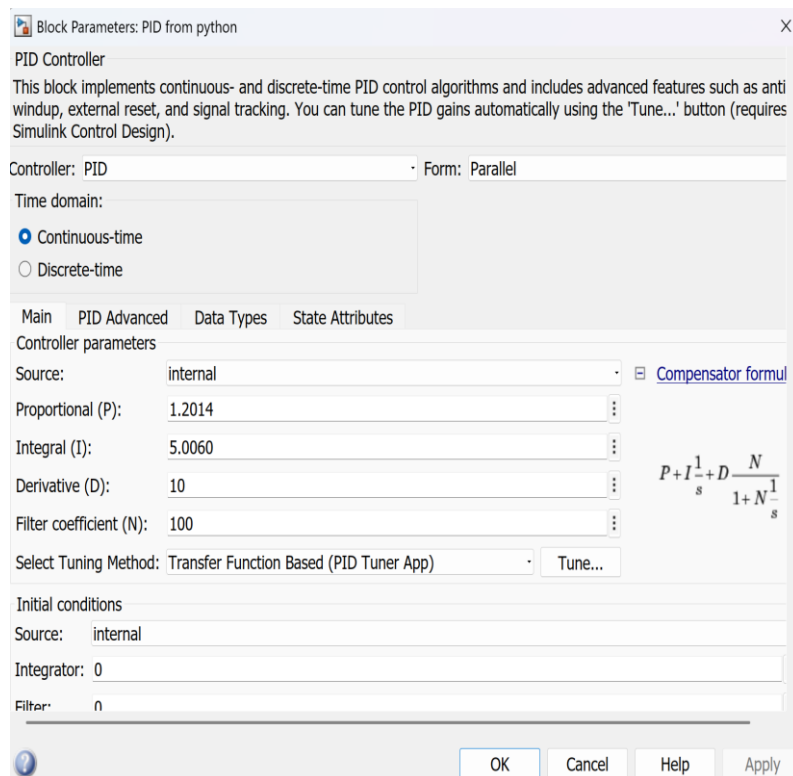


Рисунок 2.14 – Параметры ПИД-регулятора

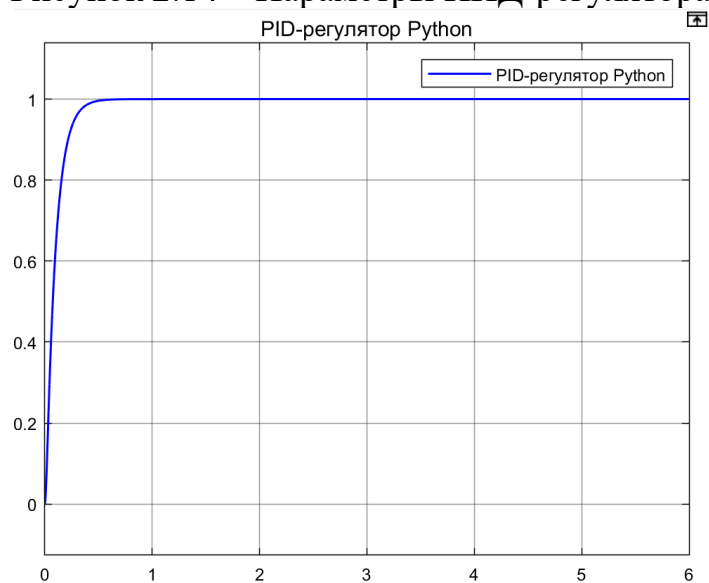


Рисунок 2.15 – Отклик системы на единичное ступенчатое воздействие

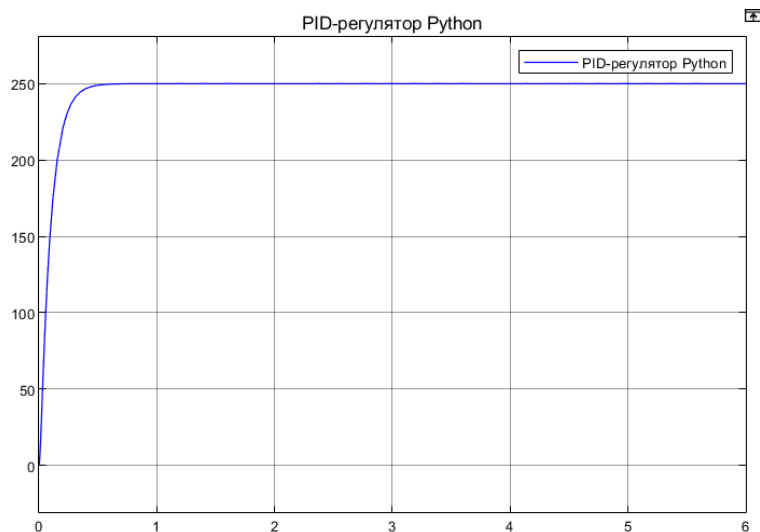


Рисунок 2.16 – Отклик системы на рабочую уставку (250).

Вывод: Во-первых, стоит отметить, что переходные процессы, изображенные на рисунках 2.15 и 2.12 идентичные, а это значит, что методы численного моделирования в Simulink и Python совпадают именно поэтому мы можем рассматривать вычисления в Python для настройки ПИД-регулятора. По данному переходному процессу видно, что система устойчива, не имеет колебаний, и имеет высокое быстродействие. Сравнивая ПИД-регулятор, настроенный в Python с auto-tune в Simulink, можно сказать, что данный ПИД-регулятор имеет лучшие оценки качества, поэтому именно этот регулятор и будет использоваться для регулирования температуры в сушильном шкафу.

3 Выбор аппаратной базы для системы управления сушильным шкафом

Для реализации системы использованы следующие компоненты: контроллер Siemens S7-1500 (CPU 1512C-1 PN) — оптимальный по соотношению производительности и функционала, поддерживает встроенный ПИД-регулятор [12], изображенный на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Контроллер 1512C-1 PN

Помимо контроллера в данном дипломном проекте будут использованы следующие аппаратные средства:

- а) Электродвигатель вентилятора Siemens 1LE1001-1DB23-Z;
- б) Температурный датчик WIKA TC82;
- в) Панель оператора KTP700
- г) Концевик на двери Honeywell LSA1A.

В проектируемой автоматизированной системе управления сушильным шкафом применяется асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, предназначенный для привода вентилятора циркуляции воздуха внутри камеры. Электродвигатель отличается высокой надёжностью, простотой конструкции и устойчивостью к перегрузкам, что делает его идеальным выбором для условий длительной работы в ограниченном объёме сушильного шкафа. Конкретная модель двигателя — Siemens 1LE1001-0DA22 (рисунок 3.2) — рассчитана на трёхфазное питание с напряжением 380 В и обладает номинальной

мощностью 1,5 кВт, что обеспечивает достаточный запас по производительности для эффективной циркуляции нагретого воздуха и равномерного распределения температуры в рабочем объеме шкафа [12]. Его характеристики приведены в таблице 3.1.

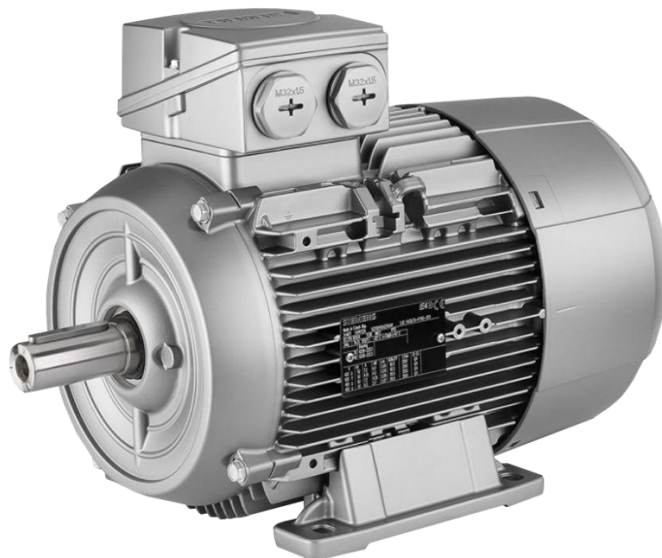


Рисунок 3.2 – Электродвигатель Siemens 1LE1001-1DB23-Z

Таблица 3.1 – Характеристики Siemens 1LE1001-1DB23-Z

Тип двигателя	GP: низковольтный двигатель
Материал корпуса	Алюминий
Мощность	От 1.4 до 400 кВт
Напряжение питания и частота:	220/380, 380/660, 500В при частоте 50, 60 Гц
Степень защиты	IP54, 55

В проекте используется температурный датчик WIKA TC82 (рисунок 3.3), адаптированный для работы в агрессивной термической среде. Конструкция датчика включает в себя термостойкий корпус и высококачественные материалы, которые позволяют длительное время эксплуатировать его без потери точности и надёжности измерений. Термопара соединена с передатчиком температуры, преобразующим сигнал в стандартный токовый диапазон 4–20 мА для передачи в контроллер. Его характеристики приведены в таблице 3.2



Рисунок 3.3 – Датчик температуры WIKA TC82

Таблица 3.2 – Характеристики WIKA TC82

Тип	Датчик температуры
Диапазон рабочих температур	Тип К: -40 ... +1200 °С
Материалы защитной трубки	Высокотемпературная керамика или карбид кремния
Особенности конструкции	Продувочный штуцер для увеличения срока службы, герметичные уплотнения

Для обеспечения удобства взаимодействия оператора с системой управления используется панель человеко-машинного интерфейса Siemens SIMATIC HMI KTP700 Basic (рисунок 3.4). Панель оснащена сенсорным экраном с диагональю 7 дюймов и разрешением 800×480 пикселей, что обеспечивает хорошую читаемость информации и комфортное управление процессом [9]. Панель позволяет задавать параметры работы шкафа, отображать текущие измеренные значения температуры, а также оперативно информировать оператора о состоянии системы и возможных аварийных ситуациях. Характеристики показаны в таблице 3.3.



Рисунок 3.4 – Панель оператора SIMATIC HMI KTP700 Basic

Таблица 3.3 – Характеристики SIMATIC HMI KTP700 Basic

Тип панели	Базовая панель с кнопочным и сенсорным управлением
Дисплей	7" TFT, 65536 цветов
Интерфейс	PROFINET
Применение	Оперативное управление и мониторинг на уровне производственных машин и установок
Функции	Регистрация аварийных сигналов, управление рецептурами, графики, переключаемые языки сообщений

Контроль положения двери шкафа реализуется посредством использования концевого выключателя Honeywell LSA1A (рисунок 3.5). Этот датчик предназначен для сигнализации открытия двери с целью обеспечения безопасности персонала и защиты оборудования. При срабатывании концевого выключателя подаётся сигнал контроллеру о нарушении условий эксплуатации, что приводит к остановке нагревательных элементов и вентилятора, предотвращая перегрев или выброс горячего воздуха в окружающее пространство. Характеристики показаны в таблице 3.4.



Рисунок 3.5 – Концевик Honeywell LSA1A

Таблица 3.4 – Характеристики Honeywell LSA1A

Тип	Тяжелый предельный выключатель с боковым поворотным механизмом
Контактная конфигурация	1NC 1NO SPDT (переключающий контакт)
Номинальный ток	10A
Материал корпуса	Коррозионностойкий цинковый сплав с фосфатным покрытием
Особенности	Уплотнения для защиты от пыли и влаги, модульная конструкция, долговечность

Комплексное использование надёжных промышленных компонентов от проверенного производителя обеспечивает высокую степень совместимости всех устройств, облегчает настройку системы, её техническое обслуживание и повышает общую надёжность автоматизированного процесса [13].

4 Программная реализация

4.1 Постановка задачи для логического управления сушильным шкафом в TiaPortal

В рамках программной реализации требуется разработать алгоритм логического управления технологическим процессом работы сушильного шкафа. Главной целью является обеспечение безопасной, эффективной и автоматизированной работы шкафа в различных режимах эксплуатации. Управление должно быть реализовано в среде TIA Portal с использованием средств программирования логических контроллеров Siemens [14].

Управляющая программа должна выполнять запуск и останов вентилятора, включение и отключение нагревательных элементов (ТЭНов), а также поддержание заданной температуры внутри шкафа в автоматическом режиме на основе показаний температурного датчика. В дополнение требуется предусмотреть защитные механизмы, такие как аварийное отключение оборудования при выходе температуры за допустимые пределы или при возникновении неисправностей системы [15].

Алгоритм управления должен предусматривать:

- а) начальную самопроверку оборудования при старте системы;
- б) переход в режим нагрева с контролем роста температуры;
- в) автоматическую стабилизацию температуры с помощью ПИД-регулятора;
- д) выдачу диагностических сообщений при обнаружении отклонений от нормальной работы.

Для построения логики работы будет использоваться структурированное программирование с применением функциональных блоков (FB), организационных блоков (OB) и вспомогательных функций (FC) [16]. Программа должна быть организована таким образом, чтобы облегчить её последующую отладку, сопровождение и возможную модернизацию.

Особое внимание в постановке задачи уделяется необходимости управления вентилятором в зависимости от стадии технологического процесса и активного контроля состояния исполнительных устройств для повышения общей надёжности системы.

Составим блок-схему алгоритма работы сушильного шкафа, в котором учтем начальную самопроверку оборудования, а также автоматическую стабилизацию температуры с помощью ПИД-регулятора (раздел 3, рисунок 3.1). Блок схема указана как рисунок 4.1.

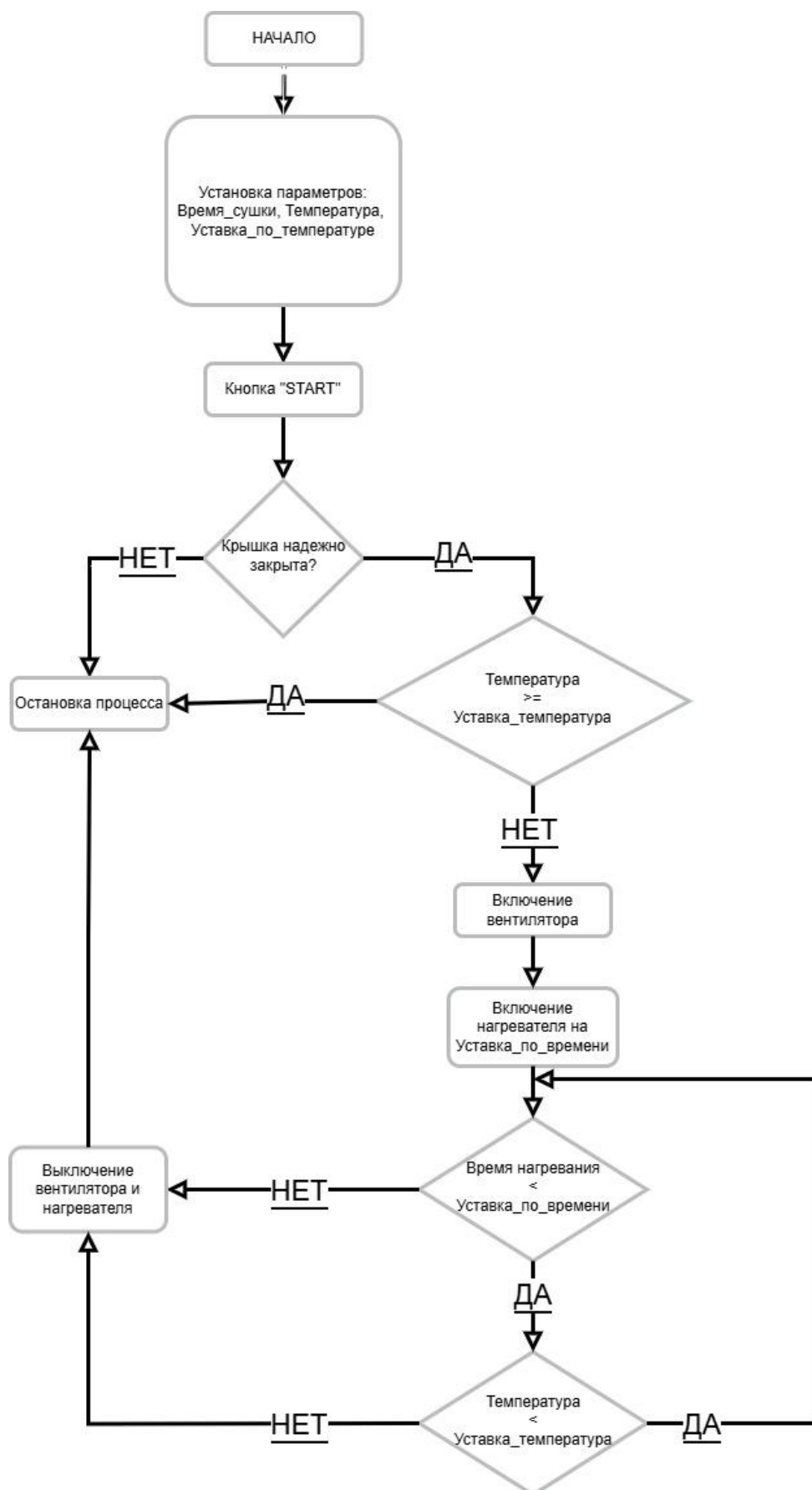


Рисунок 4.1 – Блок схема алгоритма работы сушильного шкафа

4.2 Подготовка входных и выходных сигналов

При разработке системы автоматизации для сушильного шкафа особое внимание уделено обработке и настройке входных и выходных сигналов. Надёжная и эффективная работа всего комплекса обеспечивается правильной организацией обмена данными между датчиками, исполнительными устройствами и контроллером. Каждый сигнал проходит процедуру нормализации к характеристикам модулей ввода-вывода и соответствует стандартам промышленной эксплуатации [14]. Для удобства классификации основные сигналы представлены в виде таблицы 4.1, которая включает информацию о источниках и потребителях сигналов и их назначении.

Таблица 4.1 – Входные и выходные сигналы

№	Наименование сигнала	Тип сигнала	Назначение
1	Датчик температуры	Входной аналоговый	Измерение температуры в камере
2	Кнопка пуска/остановки	Входной дискретный	Пуск или остановка процесса
3	Датчик влажности	Входной аналоговый	Измерение влажности в камере
4	Датчик оборотов вентилятора	Входной аналоговый	Изменение скорости вращения вентилятора
5	Концевой выключатель двери	Входной дискретный	Контроль состояния двери шкафа
6	Лампочка окончания сушки	Выходной дискретный	Завершение процесса сушки
7	Управление вентилятором	Выходной дискретный	Пуск и остановка вентилятора
8	Управление нагревательным элементом (ТЭН)	Выходной аналоговый	Управление ТЭНом с ПИД-регулятора

Более подробная информация о подключенных входных и выходных сигналах предоставлена на рисунке 4.2. На нем наглядно отображены все сигналы, связанные с контроллером, а также теги, интегрированные во внутреннюю базу данных, включая таймеры и области памяти для маркеров.

PLC tags										
	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Write...	Visibl...	Supervis...	Comment
1	Start	Default tag table	Bool	%I0.0	☐	☒	☒	☒		запуск процесса сушил...
2	Stop	Default tag table	Bool	%I0.1	☐	☒	☒	☒		остановка процесса
3	Temp_Process	Default tag table	Word	%IW2	☐	☒	☒	☒		Температура в камере
4	Fan_Speed	Default tag table	Word	%IW4	☐	☒	☒	☒		датчик оборотов венти...
5	Air_Humidity	Default tag table	Word	%IW6	☐	☒	☒	☒		Влажность в камере
6	Heater_Control	Default tag table	Word	%QW2	☐	☒	☒	☒		Выход PID-регулятора
7	Fan_Status	Default tag table	Bool	%I0.2	☐	☒	☒	☒		состояние вентилятора
8	Heater_Status	Default tag table	Word	%IW8	☐	☒	☒	☒		Состояние нагревателя
9	Door_Open	Default tag table	Bool	%I0.3	☐	☒	☒	☒		Концевик двери (авари...
10	Process_Timer	Default tag table	Timer	%T40	☐	☒	☒	☒		Время сушки
11	Drying_Done	Default tag table	Bool	%Q0.0	☐	☒	☒	☒		Завершение процесса
12	Fan_Enable	Default tag table	Bool	%Q0.1	☐	☒	☒	☒		Управление вентилято...
13	Overheat_Alarm	Default tag table	Bool	%Q0.4	☐	☒	☒	☒		Авария при перегреве
14	Process	Default tag table	Bool	%M0.0	☐	☒	☒	☒		Проверка перед включ...
15	input_temp	Default tag table	Int	%IW126	☐	☒	☒	☒		
16	output_heat	Default tag table	Int	%QW128	☐	☒	☒	☒		
17	<Add new>				☐	☒	☒	☒		

Рисунок 4.2 – Список тэгов

4.3 Разработка программы в TiaPortal на языке LAD

Для создания программы автоматизированного управления сушильным шкафом была разработана логика на языке LAD (Ladder Diagram) в среде TIA Portal [16]. Программирование осуществлялось с использованием организационных блоков OB1 и OB30, которые являются ключевыми элементами структуры проекта, отвечающими за выполнение программы в контроллере. OB1 представляет собой основной блок циклического выполнения, содержащий центральную управляющую логику системы (рисунок 4.1) [15].

LAD был выбран за его наглядность, схожесть с классическими электрическими схемами и удобство при отладке промышленных процессов. Программная структура включает модули, обеспечивающие безопасное функционирование оборудования, обработку аварийных ситуаций и взаимодействие с операторской панелью [16]. Проектирование велось с учётом требований промышленной автоматизации, таких как надёжность, удобство масштабирования и возможность быстрого диагностирования состояния системы.

Проектирование проекта началось с создания контроллера 1512C-1 PN (рисунок 4.3), а после создание HMI KTP700 Basic, и объединения их на сетевом уровне по протоколу Ethernet (рисунок 4.4).

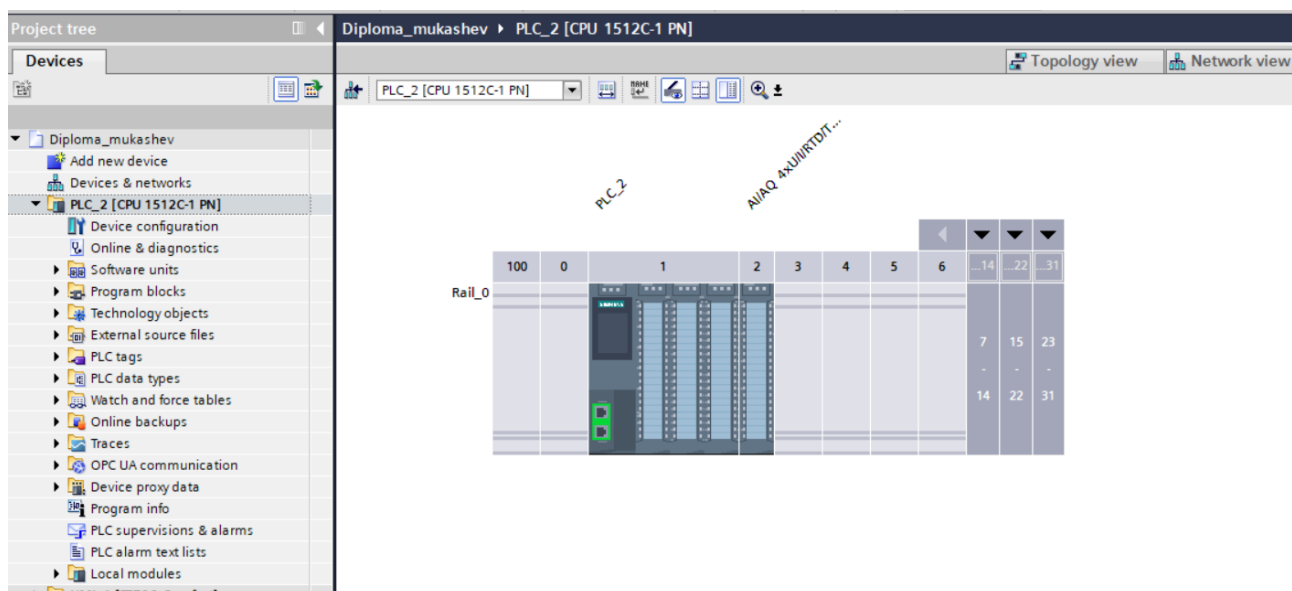


Рисунок 4.3 – Создание контроллера в проекте

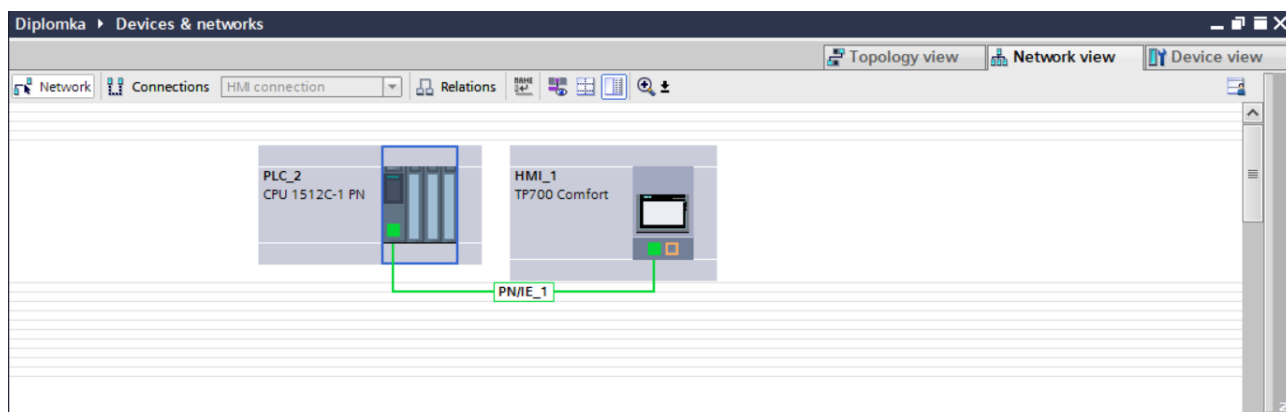


Рисунок 4.4 – Объединение контроллера с HMI на сетевом уровне

После их сопряжения необходимо создать тэги, которые привязываются к входным и выходным сигналам контроллера. Количество созданных тэгов было детально отображено в списке тэгов. Именование тэгов было задано специально по принятому в общих кругах программистов Асупт стилю, например: Fan_Speed, Fan_Status. Данный стиль максимально кратко отражает для чего данный тэг используется и в таком случае другой программист легко сможет приступить к отладке данной программы, если будут сбои.

Далее необходимо создать логику для контроллера согласно техническому заданию. Основная логика написана на языке OB1. В среде программирования TIA Portal, блоки организации (Organization Blocks, OB) представляют собой ключевые компоненты архитектуры программного обеспечения, обеспечивающие структурирование выполнения пользовательского кода на контроллере. Один из наиболее важных блоков — OB1, который считается основным циклическим блоком [12]. Именно он выполняется контроллером в цикле и используется для реализации основной логики управления

технологическим процессом. Все программные фрагменты, такие как функциональные блоки (FB), функции (FC), а также обращения к входам и выходам, инициируются через OB1, что делает его центральным элементом в реализации пошагового или непрерывного управления [16]. Далее на рисунках 4.5 и 4.6 показана программа логического управления сушильным шкафом.

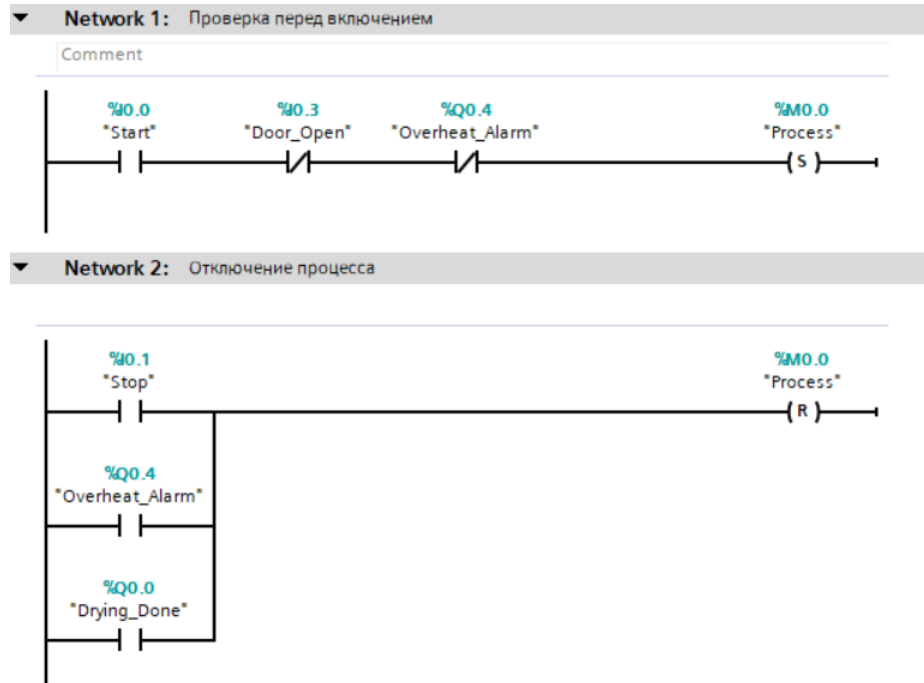


Рисунок 4.5 – Включение и отключение процесса

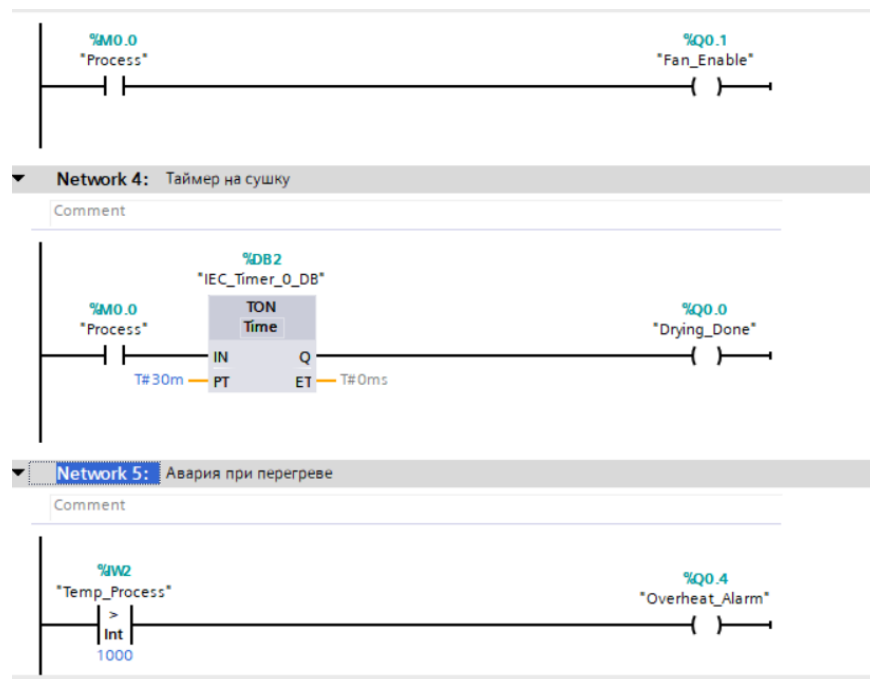


Рисунок 4.6 – Детали процесса сушки

ПИД-регулятор разработан в блоке OB30 (рисунок 4.7). В отличие от OB1, блок OB30 используется для обработки событий, связанных с прерываниями по времени. Он активируется не постоянно, а по заданному таймеру, и может быть применён, например, для выполнения вспомогательных или высокоприоритетных задач, которые должны запускаться независимо от основного цикла. OB30 позволяет задавать периодичность исполнения в миллисекундах и, таким образом, обеспечивать стабильное выполнение задач с чёткой временной привязкой [10]. Это особенно важно, когда необходимо измерять параметры с высокой точностью или гарантировать выполнение критических операций вне зависимости от длительности основного цикла программы [14]. Использование OB30 предоставляет разработчику дополнительный уровень гибкости и надёжности при управлении сложными технологическими объектами, где важна не только логическая, но и временная согласованность процессов.

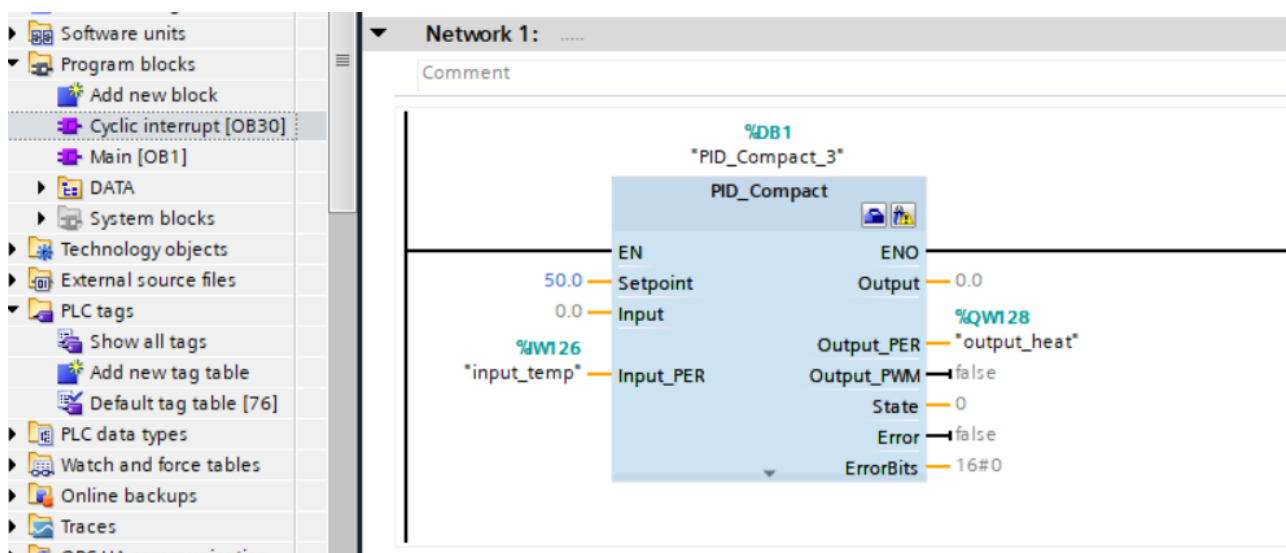


Рисунок 4.7 – PID-регулятор в блоке OB30

При создании ПИД-регулятора TiaPortal запросит создать блок данных для ПИД-регулятора. Блок данных (DB) необходим для хранения всех параметров и внутренних переменных, которые требуются для корректной работы алгоритма регулирования. Этот блок играет роль памяти для регулятора, в нём сохраняются уставки, значения коэффициентов (P, I, D), текущее состояние регулятора, а также данные о прошлых значениях ошибки и выходного сигнала. Благодаря использованию DB-блока обеспечивается устойчивость работы ПИД-регулятора даже при временном отключении питания или перезапуске контроллера — параметры сохраняются и могут быть восстановлены без необходимости повторной настройки (рисунок 4.8).

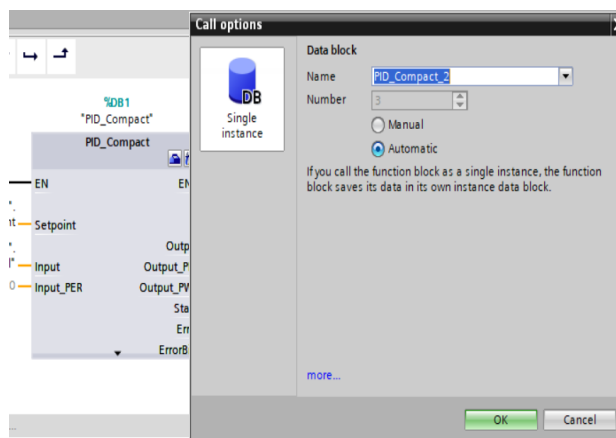


Рисунок 4.8 – Блок данных для PID-регулятора

Среди всех возможных способов реализации ПИД-регулятора был выбран компонент PID_Compact. Компонент PID_Compact, встроенный в библиотеку TIA Portal, представляет собой упрощённую, но в то же время функционально насыщенную реализацию ПИД-регулятора, подходящую для большинства промышленных применений [14]. Он автоматически обрабатывает цифровые сигналы, проводит фильтрацию, интегрирование и дифференцирование ошибок регулирования. PID_Compact включает встроенные механизмы настройки, в том числе режим автоматического подбора коэффициентов (Auto-tuning), что упрощает пусконаладку. Кроме того, компонент предоставляет функции ограничения выходного сигнала и возможность работы в ручном режиме [15]. Его интеграция в проект требует лишь задания соответствующих параметров и связи с физическими входами/выходами системы. На рисунке 4.9 представлено окно настройки параметров ПИД-регулятора.

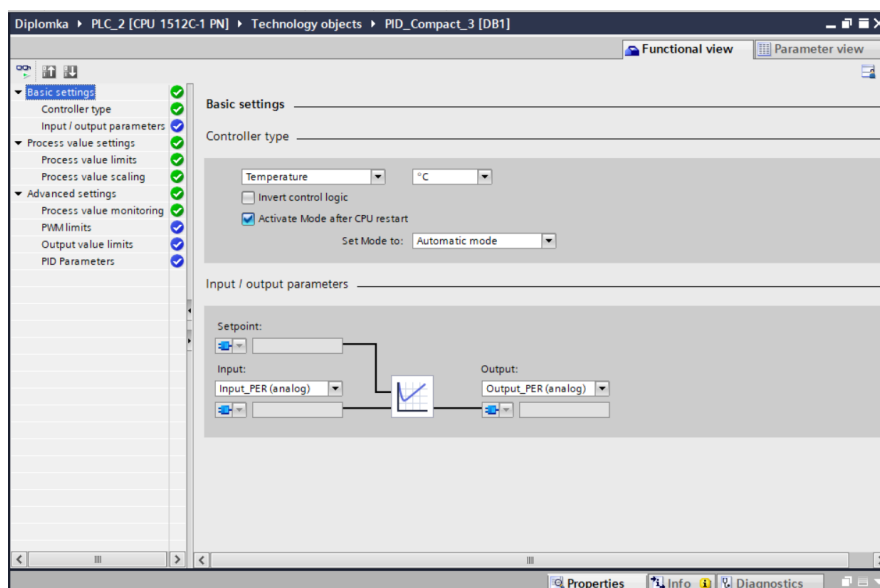


Рисунок 4.9 – Настройка параметров регулятора

4.4 Разработка SCADA

Разработка SCADA-системы в рамках дипломного проекта стала логичным этапом построения полной автоматизированной системы управления сушильным шкафом. Основной целью этого этапа было создание наглядного и удобного интерфейса, позволяющего оператору в реальном времени наблюдать за технологическим процессом [13]. В процессе разработки особое внимание было уделено визуализации текущих параметров: температуры внутри шкафа, состояния нагревательных элементов, работы вентилятора и положения двери, что указано на рисунке 4.10. Для каждой из этих составляющих были реализованы соответствующие графические элементы: индикаторы, цифровые поля и сигнальные лампы. Помимо отображения значений, интерфейс предусматривает возможность задания уставок температуры, показанных на рисунке 4.11. Взаимодействие SCADA с контроллером осуществляется с помощью встроенных тэгов, описанных выше. Также при получении ошибок, оно высвечивается на экране сигнализации, показанный на рисунке 4.12.

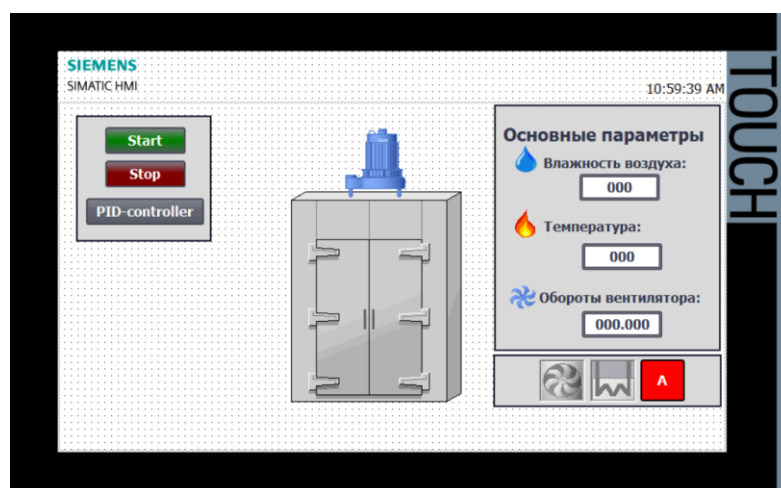


Рисунок 4.10 – Стартовый экран

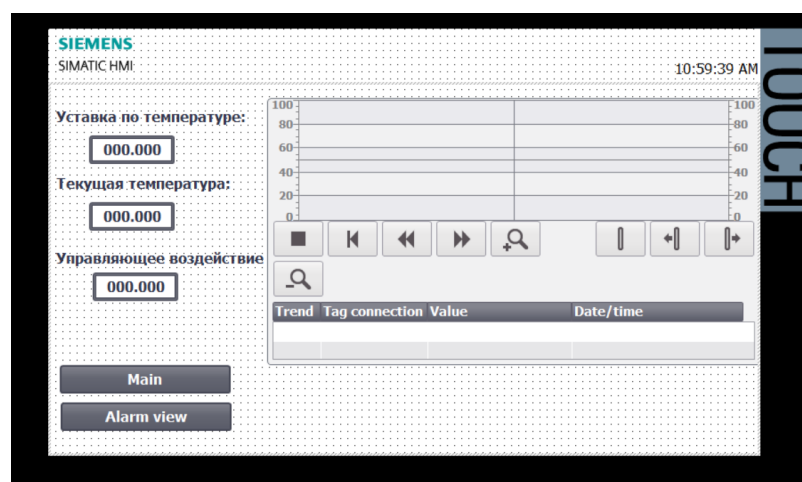


Рисунок 4.11 – Окно ПИД-регулятора

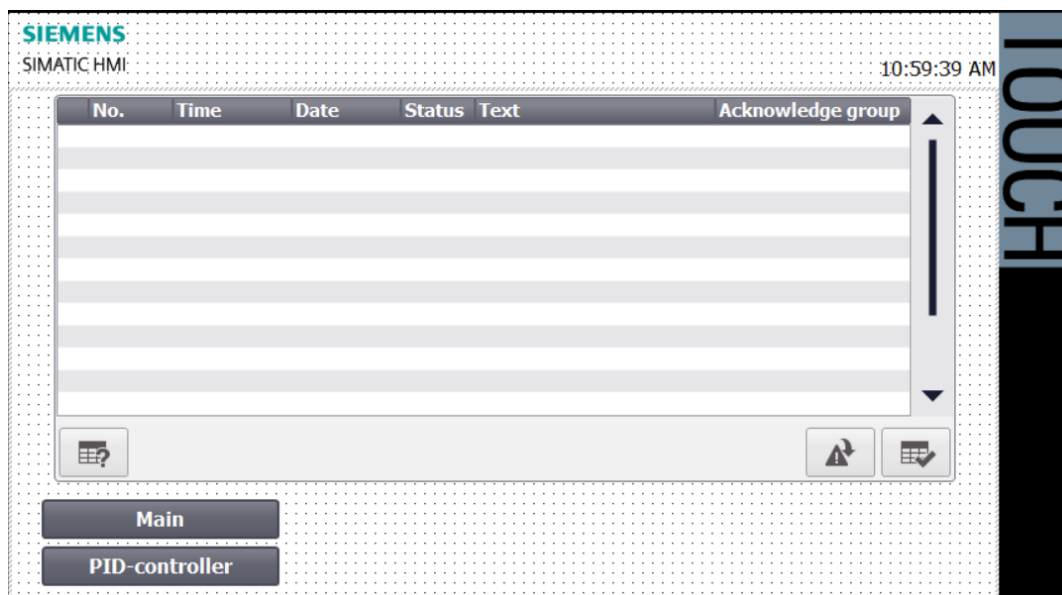


Рисунок 4.12 – Экран сигнализации

Вывод: Реализация SCADA-системы не только улучшила удобство эксплуатации сушильного шкафа, но и предоставила полноценный инструмент для мониторинга и диагностики, что особенно важно при длительной работе оборудования. Кроме того, наличие архивации параметров позволяет отслеживать динамику изменений, выявлять нестабильности и принимать обоснованные решения по оптимизации режима сушки. В итоге SCADA стала не просто средством отображения, а частью интеллектуального подхода к управлению технологическим процессом [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения дипломного проекта была разработана интегрированная система автоматизированного управления сушильным шкафом, обеспечивающая стабильное и эффективное поддержание температурного режима в условиях высокотемпературной обработки материалов. Проведён комплексный анализ объекта автоматизации с последующим выбором технических средств, включая промышленный контроллер Siemens, панель оператора HMI, датчики температуры и исполнительные механизмы. Разработка алгоритма управления велась с использованием языка релейной логики LAD в среде TIA Portal, что позволило реализовать как основную, так и вспомогательную логику управления. На основе анализа физики процесса была обоснована математическая модель второго порядка, отражающая инерционные и динамические свойства системы, включающей вентилятор, нагревательный элемент, теплообменные свойства сушильной камеры и измерительное устройство.

Для повышения надёжности и интеллектуализации системы предложена интеграция методов машинного обучения. Система управления спроектирована с учётом требований безопасности, надёжности и технологической гибкости. Реализация проекта демонстрирует практическое применение современных средств автоматизации, моделирования и программирования, а также подтверждает актуальность использования цифровых технологий в промышленной автоматике. Полученные результаты могут быть внедрены в аналогичные производственные процессы, где требуется термическая обработка, что подтверждает практическую значимость проведённой работы и её вклад в развитие интеллектуальных систем управления.

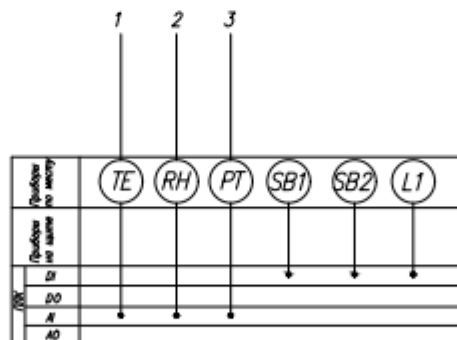
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Иванов А.В. Сушильные шкафы: принципы работы и применение / А.В. Иванов. – Москва: Технопресс, 2015. – 128 с.
- 2 Смирнов О.П. Технологии управления сушильными процессами / О.П. Смирнов. – Москва: Энергоиздат, 2019. – 144 с.
- 3 Николаев К.П. Сушильные шкафы: конструкция и эксплуатация / К.П. Николаев. – Москва: Машиностроение, 2016. – 192 с.
- 4 Орлов С.В. Сушильные шкафы: инновационные технологии / С.В. Орлов. – Москва: Энергоиздат, 2021. – 160 с.
- 5 Васильев Е.С. ПИД-регуляторы: теория и практика настройки / Е.С. Васильев. – Санкт-Петербург: Профессия, 2015. – 176 с.
- 6 Лебедев Н.В. Математические модели в автоматизации процессов / Н.В. Лебедев. – Казань: Казанский университет, 2016. – 224 с.
- 7 Михайлов Е.П. Математические модели в автоматизации: учебное пособие / Е.П. Михайлов. – Казань: Казанский университет, 2018. – 240 с.
- 8 Морозов Д.А. Математическое моделирование в инженерных системах / Д.А. Морозов. – Томск: Томский университет, 2017. – 264 с.
- 9 Кузнецов А.А. SCADA-системы: основы проектирования и применения / А.А. Кузнецов. – Новосибирск: Сибтех, 2017. – 198 с.
- 10 Петров В.Н. Настройка ПИД-регуляторов в промышленных системах / В.Н. Петров. – Санкт-Петербург: Наука и техника, 2018. – 256 с.
- 11 Маккинни У. Python для анализа данных / У. Маккинни. – Санкт-Петербург: О'Рейли, 2025. – 432 с.
- 12 Белов Н.И. LAD-программирование: основы и примеры / Н.И. Белов. – Москва: Технопресс, 2021. – 304 с.
- 13 Федоров В.И. SCADA-системы: проектирование и внедрение / В.И. Федоров. – Нижний Новгород: Инфра-Инженерия, 2018. – 312 с.
- 14 Сидоров И.И. Программирование на языке LAD в TIA Portal: учебное пособие / И.И. Сидоров. – Екатеринбург: Уральский издательский дом, 2020. – 312 с.
- 15 Григорьев А.В. LAD-программирование: примеры и задачи / А.В. Григорьев. – Москва: Технопресс, 2021. – 288 с.
- 16 Захаров И.Н. LAD-программирование в TIA Portal: практическое руководство / И.Н. Захаров. – Москва: Технопресс, 2020. – 320 с.
- 17 Тихонов В.А. SCADA-системы: основы разработки / В.А. Тихонов. – Новосибирск: Сибтех, 2017. – 256 с.

Приложение А

Развернутая схема автоматизации

Инд. N подл.	Подпись и дата	Взам инд. N
--------------	----------------	-------------

[illegible]

Приложение Б

Код для реализации ПИД-регулятора

```

1  import numpy as np
2  import pandas as pd
3  from scipy.optimize import minimize
4  import control as ctrl
5  import matplotlib.pyplot as plt
6
7  # Загрузка обучающих данных
8  data = pd.read_csv("step_response_data.csv")
9  t = data['time'].values
10 u = data['input'].values
11 y_target = data['output'].values # или можешь поставить просто u, если цель – 1
12 # Исходная передаточная функция объекта
13 num = [1]
14 den = [1, 0.125, 0.5]
15 plant = ctrl.tf(num, den)
16 # Зафиксированная постоянная времени фильтра производной
17 tau_d = 0.01
18
19 # Функция оценки производительности PID-регулятора
20 def evaluate_pid(params):
21     Kp, Ki, Kd = params
22
23     # Параллельная структура PID:  $G_c(s) = K_p + K_i/s + K_d \cdot s / (\tau_d \cdot s + 1)$ 
24     P = ctrl.tf([Kp], [1])
25     I = ctrl.tf([Ki], [1, 0])
26     D = ctrl.tf([Kd, 0], [tau_d, 1])
27     pid = P + I + D
28
29     # Замкнутая система: feedback(PID * Plant)
30     closed_loop = ctrl.feedback(pid * plant, 1)
31
32     # Отклик на ступеньку
33     _, y = ctrl.step_response(closed_loop, T=t)
34
35     # Интеграл абсолютной ошибки (IAE)
36     error = np.abs(u - y)
37     return np.trapz(error, t)
38
39 # Начальное приближение
40 initial_pid = [1.0, 0.1, 0.01]
41 # Ограничения
42 bounds = [(0, 50), (0, 50), (0, 10)]
43 # Оптимизация
44 result = minimize(evaluate_pid, initial_pid, bounds=bounds, method='L-BFGS-B')
45 # Оптимальные коэффициенты
46 Kp_opt, Ki_opt, Kd_opt = result.x
47 print(f"Оптимальный PID-регулятор:")
48 print(f"  Kp = {Kp_opt:.4f}")
49 print(f"  Ki = {Ki_opt:.4f}")
50 print(f"  Kd = {Kd_opt:.4f}")
51 print(f"  D-фильтр  $\tau_d$  = {tau_d:.4f} (задан)")
52 # Построим отклик системы с оптимальным PID
53 P = ctrl.tf([Kp_opt], [1])
54 I = ctrl.tf([Ki_opt], [1, 0])
55 D = ctrl.tf([Kd_opt, 0], [tau_d, 1])
56 pid = P + I + D
57 closed_loop = ctrl.feedback(pid * plant, 1)
58 _, y_opt = ctrl.step_response(closed_loop, T=t)
59 # График
60 plt.plot(t, u, 'k--', label='Задание (ступенька)')
61 plt.plot(t, y_opt, 'b', label='Отклик системы с PID')
62 plt.xlabel('Время (с)')
63 plt.ylabel('Амплитуда')
64 plt.title('Переходной процесс с PID-регулятором')
65 plt.grid()
66 plt.legend()
67 plt.show()

```

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.САТПАЕВА»

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект студента

Мукашева Ахмета Сериккулы

6B07103 – Автоматизация и роботизация

На тему: Разработка интегрированной системы управления технологическим процессом сушильной камеры с использованием PID-регуляторов и методов машинного обучения

Выполнено:

а) презентация на 12 слайдах

б) пояснительная записка на страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Актуальность вклада в разработку комплексной системы управления сушильной камерой обусловлена, по сути, необходимостью повышения энергоэффективности, надежности и интеллектуализации промышленных объектов. В данной работе применены ПИД-регуляторы с элементами машинного обучения, что отражает весьма современный подход к автоматизации тепловых процессов.

Дипломный проект имеет теоретическую, расчетную и программную части, что в совокупности свидетельствует о высоком уровне подготовки автора. В теоретической части подробно описывается объект управления, его конструктивные и технологические особенности. В следующем разделе создается передаточная функция второго порядка, проводится анализ устойчивости и синтез различных типов ПИД-регуляторов. Моделирование, выполненное в средах MATLAB/Simulink и Python, имеет решающее значение, поскольку позволило сравнить различные методы настройки регуляторов и выбрать оптимальный по показателям качества. Также была приведена структурная схема автоматизации, показывающая всю систему управления: взаимосвязь между датчиками, контроллером, исполнительными механизмами и панелью оператора.

В третьем и четвертом разделах выполняется реализация системы управления в ПIA Portal на Siemens S7-1500, разработка логической схемы на языке LAD, организация ПИД-регулирования в блоке OB30, а также реализация SCADA-системы с визуализацией параметров и сигнализацией. Данная работа выполнена в соответствии с ГОСТ на проектирование и требованиями к дипломным проектам по инжинирингу.

Оценка работы

Работа демонстрирует высокую подготовку выпускника в области автоматизации и заслуживает оценки «90» (отлично), а студенту Мукашеву Ахмету Сериккулы присвоения академической степени бакалавра по специальности 6B07103 – Автоматизация и роботизация.

Рецензент

ассоц. профессор, доцент кафедры Автоматизация и управление,

АУЭС им. Г.

Даукеева



Оракбаев Е. Ж.

« » июня 202 г.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Мукашев Ахмет Сериккулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Разработка интегрированной системы управления технологическим процессом сушильной камеры с использованием PID-регуляторов и методов машинного обучения

Научный руководитель: Елена Кулакова

Коэффициент Подобия 1: 4.7

Коэффициент Подобия 2: 1.5

Микропробелы: 4

Знаки из других алфавитов: 0

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- ☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- ☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- ☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- ☐ Обоснование:

Дата



Заведующий кафедрой

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагнаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Мукашев Ахмет Серикулы

Тақырыбы: Разработка интегрированной системы управления технологическим процессом сушильной камеры с использованием PID-регуляторов и методов машинного обучения

Жетекшісі: Елена Кулакова

1-ұқсастық коэффициенті (30): 4.7

2-ұқсастық коэффициенті (5): 1.5

Дәйексөз (35): 0.2

Әріптерді ауыстыру: 0

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 4

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

Күні



Кафедра меңгерушісі

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Мукашев Ахмет Сериккулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Разработка интегрированной системы управления технологическим процессом сушильной камеры с использованием PID-регуляторов и методов машинного обучения

Научный руководитель: Елена Кулакова

Коэффициент Подобия 1: 4.7

Коэффициент Подобия 2: 1.5

Микропроблемы: 4

Знаки из других алфавитов: 0

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

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

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

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

☐ Обоснование:

Дата

13.06.25



проверяющий эксперт

Кулакова Е.А.

**ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

Дипломная работа

Мукашев Ахмет Серикулы

6B07103 – «Автоматизация и роботизация»

Тема: Разработка интегрированной системы управления технологическим процессом сушильной камеры с использованием PID-регуляторов и методов машинного обучения

Целью данной дипломной работы является разработка автоматизированной системы управления (АСУ) технологическим процессом сушки материалов в промышленной сушильной камере. В рамках выполнения проекта были изучены особенности конструкции сушильного оборудования, проанализированы требования к температурному режиму и равномерности воздушных потоков, а также рассмотрены современные подходы к построению интеллектуальных систем управления.

Студентом проведён анализ динамических характеристик объекта управления, построена математическая модель на основе передаточной функции второго порядка. Обоснован выбор архитектуры системы управления, аппаратных компонентов и программного обеспечения. Разработана функциональная схема, включающая работу температурных датчиков, ПИД-регулятора, вентилятора, нагревательных элементов и средств индикации. В качестве среды проектирования использованы TIA Portal и SIMATIC HMI, что позволило реализовать модель системы с полной визуализацией всех этапов технологического процесса.

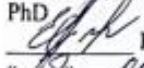
Особое внимание в проекте уделено вопросам адаптивности системы управления. Для повышения точности и гибкости регулирования использованы методы машинного обучения, позволяющие формировать обучающие выборки на основе имитационного моделирования. Также реализованы режимы автоматического и ручного управления, предусмотрены алгоритмы аварийной остановки и диагностики неисправностей.

В процессе выполнения дипломного проекта автор продемонстрировал высокий уровень знаний и практических навыков в области промышленной автоматизации, моделирования и программирования ПЛК. Выбор технических решений является обоснованным, программная реализация выполнена на высоком уровне. Все поставленные задачи выполнены в полном объёме. Разработанная система может быть рекомендована к внедрению в производственных условиях, а также использоваться в учебных целях.

Дипломная работа Мукашева Ахмета Серикулы демонстрирует высокий уровень подготовки в области систем автоматического управления и заслуживает присвоение академической степени бакалавра по образовательной программе 6B07103 – Автоматизация и роботизация.

Научный руководитель

PhD

 Кулакова Е.А.

« 18 » 06 2025 г.