

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

Пичугин Александр Константинович

Разработка системы автоматического управления температурой печи с учётом внешних  
возмущений

**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 системы автоматического управления температурой печи с учётом  
внешних возмущений»

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Выполнил

Пичугин А. К.

Рецензент

доктор Р.Н. Д.,  
проф. каф. «АиУ»  
Абжанова А.К.  
(подпись)

«18» 06 2025 г.

Научный руководитель

канд. техн. наук

Ширяева О.И.

(подпись)

«17» 06 2025 г.

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



**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломного проекта**

Обучающемуся Пичугину А. К.

Тема: «Разработка системы автоматического управления температурой печи с учётом внешних возмущений».

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

Срок сдачи законченной работы: «19» 06 2025 г.

Исходные данные к проекту: математическое описание динамики системы в виде передаточных функций звеньев

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 управления температурой печи.

Рекомендуемая основная литература:

- 1 Федоров Ю.Н. Справочник инженера по АСУТП: проектирование и разработка: учебно-практическое пособие / Ю.Н. Федоров. – Москва: Инфра-Инженерия, 2008. – 928 с.
- 2 Лекен Д. Practical PID Handbook: учебное пособие по настройке ПИД-регуляторов / Д. Лекен. – Ле-Ули: EDP Sciences, 2022. – 418 с.

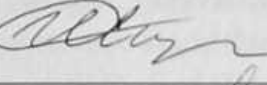
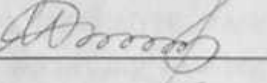
# ГРАФИК

## подготовки дипломного проекта

| Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов                                  | Сроки представления научному руководителю | Примечание |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|
| Технологический раздел<br>Описание процессов электрической печи                           | 25.03.2025 г.                             |            |
| Технологический раздел<br>Разработка структурной схемы системы автоматического управления | 06.04.2025 г.                             |            |
| Технологический раздел<br>Разработка функциональной схемы автоматизации системы           | 19.04.2025 г.                             |            |
| Расчетный раздел<br>Анализ и синтез систем автоматического регулирования                  | 07.05.2025 г.                             |            |
| Расчетный раздел<br>Разработка программы управления                                       | 29.05.2025 г.                             |            |

### Подписи

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

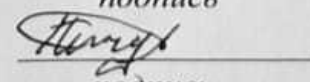
| Наименования разделов  | Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание) | Дата подписания | Подпись                                                                               |
|------------------------|--------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Технологический раздел | О. И. Ширяева<br>канд. техн. наук          | 17.06.2025      |  |
| Расчетный раздел       | О. И. Ширяева<br>канд. техн. наук          | 17.06.2025      |  |
| Нормоконтролер         | К. А. Манатов<br>магистр техн. наук        | 17.06.2025      |  |

Научный руководитель

  
подпись

Ширяева О. И.

Задание принял к исполнению обучающийся

  
подпись

Пичугин А.К.

Дата

«1» 02 2025 г.

## **АНДАТПА**

Осы дипломдық жоба аясында электр пешінің температурасын автоматтандырылған басқару жүйесі жасалды, оған жүйенің математикалық моделі қамтамасыз етіліп, функционалдық схема әзірленіп, заманауи аппараттық қамтамасыз етумен таңдалды және басқару алгоритмдері Siemens SIMATIC S7-1512C-1 PN ПЛК-сында TIA Portal ортасында бағдарламаланды. Жүйенің динамикалық қасиеттері зерттеліп, математикалық модель құрылып, тұрақтылық бағаланды; өтпелі процестің сапалық сипаттамалары талданып, PID-регулятор Ziegler–Nichols және Chien–Hrones–Reswick әдістерімен синтезделді. Салыстырмалы эксперимент нәтижелері бойынша Chien–Hrones–Reswick әдісімен бапталған және жылдамдық пен тұрақтылық запасының оңтайлы арақатынасын қамтамасыз ететін регулятор таңдалды.

## **АННОТАЦИЯ**

В данном дипломном проекте разработана автоматизированная система регулирования температуры электрической печи, в которую входят обеспечение математической модели системы, разработка функциональной схемы, выбор современного аппаратного обеспечения и программная реализация алгоритмов на ПЛК Siemens SIMATIC S7-1512C-1 PN в TIA Portal. Проведен разбор динамических свойств системы с построением математической модели и оценкой устойчивости; выполнены исследования качественных характеристик переходного процесса и синтез ПИД-регулятора методами Циглера–Никольса и Чина–Хронеса–Ресвика. В соответствии с результатами сравнительного эксперимента выбран управляющий регулятор, настроенный методом Чина–Хронеса–Ресвика и имеющий оптимальное соотношение быстродействия к запасу устойчивости.

## **ABSTRACT**

In this diploma, an automatic temperature control system for an electric furnace was implemented, starting from the development of the mathematical model of the system, generation of the functional scheme, selection of new equipment, to the implementation of the control algorithm on a Siemens SIMATIC S7-1512C-1 PN PLC using TIA Portal. System dynamics were studied through the development of its mathematical model and confirmation of stability; qualitative transient response characteristics were examined, and a PID controller was designed according to Ziegler–Nichols and Chien–Hrones–Reswick schemes based on qualitative transient response characteristics. Based on comparative experimental observation, Chien–Hrones–Reswick-tuned controller with the best possible balance between response rate and stability margin was chosen.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение                                                                             | 7  |
| 1 Технологическая часть                                                              | 8  |
| 1.1 Описание объекта                                                                 | 8  |
| 1.2 Области применения печей                                                         | 9  |
| 2 Разработка структурной схемы системы автоматического управления                    | 11 |
| 2.1 Определение точек контроля                                                       | 11 |
| 2.2 Определение структуры АСУ ТП                                                     | 12 |
| 3 Разработка функциональной схемы автоматизации системы управления температурой печи | 14 |
| 3.1 Функциональная схема автоматизации                                               | 14 |
| 3.2 Выбор оборудования                                                               | 14 |
| 4 Расчетная часть                                                                    | 23 |
| 4.1 Постановка задачи для синтеза контура управления                                 | 23 |
| 4.2 Анализ динамических свойств системы                                              | 24 |
| 4.3 Синтез типового регулятора                                                       | 29 |
| 4.3 Выбор эмпирического метода                                                       | 36 |
| 4.4 Компенсация возмущений                                                           | 37 |
| 5 Создание программы управления                                                      | 41 |
| 5.1 Разработка алгоритма                                                             | 41 |
| 5.2 Разработка программы управления объектом                                         | 42 |
| 5.3 Разработка SCADA-системы для управления объектом                                 | 48 |
| Заключение                                                                           | 50 |
| Список использованной литературы                                                     | 52 |
| Приложение А                                                                         | 53 |

## ВВЕДЕНИЕ

В современных производственных процессах электрические печи занимают место благодаря возможности точного и экологически чистого нагрева материалов в металлургии, керамическом, стекольном и химическом производствах. Их отличительными особенностями являются высокая тепловая инерционность и нелинейность динамики, что предъявляет жёсткие требования к алгоритмам управления для обеспечения равномерного и оперативного достижения заданных температурных режимов. Целью данной работы является разработка автоматизированной системы регулирования температуры в рабочей зоне промышленной электрической печи с учётом внешних возмущений и изменений характеристик нагружаемой продукции.

В рамках исследования решены следующие задачи: определены точки управления, структура; разработана функциональная схема автоматизации; произведен выбор оборудования; синтезированы ПИД-регуляторы методами Циглера-Никольса и Чина-Хронеса-Ресвика с последующим сравнительным анализом переходных процессов; реализована схема компенсации внешнего возмущения при помощи использования PI-регулятора в качестве компенсатора. Программная реализация выполнена в среде TIA Portal на базе контроллера S7-1512C-1 PN.

# **1 Технологическая часть**

## **1.1 Описание объекта**

Электрические печи являются ключевым оборудованием в самых разных отраслях промышленности — металлургии, машиностроении, стекольном и керамическом производстве, электронной и химической промышленности. Их главная задача заключается в том, чтобы преобразовывать электрическую энергию в теплоту и передавать ее обрабатываемым материалам или средам с высокой точностью и равномерностью. В отличие от трубчатых или камерных печей, работающих на сжигании топлива, электрические печи работают на электрических нагревательных элементах (спирали из нихромовых, короновых или керамических материалов, индукционные катушки, графитовые электроды), что существенно снижает выбросы вредных веществ и обеспечивает более гибкое регулирование температурного профиля [1].

Принцип действия электрической печи включает несколько этапов: подачу электроэнергии к элементам и их равномерное распределение, преобразование электрического тока в теплоту за счет сопротивления или индукции, передачу тепла обрабатываемому изделию с использованием излучения или конвекции. Электроисполнительные механизмы или тиристорные преобразователи отвечают за подачу электроэнергии к нагревательным элементам и плавное регулирование мощности и, следовательно, скорости нагрева. Пространство внутри печи облицовано теплоизоляционными материалами из керамики и волокнистых минералов, что делает такое помещение теплоэкономным и обеспечивает равномерный температурный профиль вдоль нагревательной зоны.

Промышленные электрические печи бывают разные — от камерных и камерно-индукционных до шахтных и муфельных, каждая из которых оптимизирована под технологический процесс: плавка сплавов, отжиг и закалка, обжиг керамики, сушка порошковых покрытий и термообработка высокотемпературных материалов.

Система регулирования температуры в электрической печи включает устройства сбора данных (термопары, пирометры), перекодирователи, программируемый логический контроллер (ПЛК) и силовые модули управления (тиристорные и симисторные). Информация о текущей температуре, полученная от термопары, передается в контрольные блоки для сравнения с уставкой. На основе этого сравнения ПЛК генерирует служебные сигналы на управляющие модули, которые настраивают ток через нагревательный элемент. Обратная связь и встроенные методы коррекции при изменении источника питания (выпадение или увеличение напряжения), изменения характеристик нагружаемой массы,

потерь тепла при открытом дверце) обеспечивают высокоточную стабилизацию температуры с большим масштабом отсчета и изменения. Безопасность эксплуатации печей включает в себя автоматическое размыкание электрической цепи при выборе температуры зоны отопления и контроля за состоянием основных элементов конструкции изоляторов и нагревательных устройств, а также защиту от возможных перегрузок по току и напряжению. Кроме того, мягкий пуск и текущие временные законы разогрева позволяют снизить механические и тепловые структурирующие нагрузки на металлическую заготовку. Оптимальная организация управления, работающих объектов и налаживание алгоритмов прямо включается по инструкциям, обеспечивает требуемые технологические условия и снижает энергопотребление под определенный оборудования.

## **1.2 Области применения печей**

Электрические печи сегодня это неотъемлемая часть технологического процесса, способная обеспечить высокотемпературную и точную настройку тепловой обработки. В металлургии они применяются для плавки, термообработки, отжига и закалки металлов и сплавов, что обеспечивает строгий контроль температуры, необходимого для получения требуемых механических и химических свойств. Камерные, индукционные и дуговые, а также шахтные и вагранки с электрическим подогревом, под каждую задачу берется свой тип, оптимальный для конкретного производства [2].

В строительстве и цементном производстве нашли применение электрические печи для обжига керамики, извести, кирпича и цемента. Роторные и камерные конструкции обладают равномерностью прогрева изделий и точностью профиля температуры, что важно для изготовления высокопрочных и долговечных строительных материалов.

В химии и нефтехимии печи используются для ректификации, крекинга углеводородов и каталитического окисления при высоких температурах. Важно здесь управление программным тепловым режимом, оперативная корректировка его параметров, позволяющие сделать производство энергоэффективным, продукты — высококачественными.

Энергетика и теплоэнергетика.

В теплоснабжении электрические печи применяют как вспомогательные котлы-парообразователи, подогревающие горячую воду и пар на теплоэнергетических объектах, так и взять на себя полное теплоснабжение производства. Высокая плотность мощности и высокая надежность при полной

нагрузке делает их привлекательными для объектов с повышенными обязательствами к чистоте и стабильности подачи тепловой энергии. Мы видим, что печи тоже осваивают технологии утилизации промышленных отходов и бытового мусора.

Научные исследования и лабораторные испытания.

Лабораторные печи — неотъемлемый атрибут НИЦов, университетов и сертификационных лабораторий. Их небольшие размеры, высокая точность в установке температуры и равномерность распределения теплового поля — идеальные атрибуты экспериментов по синтезу, опытные испытания металла, керамики, контроля термодинамических свойств образцов. Красная нить — широкий диапазон температур и программное управление нагревом, что делает их одинаково уместными в физике, химии, материаловедении и производных от них наук.

Универсальность и надежность.

Электрические печи бывают от крошечных лабораторных до гигантских шкафов и башен. Их проектирование подчинено задачам взять от температурного диапазона, необходимой изоляции и организации нагревательных элементов и условий эксплуатации оборудования. Высокая энергоэффективность, безопасность и способность без проблем встраиваться в систему управления делают электрические печи одним из самых современных и универсальных решений в области тепловой обработки материалов для широкого круга отраслей.

## **2 Разработка структурной схемы системы автоматического управления**

### **2.1 Определение точек контроля**

Система автоматического управления электрической печью должна обеспечивать устойчивую, эффективную и безопасную работу в самых разных режимах тепловой обработки. Для этого в составе АСУ ТП реализуются функции дистанционного контроля процесса нагрева, сбора и анализа технологических данных, постоянного мониторинга критических параметров и оперативного срабатывания защитных механизмов.

В качестве основных точек контроля непрерывной системы регулирования электрической печи используются:

- температура камеры (измеряемая термопарой) — в зависимости от технологического цикла её удерживают в 980...1200 °С;
- температура нагревательного элемента — на входе и выходе;
- сигналы от регулятора напряжения — формирующего управляющее напряжение постоянного тока;

Точки управления включают:

- изменение тока через трёхфазный SCR-регулятор для плавной модуляции мощности нагревательного элемента;

Система аварийной защиты должна отключать подачу питания или переводить печь в безопасный «холостой» режим при:

- превышении температуры камеры выше 1250 °С;
- потере связи с термопарой или электронным усилителем;
- падении питающего напряжения или обрыве цепей управления;

Для реализации указанных функций АСУ ТП электрической печи строится по трёхуровневой архитектуре:

Нижний уровень (полевой) — датчики (термопара, датчики тока, вибрации) и исполнительные механизмы (магнитный усилитель, электронный усилитель, вентиляторы) выполняют физическую регистрацию и воздействие.

Средний уровень — программируемый логический контроллер (ПЛК) обрабатывает аналоговые и цифровые сигналы, запускает алгоритмы ПИД-регулирования тока/напряжения и обеспечивает аварийную логику.

Верхний уровень — человеко-машинный интерфейс и SCADA-система предоставляют обзор состояния оборудования, позволяют оператору задавать уставки температуры, просматривать тренды, осуществлять дистанционное управление и проводить диагностику.

Такая структура обеспечивает гибкость настройки, надёжность и безопасность эксплуатации электрической печи, позволяя быстро адаптироваться к изменениям технологических требований и внешних воздействий.

## **2.2 Определение структуры АСУ ТП**

Автоматизированное управление процессами в промышленных печах обязано соответствовать целому ряду качественных требований, что позволит обеспечить стабильную, эффективную и конфиденциальную работу устройства в технологически деликатных и агрессивных условиях производства. Наиболее значимые потребности, проводимые по такому технологическому аспекту - это ультимативная точность управления, безусловная надёжность и доверие, а также стопроцентная безопасность работы в режимах электрической печи.

Точное направление процесса. Функционирование системы управления для обеспечения абсолютно высокой линейной устойчивости основных параметров электрической установки, прим. температурного сложения рабочего фазонагрева, тока и напряжения нагрева в нагревательной трубке. Данное детальное проведение настроек температурных параметров события позволяет гарантировать высокое качество процесса термообработки и сократить энергетические затраты на самообслуживание.

Надёжность работы и безопасность. Система автоматизированного управления электрической установкой должна быть одинаково действенной в любом, неважно штатном режиме или нет. В ее процесс прекрасно смотрятся функции автоматического отключения на выполнение высоких режимов температуры, перегрузки нагревателей и аномальных вариаций в токе/напряжении. Такие нештатные ситуации при пуске аварийной сигнализации и блокировании угрожающих воздействий, уж срабатывать должны без какого-либо промедления по окончании оператора.

Устройство нижнего уровня (полевого уровня):

Измерительное оборудование: термопаро-пирометрические датчики в камере исследования, датчик тока-напряжения на нагревательном элементе, датчики давления-температуры в теплоносителях. Все аналоговые сигналы (4-20мА или цифровые по HART\Modbus) передаются на контроллер. Исполнительные механизмы: силовые тиристорные-симистровые модули, магнитные усилители.

Устройство среднего уровня:

ПЛК обрабатывает: данные с датчиков, сравнивает их с заданными уставками, вычисляет необходимые управляющие воздействия по алгоритмам

ПИД-регулирования тока-напряжения-мощности, формирует команды управления тиристорами, исполнительное оборудование. Реализация защитных логик: самостоятельное отключение при выходе из рабочего диапазона, перевод в безопасный режим при неисправности датчиков-исполнительного оборудования. Управление как автоматическое полностью, так частичное ручное по командам оператора.

Устройство верхнего (HMI/SCADA) уровня:

HMI-станция: визуализация всех текущих значений и трендов по температуре, параметрам электричества, состоянию защиты, отображение аварийных сообщений, журнала событий и выдачи для оперативного руководства (установление уставки температуры, смена режимов функционирования, запуск\останов системы). SCADA-система: централизованный сбор данных, хранение исторических трендов, удаленный доступ, интеграция с верхними системами управления, MES.

Такая многоуровневая структура АСУ ТП электрической печи позволяет достичь оптимального баланса между точностью регулирования, быстродействием, надёжностью и безопасностью в самых разнообразных производственных сценариях.

## **3 Разработка функциональной схемы автоматизации системы управления температурой печи**

### **3.1 Функциональная схема автоматизации**

Функциональная схема автоматизации промышленной электрической печи отражает все основные блоки и связи, необходимые для надёжного и точного поддержания заданного температурного режима в рабочей камере. Центральным элементом системы является программируемый логический контроллер (ПЛК), который получает информацию от термопары, установленной в ключевой точке зоны нагрева. На основе сравнения текущих значений с заданными уставками ПЛК формирует управляющий сигнал для трёхфазного SCR-регулятора, обеспечивающего модуляцию электрической мощности, подаваемой на сопротивление нагревателя.

Второй важный узел функциональной схемы – модуль аварийной и защитной логики, реализующий блокировку подачи питания при выходе температуры за безопасный диапазон, при перегрузках по току или при отказах датчиков. Сигналы состояния и тревоги направляются на человеко-машинный интерфейс (HMI/SCADA), где оператор может наблюдать графики изменения температуры. Вся коммуникация между ПЛК и верхним уровнем осуществляется по промышленным протоколам, что обеспечивает централизованный сбор данных и их интеграцию в систему управления производством. Такая структурно-функциональная схема позволяет обеспечить высокую точность, оперативность и безопасность управления электрической печью в различных технологических режимах.

Функциональная схема автоматизации системы управления температурой печи представлена в приложении А.

### **3.2 Выбор оборудования**

#### **3.2.1 Выбор нагревательного элемента**

Элементы нагрева на основе альфа-силицида кремния (SiC) группы Global SD являются предпочтительными, как основной источник тепла для электрической печи, и это неслучайно. Во-первых, широкий температурный диапазон до 1600°C покрывает все необходимые технологические режимы нагрева до 1200°C с большим ресурсом работы при высоких температурах. Во-вторых, высокая поверхностная нагрузка до 11 Вт/см<sup>2</sup> при 1350°C обеспечивает быстрое и равномерное прогревание рабочего объема, сокращая время

переходных процессов и упрощая плавный синтез ПИД-регулятора. В-третьих, широкий выбор диаметров (10...55 мм) и длин (до 4,2 м) даёт возможность точно подобрать конфигурацию спиралей под геометрию печи, сохраняя необходимую плотность мощности и гарантируя равномерность нагрева. В-четвертых, отличная циклическая надежность и стабильность сопротивления (изменение не более  $\pm 10\%$  при 1350°C) элементов семейства Global SD обеспечивает высокую повторяемость тепловых параметров в многократных циклах работы. Наконец, самонесущая конструкция спиралей упрощает монтаж и обслуживание: элементы легко фиксируются в керамических держателях без дополнительной опоры, что ускоряет замену при плановом техобслуживании. В совокупности присущие элементам Global SD свойства делают их идеальным выбором автоматизированной системы управления температурой промышленного нагревательного оборудования. Технические характеристики представлены в таблице 3.1. Нагревательный элемент представлен на рисунке 3.1 [3].

Таблица 3.1 – Технические характеристики Global SD

| Параметр                         | Значение                                                                       |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Материал                         | Альфа-силицид кремния (SiC)                                                    |
| Максимальная температура нагрева | до 1 600 °C                                                                    |
| Диаметр (ØА)                     | 10 мм, 12 мм, 16 мм, 19 мм, 22 мм, 25 мм, 29 мм, 35 мм, 40 мм, 45 мм, 55 мм    |
| Максимальная длина (Lmax)        | до 4 200 мм                                                                    |
| Конструкции                      | Одножильные стержни; U-, CU- и W-образные многоножевые элементы                |
| Поверхностная мощность           | до 11 Вт/см <sup>2</sup> при температуре $\leq 1\ 350\ ^\circ\text{C}$         |
| Стабильность сопротивления       | Изменение $\leq \pm 10\ %$ при 1 350 °C                                        |
| Циклическая надёжность           | Высокая: рассчитаны на многократные циклы нагрева/охлаждения без разрушения    |
| Монтаж                           | Самонесущие элементы: устанавливаются в керамические держатели без опоры снизу |
| Применение                       | Промышленные и лабораторные печи, муфельные печи, калориферы, отжиг металлов   |



Рисунок 3.1 – Нагревательный элемент Globar SD

### 3.2.2 Выбор регулирующего органа

Выбор трёхфазного SCR-регулятора Lorentzzi LPT-350 для управления нагревательными элементами электрической печи обусловлен его техническими и эксплуатационными характеристиками, максимально соответствующими заданным требованиям. Во-первых, диапазон номинального тока до 350 А и возможность работы в сетях  $3\times 220\text{--}3\times 400\text{ VAC}$  позволяет адаптировать устройство как к маломощным, так и к крупногабаритным промышленным установкам, обеспечивая оптимальный режим нагрузки и продлевая срок службы спиралей. Во-вторых, два режима управления — фазовый срез и «burst firing» (zero-cross) — дают необходимую гибкость: фазовый срез обеспечивает быстрое реагирование на изменения уставки, а zero-cross-режим минимизирует искажения питающей сети, поддерживая погрешность регулирования на уровне  $\pm 1\%$  от диапазона. Кроме того, наличие оптоизолированных аналоговых входов  $4\text{--}20\text{ mA}$  и  $0\text{--}10\text{ V}$ , а также интерфейса Modbus RTU по RS-485 обеспечивает бесшовную интеграцию с ПЛК Siemens S7-1500 и SCADA-системой, упрощая обмен диагностической информацией и калибровку без применения дополнительных конвертеров. Встроенные средства защиты от перегрузки по току, перенапряжения и пропадания фазы, а также эффективное воздушное или водяное охлаждение гарантируют надёжность и безопасность эксплуатации даже при длительной работе на полной мощности. Наконец, унифицированный фактор  $3U/4U$  и степень защиты IP20 (с опцией повышения до IP40/IP54) позволяют компактно разместить регулятор в стандартном шкафу автоматики и значительно сократить время технического обслуживания, что минимизирует простой технологического оборудования. Все эти преимущества делают Lorentzzi LPT-350 оптимальным выбором для силовой части системы управления электрической печью, обеспечивая высокую точность, быстроедействие и

отказоустойчивость регулирования температуры. Изображен на рисунке 3.2. Технические характеристики представлены в таблице 3.2 [4].

Таблица 3.2 – Технические характеристики

| Параметр                    | Значение                                                                         |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Модель                      | Lorentzzi LPT-350                                                                |
| Тип управляемого устройства | 3-фазный тиристорный (SCR) power controller                                      |
| Номинальный ток             | 50 А...350 А (в зависимости от исполнения: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 А)   |
| Номинальное напряжение сети | 3×220 VAC ±10 %, 3×380 VAC ±10 %, 3×400 VAC ±10 % (по заказу)                    |
| Диапазон управления         | 4...20 mA, 0...10 V (аналоговый вход); опционально — Modbus RTU                  |
| Метод управления            | Zero-cross (burst firing) и фазовый срез (phase-angle)                           |
| Погрешность регулирования   | ±1 % от диапазона                                                                |
| Интерфейсы связи            | RS-485 (Modbus RTU), оптоизолированные аналоговые вход/выход                     |
| Частота переключения        | 50/60 Hz (синхронизация по нулю сети)                                            |
| Защиты                      | от перегрузки по току, перенапряжения, от обрыва фазы, от превышения температуры |
| Охлаждение                  | вынужденное воздушное, опционально водяное                                       |
| Рабочая температура         | −10...+50 °C                                                                     |
| Степень защиты корпуса      | IP20 (опция IP40/IP54 с дополнительным кожухом)                                  |

Продолжение таблицы 3.2

|                          |                                                                               |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Габаритные размеры       | 3U (88 × 210 × 250 мм) для 50–150 А;<br>4U (176 × 210 × 250 мм) для 200–350 А |
| Масса                    | 1,2 кг (50 А), до 3,5 кг (350 А)                                              |
| Сертификации и стандарты | CE, UL508, RoHS                                                               |



Рисунок 3.2 – Тиристорный трехфазный регулятор напряжения

### 3.2.3 Выбор датчика температуры

Для измерения высоких температур в рабочей зоне бытового устройства соответствуют термопары с платиновородиевым спаиваем, выдерживающим температуры до 1600 °С. На выбор компания Siemens предлагает головные измерительные преобразователи серии SITRANS TH300/TH400, оптимизированные для расчета со спаиваем типа R и S (PtRh-Pt) с адаптированной работой на температурных значениях до ≈1600 °С. Преобразователь изображен на рисунке 3.3.

Рассмотрим пример - преобразователь назначения TH300 с спаиваем черновой группы S (Pt10Rh-Pt), продуктивно перевод/донести сигнал (4...20 мА) с датчика сразу в площадь оценки (HART). Состав датчика включает созданный для защиты термического устройства - ограждение теплоустойчивый саркофаг (ложь керамики или высокотехнологичной стали) и штыревую структуру устройства с электроникой, выплеснуть против химических процессов и естественного деградирования. Устройство включает элемент утепления холодного спаиваем и можно увидеть в сочетании ланцетом диагностики. Итак -

возможно приобретение прибора TH300 (400) с платиновой ветвью с подходящим значением. Его условия (а именно - диапазон до ~1600 °С, телеграфная 4...20 мА по форме (HART)) и рукотворная взаимозаменяемость с оборудованием АСУ ТП делают его порой внедрения на печь. Технические характеристики представлены в таблице 3.3 [5].

Таблица 3.3 – Технические характеристики TH300

| Параметр               | Значение                |
|------------------------|-------------------------|
| Тип входа              | Pt25-Pt1000, Ni25-Ni100 |
| Внешняя температура    | от -40 до 85 °С         |
| Температура хранения   | от -40 до 85 °С         |
| Отн. влажность воздуха | < 98%, конденсат        |
| Вес                    | 50 гр                   |
| Класс защиты корпуса   | IP40                    |



Рисунок 3.3 – Преобразователь температуры SITRANS TH300

Для использования с преобразователем температуры Siemens SITRANS TH300, предназначенным для измерения высоких температур в рабочей зоне печи, используем термопару типа S (Pt10Rh–Pt) изображенную на рисунке 3.4. Этот тип термопары обеспечивает надёжность и точность в условиях высоких температур.

Платиновая родиевая термопара изготовлена из благородного металла, (платин высокой чистоты как катод, платин и родий сплав как положительный полюс), корунд как внешняя труба, которая используется для измерения до 1800 С, как порошковая металлургия, вязание печи, вакуумная печь, металлургическая печь и кальцинация огнестойких материалов, керамика. Широко используется в высокотемпературном производстве, например, в производстве стекла, керамики

и промышленных купальных печей NaCl и т. д. Технические параметры представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Технические характеристики ТН300

|               |                    |
|---------------|--------------------|
| Датчик        | Pt10Rh–Pt          |
| Тип           | S                  |
| Диапазон, °C  | От 0 до 1800       |
| Материал спая | Платинородиевый    |
| Совместимость | Совместима с ТН300 |



Рисунок 3.4 – Термопара Pt10Rh-Pt

### 3.2.4 Выбор контроллера

При выборе программируемого логического контроллера для управления рассматривались две линейки Siemens — S7-1200 и S7-1500. Мной был выбран S7-1512C-1 PN на 5 AI, 2 AO, 16/16 DI/DO, который изображен на рисунке 3.5, поскольку он демонстрирует существенно более высокую производительность и скорость обработки команд (около 60 нс на операцию против 0,1 мкс у S7-1200), поддерживает расширенный набор коммуникационных протоколов (OPC UA, PROFINET IRT, PROFIBUS через модули) для гибкой интеграции с современными промышленными сетями, рассчитан на работу в диапазоне температур до +60 °C, что обеспечивает надежную эксплуатацию в суровых условиях без дополнительных охлаждающих решений, располагает большим количеством встроенных и расширяемых дискретных и аналоговых каналов ввода-вывода для реализации сложных алгоритмов управления без значительных затрат на внешние модули, а также оснащен интуитивным пользовательским интерфейсом и расширенными диагностическими функциями, повышающими надежность системы и упрощающими её сервисное обслуживание на протяжении всего жизненного цикла проекта. Кроме того, контроллер S7-1500 отличается упрощённым процессом программирования, что обеспечивает

удобство её эксплуатации в рамках дипломного проекта. Сводное сравнение ключевых технических показателей обеих серий представлено в таблице 3.5 [6].

Таблица 3.5 – Сравнение контроллеров

| Параметр                  | S7-1200                                                                                                                                                  | S7-1500                                                                                                                                 |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Рабочая температура       | 0...+50 °C                                                                                                                                               | 0...+60 °C                                                                                                                              |
| Протокол передачи данных  | PROFINET (TCP/IP, ISO on TCP), поддержка S7-коммуникации, Modbus TCP                                                                                     | PROFINET IRT, поддержка S7-коммуникации, Modbus TCP, OPC UA, PROFIBUS (через модули CP), Industrial Ethernet                            |
| Интерфейсы                | 1× RJ45 Ethernet (в CPU 1211C, 1212C, 1214C); 2× RJ45 с коммутатором (в CPU 1215C, 1217C)                                                                | 2× RJ45 Ethernet (PROFINET IRT) с коммутатором; дополнительные интерфейсы через модули расширения: PROFIBUS, RS-485, RS-232, CAN, и др. |
| Дискретные входы/выходы   | Встроенные: от 6 до 14 входов и от 4 до 10 выходов в зависимости от модели; расширение до 284 дискретных каналов через модули SM                         | Встроенные: например, в CPU 1512C-1 PN — 16 входов и 16 выходов; расширение до 2048 дискретных каналов через модули SM                  |
| Аналоговые входы/выходы   | Встроенные: 2 аналоговых входа (в CPU 1211C, 1212C, 1214C); 2 входа и 2 выхода (в CPU 1215C, 1217C); расширение до 51 аналогового канала через модули SM | Встроенные: например, в CPU 1512C-1 PN — 5 аналоговых входов и 2 выхода; расширение до 512 аналоговых каналов через модули SM           |
| Время выполнения операций | ~0,1 мкс на логическую операцию                                                                                                                          | ~60 нс на логическую операцию                                                                                                           |



Рисунок 3.5 – S7-1512C-1 PN

## 4 Расчетная часть

### 4.1 Постановка задачи для синтеза контура управления

В соответствии с техническим заданием дипломной работы необходимо синтезировать контуры управления:

- контур регулирования температуры электрической печи на основе комбинированного принципа управления на рисунке 4.1;
- контур программного управления температурой в камере нагрева на рисунке 4.2 [7].

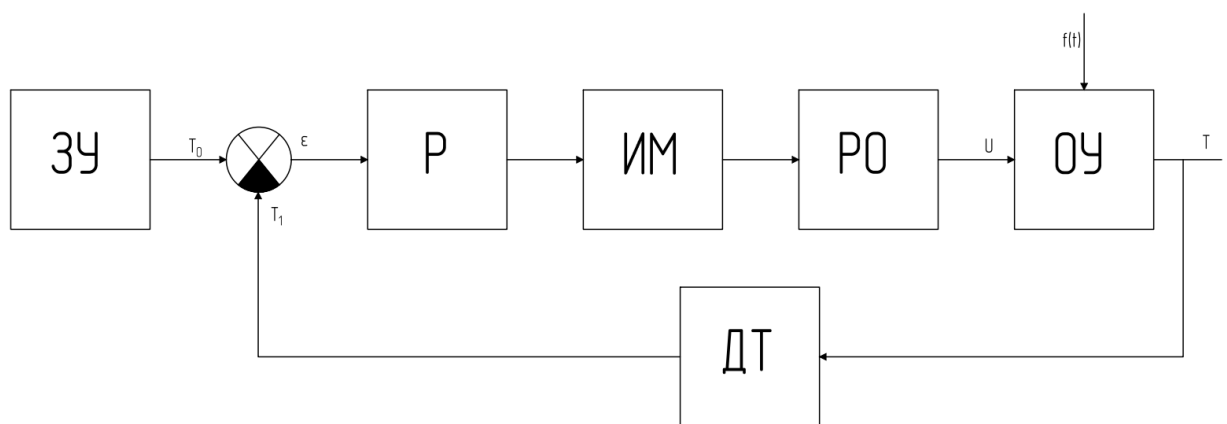


Рисунок 4.1 – Функциональная схема контура регулирования температуры

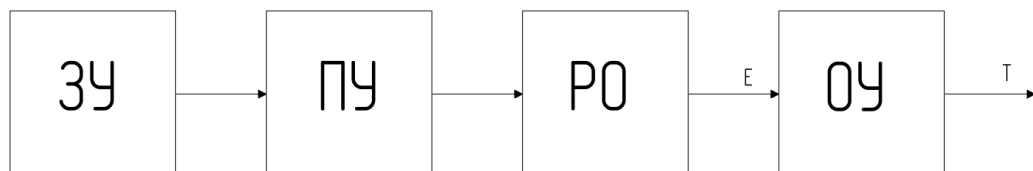


Рисунок 4.2 – Функциональная схема контура программного управления

где  $U$  – напряжение, В;

$T$  – текущая температура в камере печи, градус цельсия  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_0$  – заданная температура, градус цельсия  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_1$  – температура с датчика, градус цельсия  $^{\circ}\text{C}$ ;

$f(t)$  – внешнее возмущение

На основе представленного контура управления сформируем следующие задачи:

Постановка задачи №1. Синтезировать типовой регулятор для достижения желаемых оценок качества на основе математической модели замкнутой системы регулирования.

Постановка задачи №2. Реализовать систему программного управления температурой на основе функциональной схемы.

## 4.2 Анализ динамических свойств системы

На основании предварительного анализа динамики электрической печи был выделен контур управления подводимой к нагревательному элементу мощности как ключевой для поддержания заданного температурного режима. Управление электрической мощностью непосредственно определяет скорость нарастания температуры: при увеличении подводимого тока и напряжения через силовой модуль мощность нагревателя растёт, что обеспечивает более быстрый нагрев камеры до требуемого значения. При этом вводится ограничение по максимальной температуре во избежание термических перегрузок и продления ресурса нагревательных спиралей и огнеупорной футеровки.

Для последующего синтеза регулятора в качестве математической модели используется передаточная характеристика силового контура, включающего электронный усилитель, магнитный усилитель и дроссель насыщения, где входным параметром является управляющее напряжение, задающее ток через нагревательный элемент, а выходным — температура в рабочей зоне печи. Представим структурную схему с переходными функциями звеньев на рисунке 4.3.

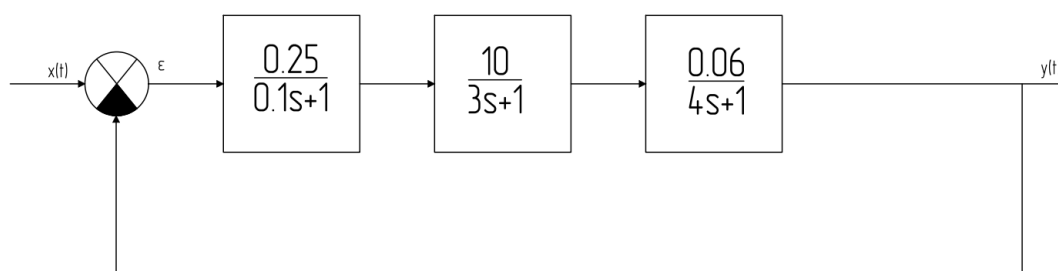


Рисунок 4.3 – Структурная схема

Для описания динамики зависимости температуры в камере электрической печи от управляющего сигнала получена передаточная функция вида (4.1):

$$G(s) = \frac{0.15}{1.2s^3 + 12.7s^2 + 7.1s + 1} \quad (4.1)$$

Эта модель третьего порядка адекватно отражает основные динамические свойства теплового объекта с учётом инерционности нескольких звеньев — электрического усилителя, магнитного дросселя и тепловой массы печи. Во-первых, кубическое полиномиальное звено в знаменателе учитывает как быстрое первичное реагирование силовой электроники так и более медленные процессы тепловой инерции корпуса и нагревательного элемента. Во-вторых, свободный член «1» обеспечивает правильное нормирование статического отклика системы, в результате чего коэффициент передачи 0.15 задаёт установившееся отношение изменения температуры к изменению управляющего сигнала.

В совокупности эта модель позволяет адекватно аппроксимировать «управляющее напряжение → температура» в широком диапазоне рабочих режимов без явного выделения чистого запаздывания. Её использование даёт достаточную точность для синтеза регуляторов, сохраняя при этом умеренную сложность, что обеспечивает возможность быстрого анализа устойчивости и оценки переходных характеристик в MATLAB/Simulink перед проведением натурных испытаний на реальном оборудовании.

Для преобразования передаточной функции замкнутой системы используем формулу (4.2) обратной связи:

$$T(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} \quad (4.2)$$

Передаточная функция замкнутой системы будет иметь вид:

$$T(s) = \frac{3}{24s^3 + 254s^2 + 142s + 23} \quad (4.3)$$

Найдем полюса замкнутой системы. Для этого запустим скрипт, изображенный на рисунке 4.4, в программе MatLab:

```

% 1. Задаём разомкнутую модель G(s)
num = 0.15;
den = [1.2, 12.7, 7.1, 1];
G = tf(num, den);

% 2. Строим замкнутый контур с единичной обратной связью
T_cl = feedback(G, 1);

% 3. Вычисляем полюса замкнутой системы
poles_cl = pole(T_cl);

% 4. Строим карту полюсов на комплексной плоскости
figure('Color','w');
plot(real(poles_cl), imag(poles_cl), 'rx', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(0,0,'k+', 'MarkerSize',8,'LineWidth',1.5); % начало координат
grid on;

% Оформление осей
xlabel('Re\{s\}', 'FontSize',12);
ylabel('Im\{s\}', 'FontSize',12);
title('Полюса замкнутой системы T_{cl}(s)', 'FontSize',14);

```

Рисунок 4.4— Скрипт в программе MatLab для нахождения полюсов

Изобразим полюса на комплексной плоскости на рисунке 4.5.

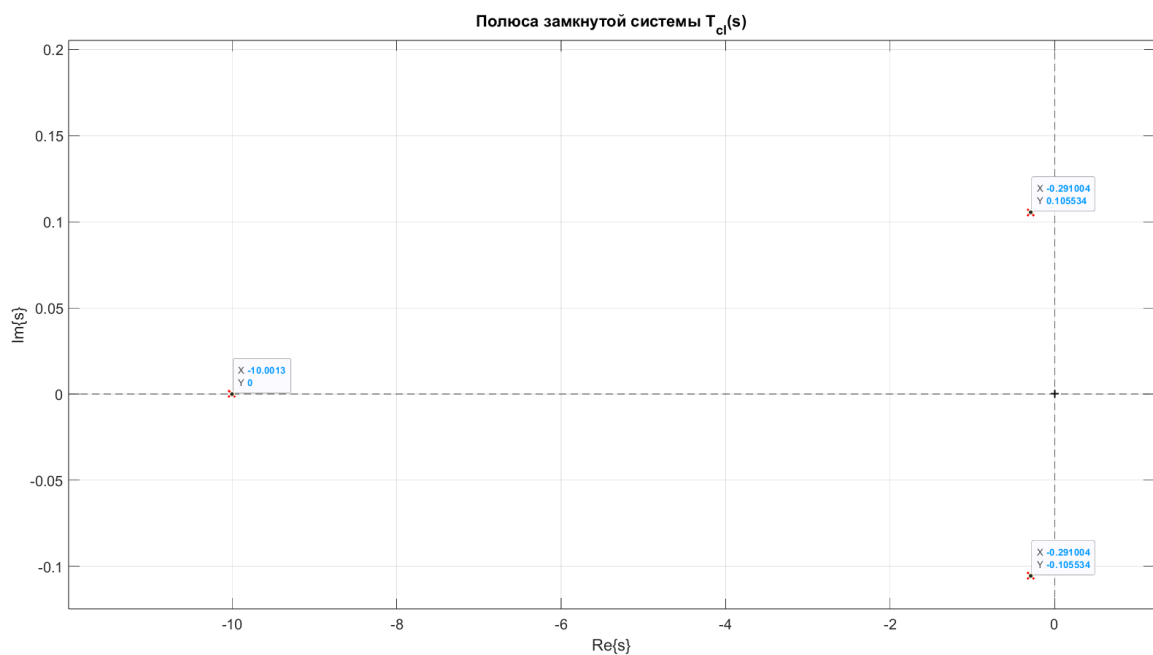


Рисунок 4.5 – Корни характеристического уравнения САР на комплексной плоскости

Вывод: согласно второму методу Ляпунова, замкнутая САР является устойчивой, так как полюса равны отрицательным действительным значениям и расположены в левой части на комплексной плоскости.

Для дальнейшего анализа системы управления будет использована прикладная программа Simulink. Она играет роль графической среды для

моделирования систем. Также будут использованы скрипты в Matlab, без использования Simulink.

Представим схему замкнутой САР электрической печи на рисунке 4.6 и запустим модель для получения переходной характеристики.

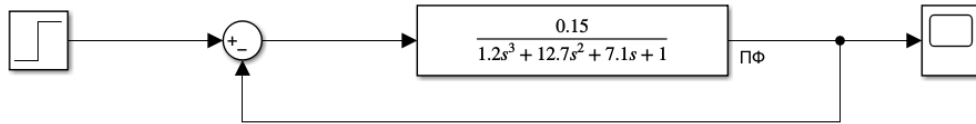


Рисунок 4.6 – Структурная схема замкнутой САР

Полученная характеристика позволяет получить прямые оценки качества. Результат моделирования представлен на рисунке 4.7.

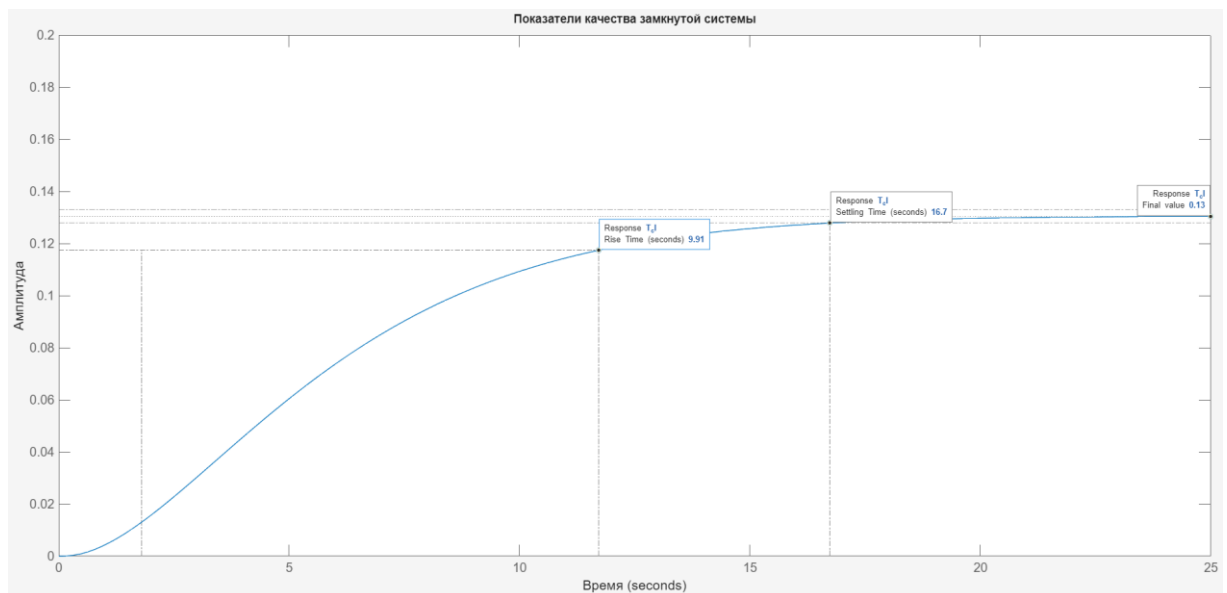


Рисунок 4.7 – Переходной процесс замкнутой системы с прямыми оценками качества

Произведем расчет прямых оценок качества на основе полученного переходного процесса:

Время регулирования – это минимальный интервал времени с момента начала переходного процесса, по истечении которого выходная величина входит в диапазон допустимого отклонения от установившегося значения. На рисунке 4.8 время регулирования представлено точкой Settling Time и равно  $T_{\text{set}} = 16.7$  с.

Перерегулирование показывает процент, на который выходной сигнал превышает уставку перед тем, как начнет стабилизироваться. В нашем случае, так как переходной процесс монотонный, перерегулирование равно нулю.

Как видим, в MatLab не представлена статическая ошибка для нашего переходного процесса. Найдем статическую ошибку.

Статическую ошибку можно найти по формуле (4.4):

$$e_{ss} = 1 - y(\infty) = 1 - \lim_{s \rightarrow 0} T(s) \quad (4.4)$$

По формуле (4.4) найдем значение  $e_{ss}$ :

$$e_{ss} = 1 - \lim_{s \rightarrow 0} \left[ \frac{3}{24s^3 + 254s^2 + 142s + 23} \right] = 1 - \frac{3}{23} = 0.8696$$

Таким образом, представим прямые оценки качества в виде таблицы 4.1.

Таблица 4.1 – Прямые оценки качества САР

| № | Оценки Качества                              | Значения |
|---|----------------------------------------------|----------|
| 1 | Время регулирования ( $T_{set}$ )            | 16.7 сек |
| 2 | Перерегулирование ( $P_{ov}$ )               | 0%       |
| 3 | Число колебаний (М)                          | 0        |
| 4 | Колебательность ( $\mu$ )                    | 0%       |
| 5 | Частота колебаний ( $w_{osc}$ )              | 0        |
| 6 | Установившаяся ошибка ( $e_{ss}$ )           | 0.8696   |
| 7 | Время достижения первого максимума ( $T_p$ ) | 0 сек    |
| 8 | Время нарастания ( $T_R$ )                   | 9.91 сек |
| 9 | Декремент затухания ( $\lambda$ )            | 0        |

Вывод: по результатам проведенного моделирования и расчетов система является монотонной. Система является не точной и не подходящей по многим параметрам. Например время нарастания и время регулирования имеют слишком высокие значения. Установившаяся ошибка тоже слишком большая. Что в

совокупности приводит нас к тому, что необходимо интегрировать типовой регулятор в систему.

### 4.3 Синтез типового регулятора

При заданной математической модели объекта управления в виде передаточной функции необходимо определить параметры PID-регулятора. Формула (4.5) идеального PID-регулятора представлена ниже:

$$U(t) = K_p \left( e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4.5)$$

Для синтеза типового регулятора системы автоматического управления применим два метода настройки ПИД-регулятора: метод Циглера-Никольса (ZN1) и метод CHR (Чина-Хронеса-Ресвика). Будет выполнено строение переходных процессов по каждому из методов, с последующим выделением наилучшего регулятора сравнением полученных прямых и косвенных оценок качества переходного процесса для данной системы. Перед выполнением эмпирических методов необходимо знать  $T$ ,  $L$ ,  $k$ , где  $T$  – постоянная времени,  $L$  – время запаздывания,  $k$  – коэффициент передачи. Опираясь на рисунок 4.8 определим параметры.  $T = 10.56$  сек,  $L = 3.5$  сек,  $k = 0.15$ .

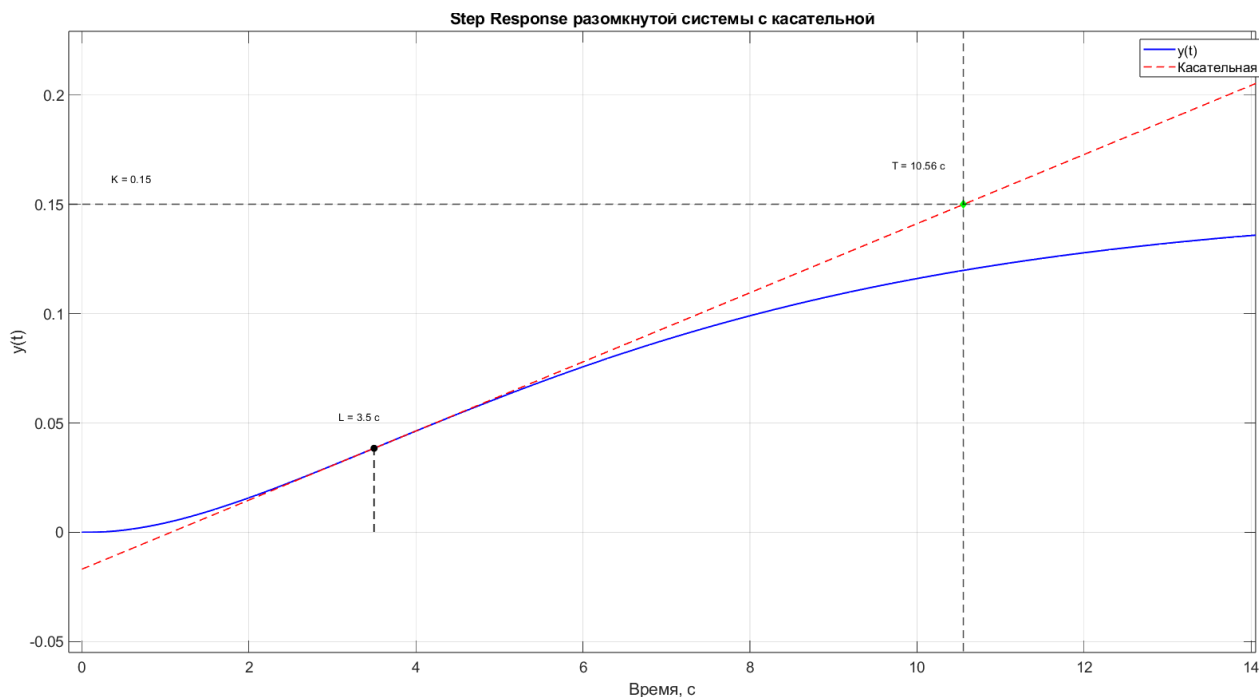


Рисунок 4.8 – Определение параметров по переходному процессу

### 4.3.1 Метод Циглера-Никольса

Этот способ определения коэффициентов PID-регулятора содержит два метода - методы открытого и закрытого контура. Шаги метода открытого контура следующие:

Шаг 1. Определение реакции системы на ступенчатое воздействие. У системы вводится ступенчатое единичное воздействие для обнаружения реакции переходного процесса. Шаг 2. Построение касательной, определение характеристик - время задержки, время переходного процесса и коэффициент передачи. Шаг 3. Расчет параметров регулятора на основе эмпирических формул.

Метод закрытого контура содержит всего 2 шага:

1. На осциллограмме исследуемой системы имеется Р-регулятор, коэффициент которого увеличивается, пока система не начнет колебаться с заданной амплитудой и частотой, чтобы найти коэффициенты критического усиления и период колебаний. 2. По полученным коэффициентам определяются параметры регулятора. Так как коэффициенты уже известны полагаемся на метод открытого контура.

Мы будем использовать метод открытого контура, так как получили характеристики по касательной, для исследования построим схему, изображенную на рисунке 4.9.

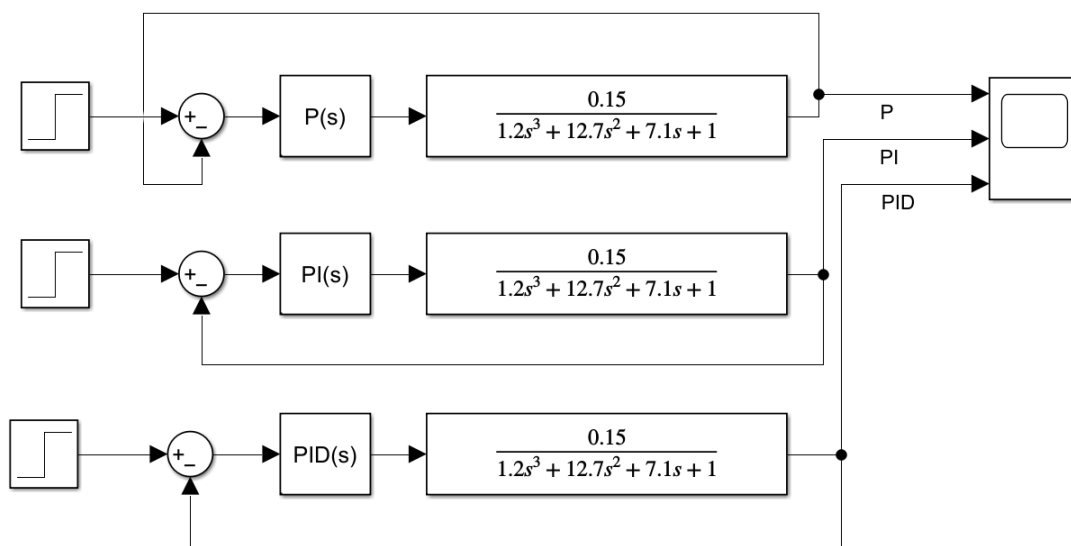


Рисунок 4.9 – Схема моделирования системы с P, PI, PID звеньями

Вычислим параметры PID-регулятора на основе эмпирических формул и занесем в таблицу 4.2

Таблица 4.2 – Вычисление параметров регулятора по ZN1

| Тип регулятора | $K_p$                        | $T_I=1/I$                                                      | $K_d$       |
|----------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------|
| P              | $\frac{T}{kL} = 20.11$       | -                                                              | -           |
| PI             | $0.9 * \frac{T}{kL} = 18.1$  | $T_I = \frac{L}{0.3} = 11.66$<br>$K_I = \frac{1}{T_I} = 0.086$ | -           |
| PID            | $1.2 * \frac{T}{kL} = 24.13$ | $T_I = 2L = 7$<br>$K_I = \frac{1}{T_I} = 0.143$                | $0.5L=1.75$ |

Подставляем полученные коэффициенты в P, PI, PID-регуляторы для получения переходных процессов. Полученные переходные характеристики представлены на рисунке 4.10.

Исходя из рисунка для дальнейшего анализа будет использован PID-регулятор, так как в сравнении с другими у него меньше время нарастания и по причине меньшей из всех установившейся ошибки. На основе полученных коэффициентов закон управления PID-регулятором методом Циглера-Никольса имеет вид:

$$U(t) = 24.13 \left( e(t) + 0.143 \int_0^t e(t)dt + 1.75 \frac{de(t)}{dt} \right)$$

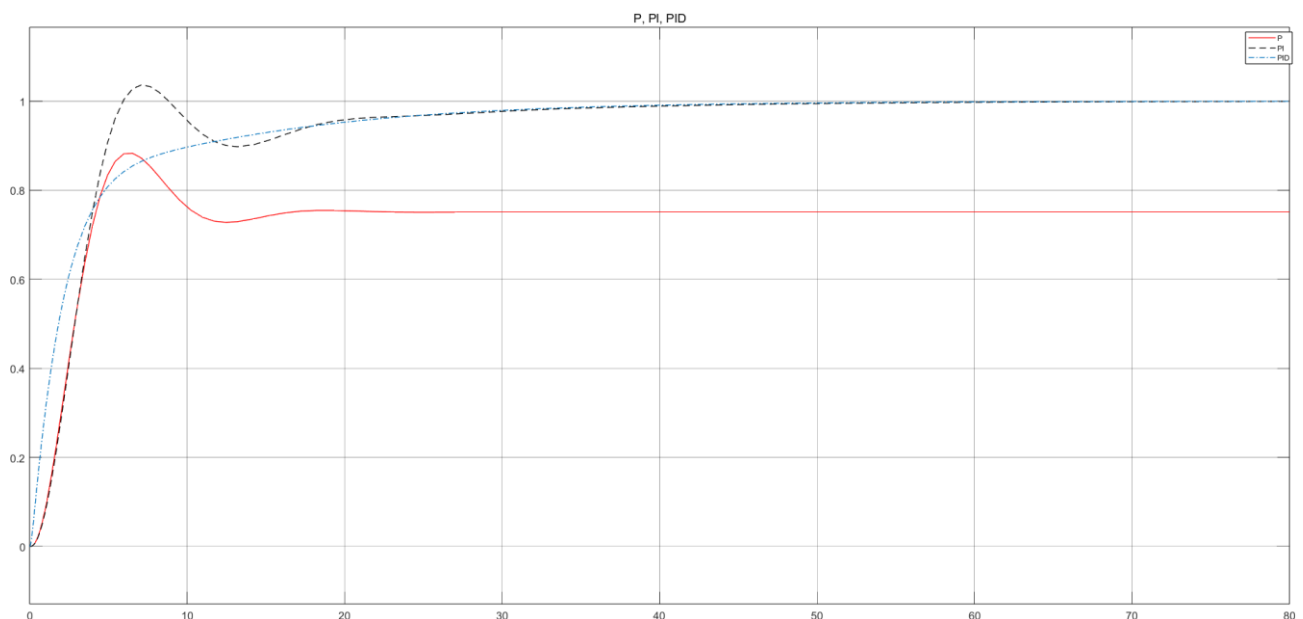


Рисунок 4.10 – Переходные процессы системы с разными регуляторами

При помощи Linear Analysis получим оценки качества системы с PID регулятором, представлено на рисунке 4.11.

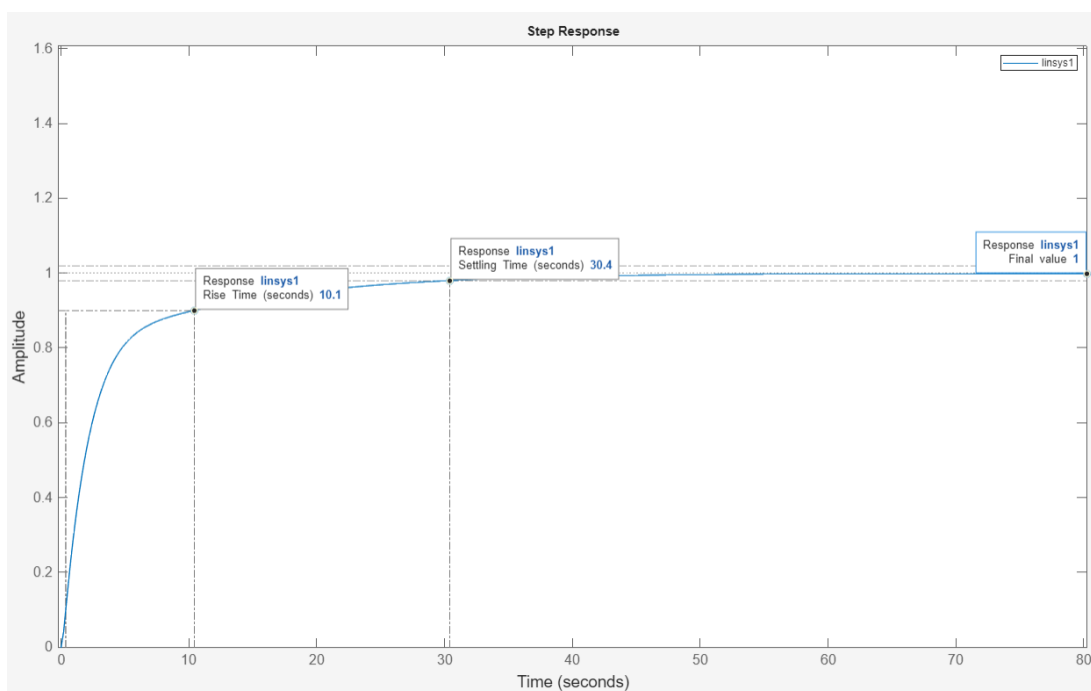


Рисунок 4.11– Переходная характеристика системы с показателями качества

Метод Циглера-Никольса даёт параметры, далёкие от оптимальных. Это объясняется не только упрощённостью самого метода (он использует только 2 параметра для описания объекта), но и тем, что параметры регулятора в этом методе определялись Циглером и Никольсом, исходя из требования к декременту затухания, равному 4.

Метод Циглера-Никольса никак не учитывает требования к запасу устойчивости системы, что является вторым его недостатком. Получим запасы устойчивости системы с PID регулятором, настроенным по методу Циглера-Никольса. Полученные запасы устойчивости по амплитуде и фазе представлены на рисунке 4.12.

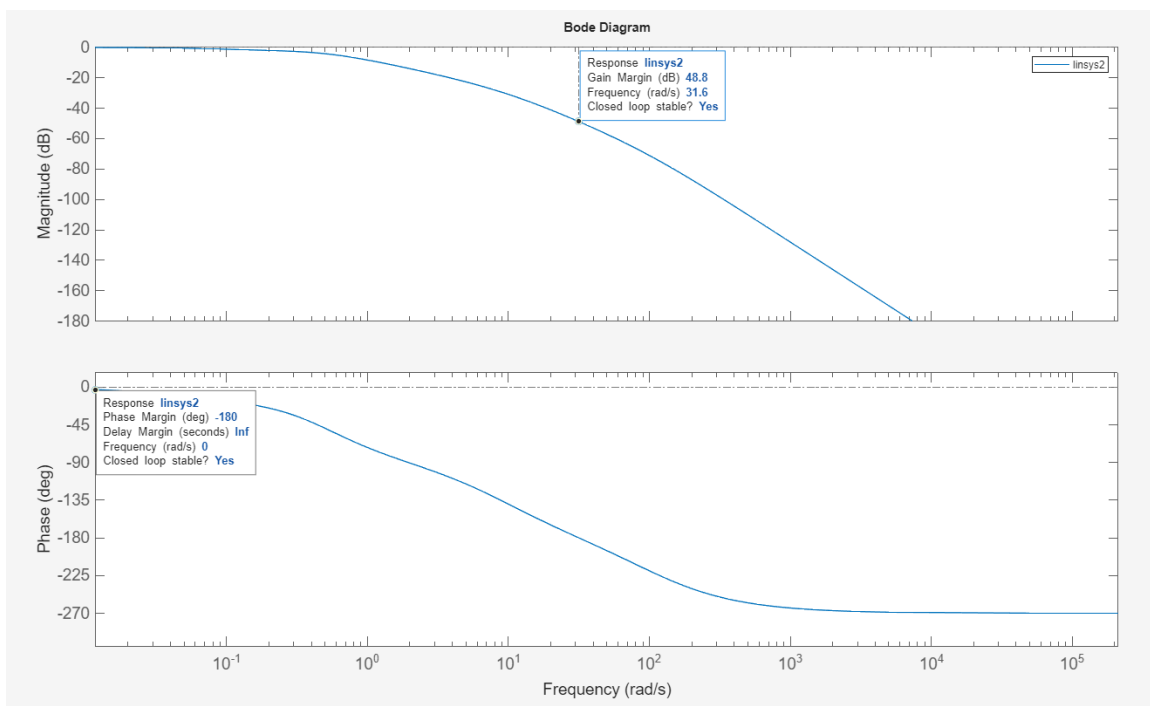


Рисунок 4.12 – Запасы устойчивости ЗСАР с PID по ZN1

#### 4.3.2 Метод Чина-Хронеса-Ресвика (CHR)

Данный метод отлично подходит для систем с монотонным процессом или для систем с наличием перерегулирования не больше 20 процентов. Данный критерий позволяет получить запас устойчивости больше, чем в предыдущем методе. Расчет коэффициентов происходит при помощи эмпирических формул.

Рассчитанные коэффициенты регулятора записаны в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Коэффициенты регулятора методом CHR

| Тип регулятора | $K_P$                        | $K_I$                                              | $K_d$        |
|----------------|------------------------------|----------------------------------------------------|--------------|
| P              | $0.3 \frac{T}{kL} = 6$       | -                                                  | -            |
| PI             | $0.6 * \frac{T}{kL} = 12$    | $T_I = 4L = 14$<br>$K_I = \frac{1}{T_I} = 0.07$    | -            |
| PID            | $0.95 * \frac{T}{kL} = 19.1$ | $T_I = 2.4L = 8.4$<br>$K_I = \frac{1}{T_I} = 0.12$ | $0.42L=1.47$ |

Рассчитанные параметры вставляем в регуляторы для получения переходных процессов, которые представлены на рисунке 4.13.

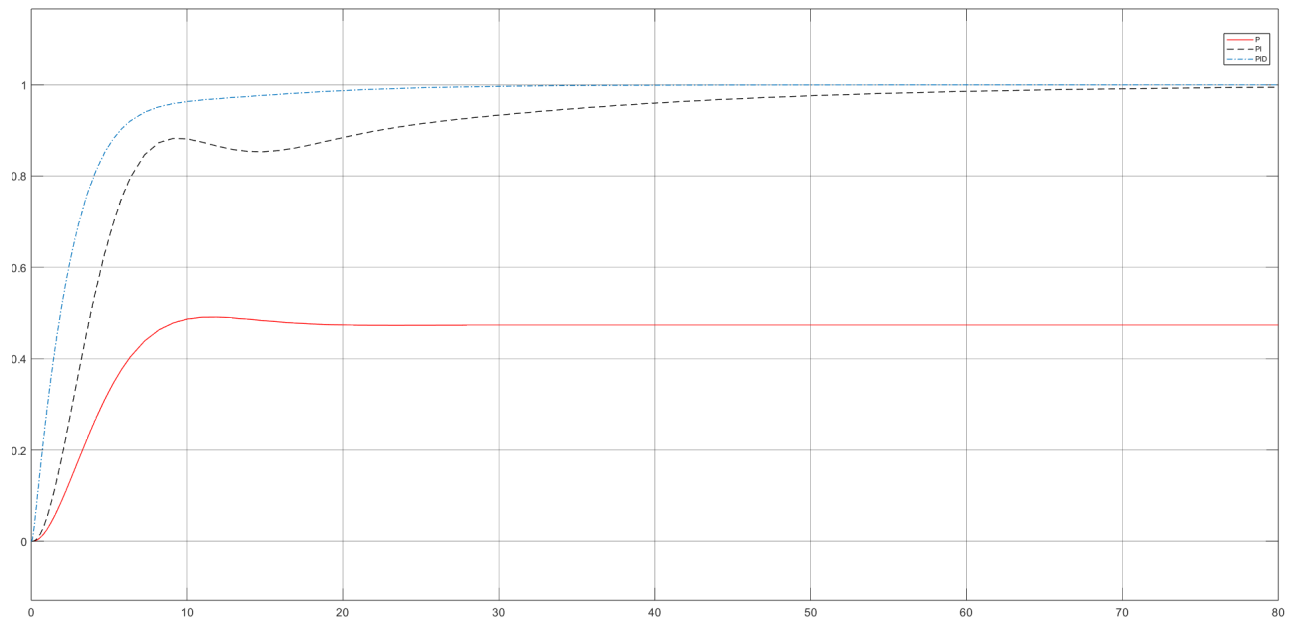


Рисунок 4.13 – Переходные процессы системы с P, PI, PID регуляторами

Исходя из рисунка 4.13 для дальнейшего анализа будет использован PID регулятор. На основе рассчитанных параметров  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$  закон управления имеет вид:

$$U(t) = 19.1(e(t) + 0.12 \int_0^t e(t)dt + 1.47 \frac{de(t)}{dt})$$

Проведем оценку прямых качеств системы, используем для этого Linear Analyzer. Полученный результат изображен на рисунке 4.14.

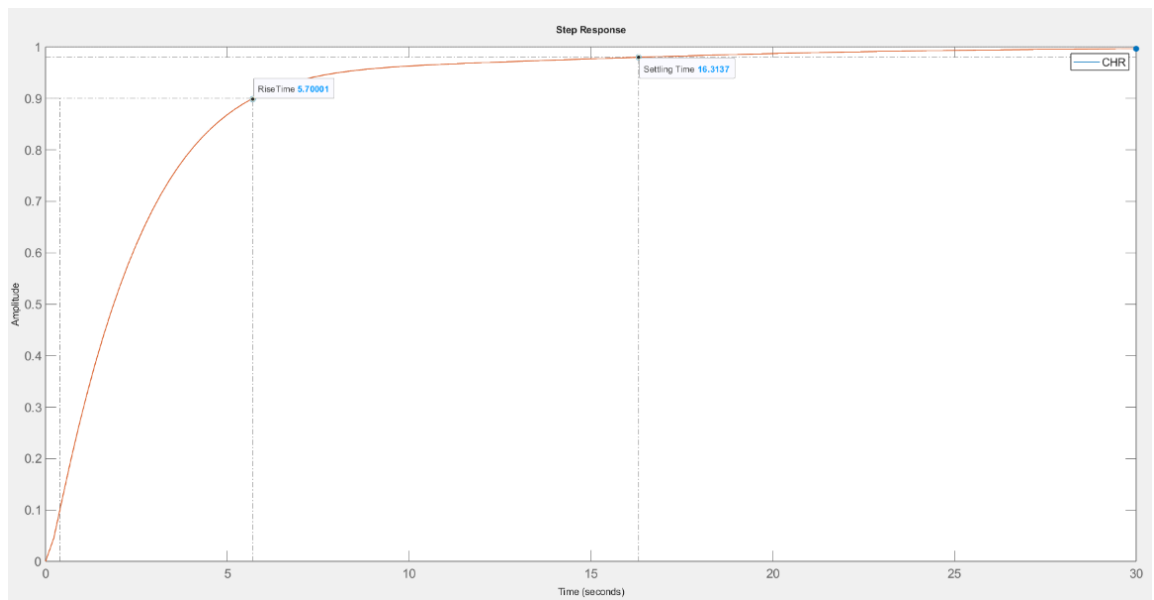


Рисунок 4.14 – Переходная характеристика системы с показателями качества

Получим запасы устойчивости системы с PID регулятором, настроенным по методу CHR и изобразим на рисунке 4.15.

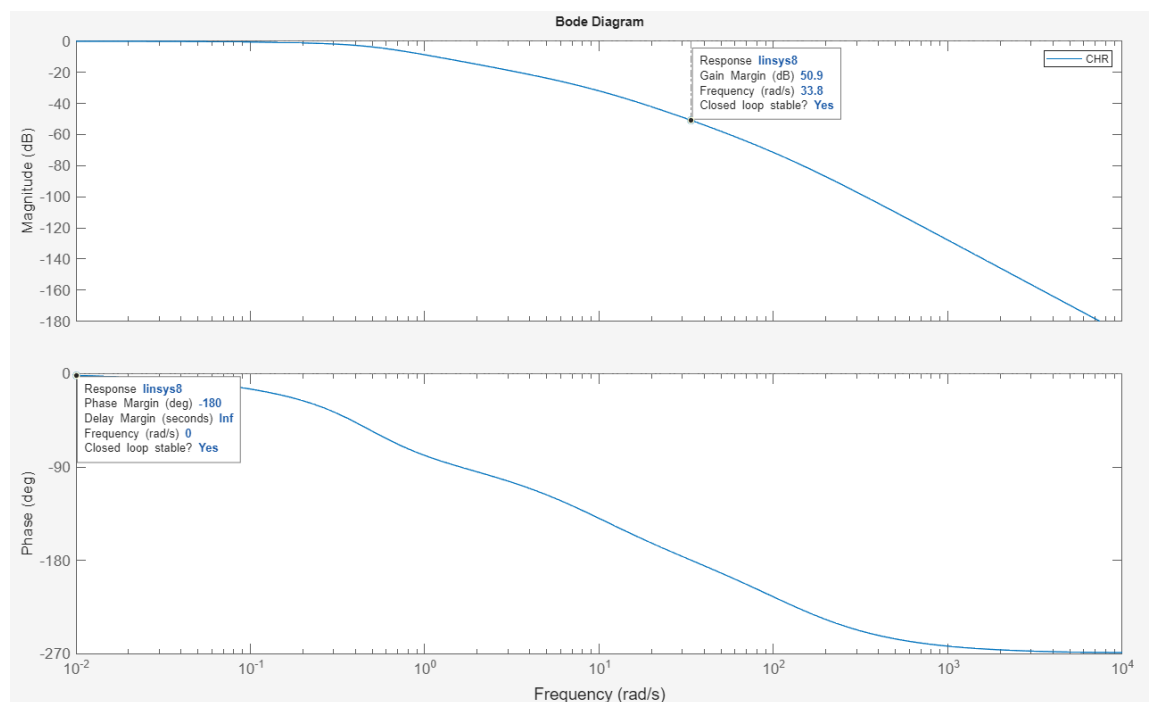


Рисунок 4.15 – Запасы устойчивости ЗСАР с PID по CHR

### 4.3 Выбор эмпирического метода

Изобразим сравнительный анализ качеств переходных процессов системы с PID-регулятором, настроенном по методу ZN1, и системы с PID-регулятором, настроенным по методу CHR, на рисунке 4.16

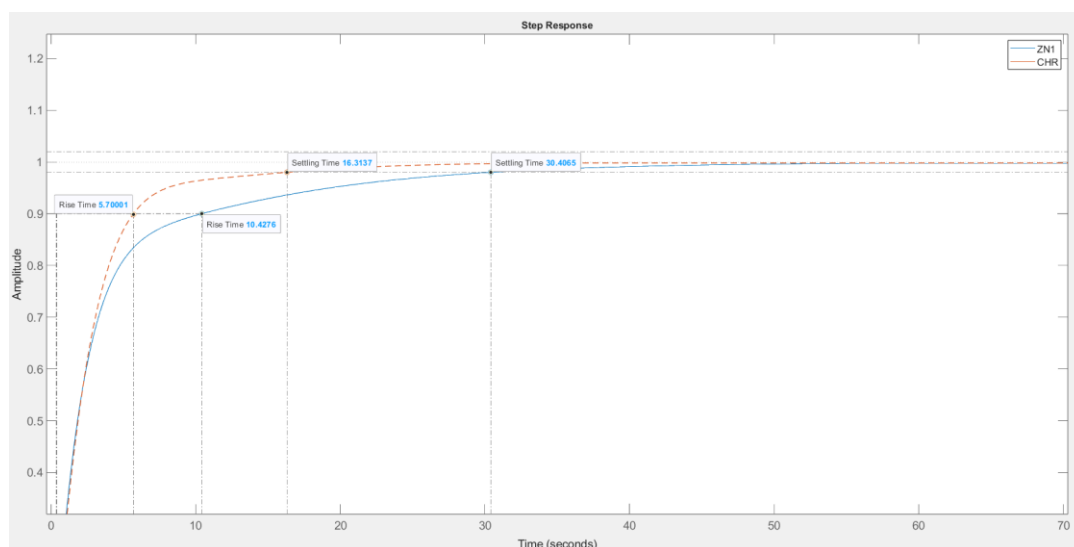


Рисунок 4.16 – Сравнение систем с PID регуляторами по разным методам

После построения переходных характеристик проведём вычисление как прямых, так и косвенных оценок по каждому эмпирическому методу и представим полученные результаты в таблицах 4.4 и 4.5.

Таблица 4.4 – Прямые оценки качества системы при разных методах настройки PID регулятора

| № | Прямые оценки качества | Система без регулятора | Метод ZN1 | Метод CHR |
|---|------------------------|------------------------|-----------|-----------|
| 1 | $T_{set}$              | 16.7 сек               | 30.4 сек  | 16.31 сек |
| 2 | $Pov$                  | 0%                     | 0%        | 0%        |
| 3 | $M$                    | 0                      | 0         | 0         |
| 4 | $\mu$                  | —                      | —         | —         |
| 5 | $wosc$                 | —                      | —         | —         |
| 6 | $ess$                  | 0.8696                 | 0         | 0         |
| 7 | $T_R$                  | 9.91 сек               | 10.42 сек | 5.7 сек   |
| 8 | $\lambda$              | —                      | —         | —         |

Таблица 4.5 – Косвенные оценки качества системы разных методах настройки PID регулятора

| № | Косвенные оценки качества        | Метод ZN1 | Метод CHR |
|---|----------------------------------|-----------|-----------|
| 1 | Запасы устойчивости по амплитуде | 48.8      | 50.9      |
| 2 | Запасы устойчивости по фазе      | Inf       | Inf       |

Проанализировав показатели качества был сделан вывод, что PID регулятор, настроенный методом Чина-Хронеса-Ресвика имеет более предпочтительные результаты. Во-первых, при CHR наблюдается более высокий запас устойчивости по амплитуде, что гарантирует устойчивую работу контура даже при значительных флуктуациях параметров объекта или отклонениях коэффициента регулятора. Во-вторых, метод CHR обеспечивает более быстрое нарастание отклика (меньшее время подъёма), что напрямую ускоряет реакцию системы на изменение уставки и позволяет оперативнее компенсировать возмущения. Наконец, время регулирования в контуре, настроенном по CHR, оказывается короче, чем при ZN1, — это означает более раннее вхождение выхода в допустимую полосу  $\pm 2\%$  от установившегося значения и, следовательно, более жёсткую демпфированность без избыточного перерегулирования. В совокупности все эти преимущества делают CHR-настройку более предпочтительной для задачи точного и быстрого поддержания температурного режима в электрической печи.

#### 4.4 Компенсация возмущений

В первую очередь требуется вывести передаточную функцию возмущения. При подаче на систему ступенчатого сигнала её установившееся значение

определяется значением передаточной функции в точке  $s \rightarrow 0$ . Для нашей модели этот предел находится по формуле (4.6)

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{0.15}{1.2s^3 + 12.7s^2 + 7.1s + 1} = \frac{0.15}{1} = 0.15 \quad (4.6)$$

Для получения отклика, равного 10 % от установившегося уровня, амплитуда внешнего возмущения должна быть уменьшена в 10 раз, то есть умножена на 0,1. Внешнее воздействие будет иметь вид  $\frac{1}{s}$ . Амплитуду ступенчатого входа  $K$  выбирают таким образом, чтобы величина установившегося изменения выходного сигнала составила ровно 10 % от его номинального значения. Это можно осуществить по формуле (4.7):

$$K = 0.1 * 0.15 * 1 = 0.015 \quad (4.7)$$

Таким образом внешнее воздействие на систему выражается ступенчатой передаточной функцией (4.8) следующего вида:

$$G_{\text{возм}}(s) = \frac{0.015}{s} \quad (4.8)$$

Построим модель системы с учётом внешнего воздействия, заданного передаточной функцией (4.8), и получим её переходный процесс. Схема представлена на рисунке 4.17.

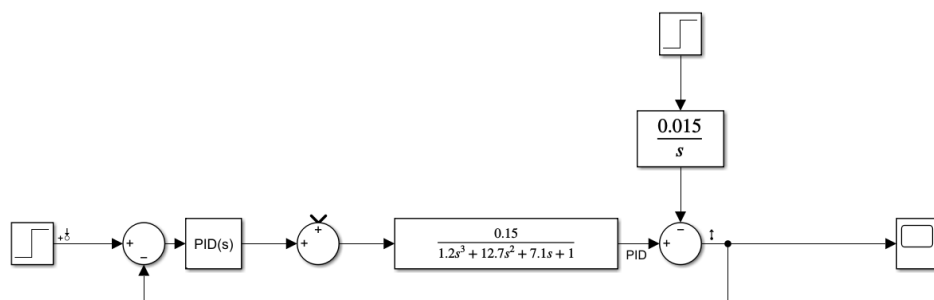


Рисунок 4.17 – Структурная схема системы с внешним возмущением

Переходной процесс системы с внешним воздействием представлен на рисунке 4.18.

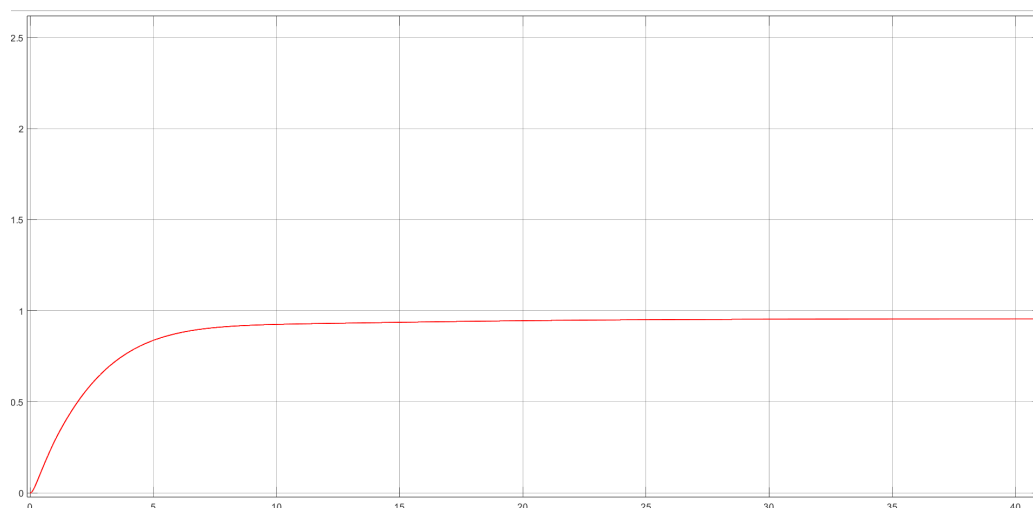


Рисунок 4.18 – Переходной процесс системы с внешним воздействием

Как видим из переходного процесса, значение отклонилось от уставки из-за созданного возмущения. Для того, чтобы устранить воздействие возмущения добавим компенсатор, в роли которого выступает PI-регулятор. Структурная схема представлена на рисунке 4.19.

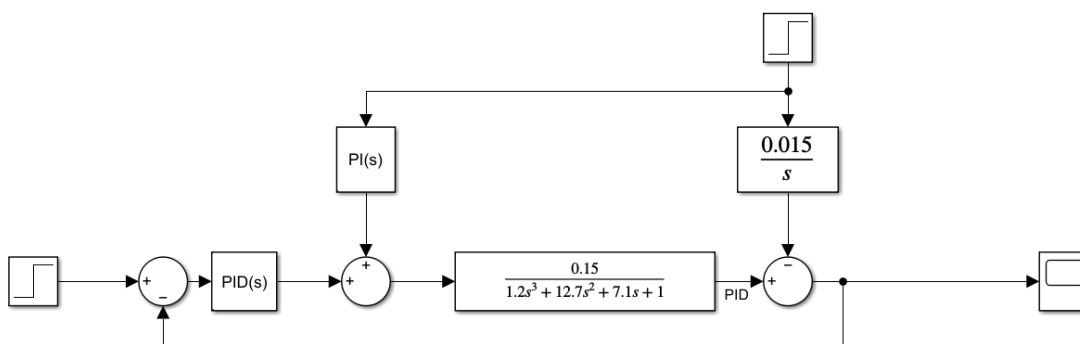


Рисунок 4.19 – Структурная схема с компенсатором

Компенсатор был настроен вручную, экспериментально. Использованные коэффициенты:  $K_p = 0.9$ .  $K_i = 0.1113$ .

Переходной процесс системы с компенсатором внешнего возмущения представлен на рисунке 4.20.

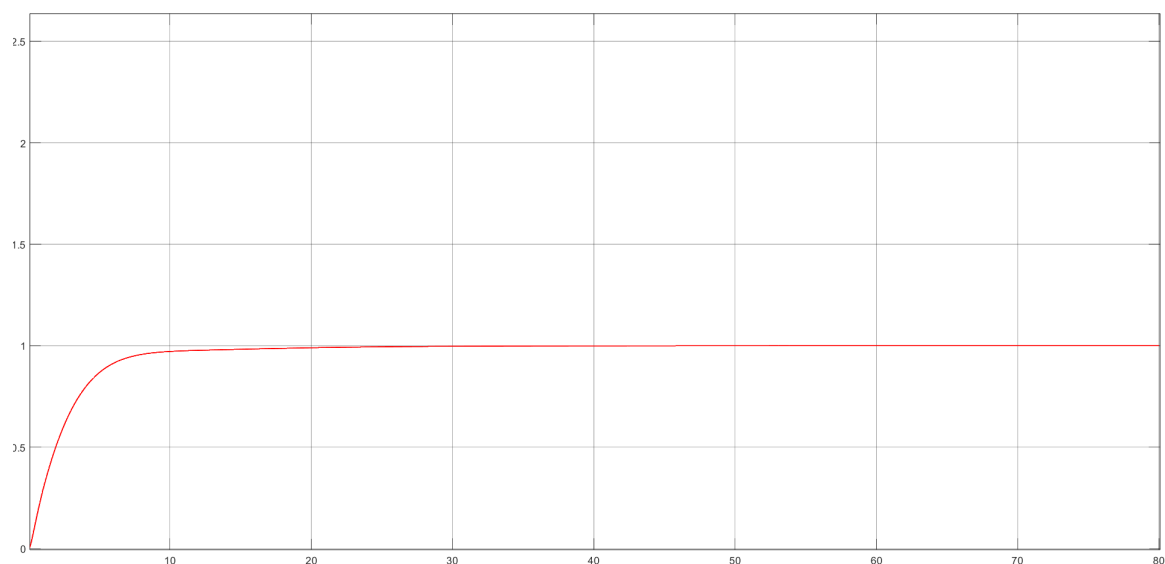


Рисунок 4.20 – Переходной процесс с компенсацией возмущения

## 5 Создание программы управления

### 5.1 Разработка алгоритма

Алгоритм разрабатывался для управления температурой в камере нагрева. Алгоритм показывает зависимость температуры от напряжения, подаваемого с ПЛК на трёхфазный SRC-регулятор. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Блок-схема алгоритма

## 5.2 Разработка программы управления объектом

Для реализации алгоритма контура управления температурой в TIA-portal необходимо собрать конфигурацию контроллера (рисунок 5.2). Будет использован контроллер CPU S7-1512C-1 PN.

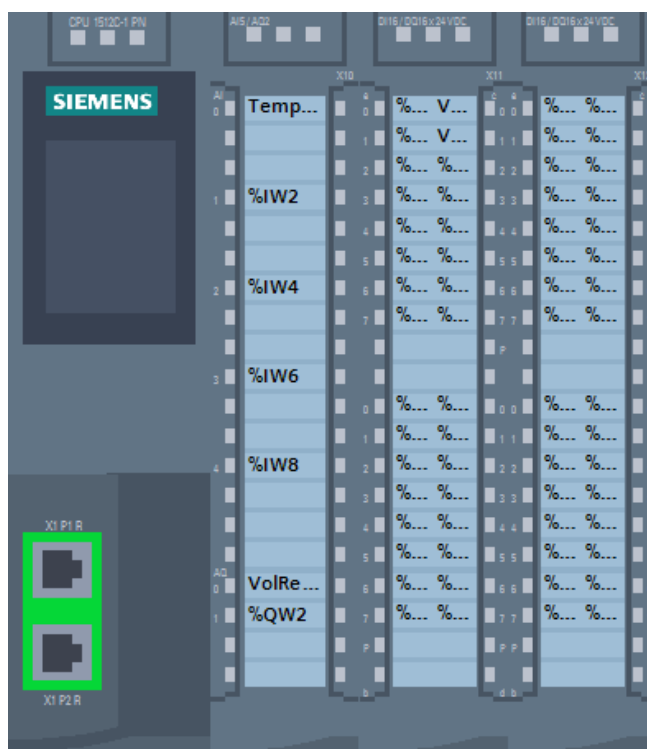


Рисунок 5.2 – Конфигурация контроллера

Таблица ПЛК символов представлена на рисунке 5.3.

|    | Name               | Tag table         | Data type | Address | Retain                   | Acces...                            | Writa...                            | Visibl...                           |
|----|--------------------|-------------------|-----------|---------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1  | Setpoint           | Default tag table | Real      | %MD0    | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 2  | VoltageR_FAULT     | Default tag table | Bool      | %Q4.0   | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 3  | Voltage REG        | Default tag table | Bool      | %Q4.1   | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 4  | VoltageR_START     | Default tag table | Bool      | %M4.2   | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5  | VoltageR_STOP      | Default tag table | Bool      | %M4.3   | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 6  | VoltageR_OVERLOAD  | Default tag table | Bool      | %M4.0   | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 7  | RESET ALARM        | Default tag table | Bool      | %M4.1   | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 8  | pid_status         | Default tag table | Int       | %MW6    | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 9  | pid_error          | Default tag table | Bool      | %M4.4   | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 10 | pid_errorBit       | Default tag table | DWord     | %MD8    | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 11 | Temperature Sensor | Default tag table | Int       | %IWO    | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 12 | VolRegulator Input | Default tag table | Int       | %QW0    | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |

Рисунок 5.3 – Таблица символов ПЛК

Был создан функциональный блок VoltageR для SCR-регулятора напряжения. Кнопка старт запускает регулятор напряжения, в зависимости от

уставки на который с ПЛК поступает управляющий сигнал 0-10V. Логика программы изображена на рисунке 5.4 [8].

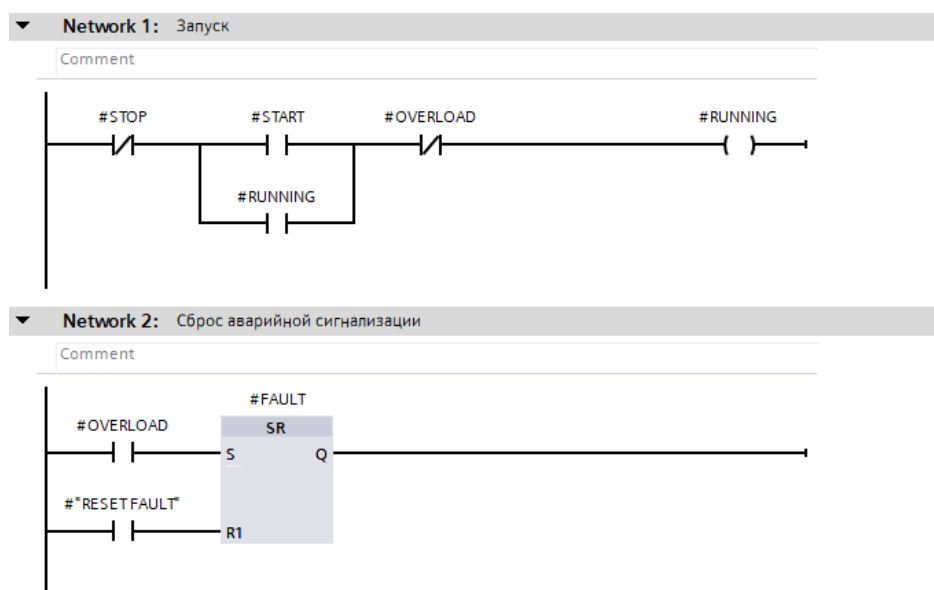


Рисунок 5.4 – Включение и сброс аварийной сигнализации

Использование данного функционального блока осуществляется его вызовом в OB1 (Рисунок 5.5). Запуск ПИД-регулятора осуществляется в отдельном блоке циклического прерывания OB30 с временем цикла 0.5мс, логика которого изображена на рисунке 5.6. В OB30 используются дополнительные символы, не указанные на рисунке 5.3, данные символы созданы в отдельном дата блоке под названием HMI Parameters DB4. Таблица символов данного блока изображена на рисунке 5.7.

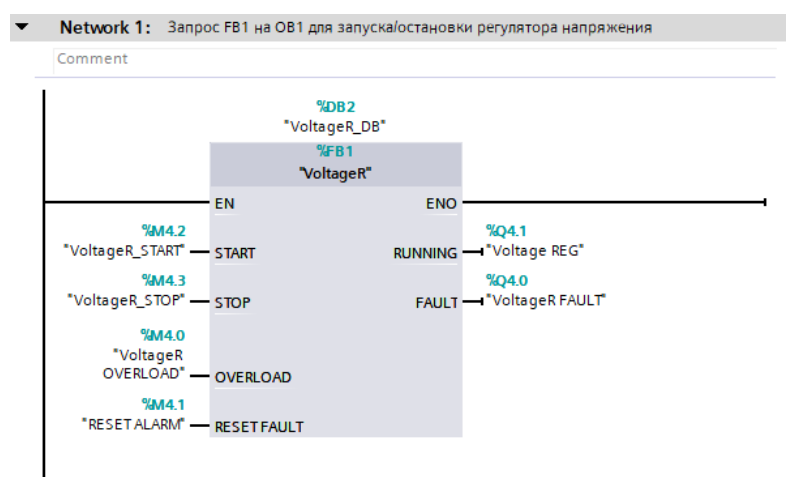


Рисунок 5.5 – Вызов функционального блока FB1 в OB1

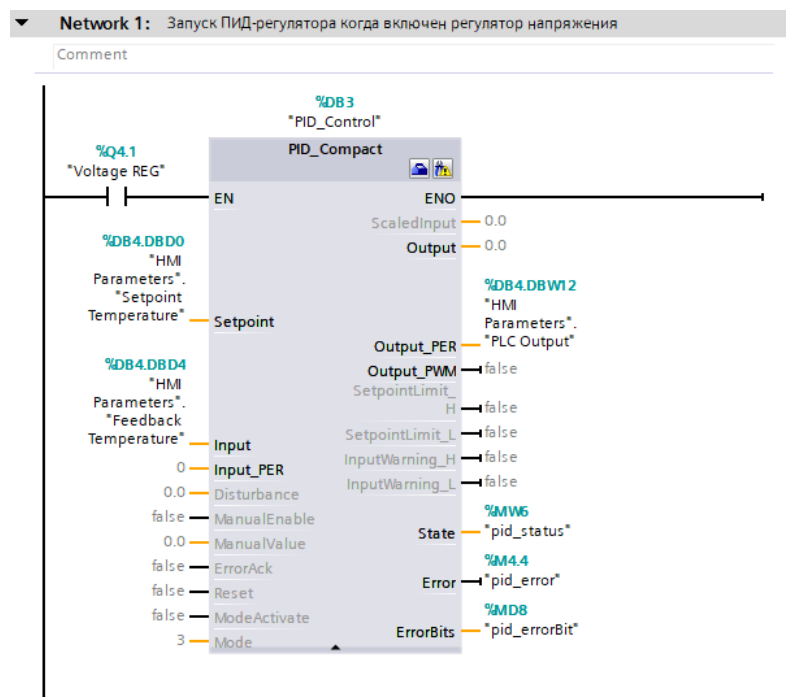


Рисунок 5.6 – Запуск ПИД-регулятора

| HMI Parameters |                      |           |        |             |                          |                                     |                                     |                                     |                          |
|----------------|----------------------|-----------|--------|-------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
|                | Name                 | Data type | Offset | Start value | Retain                   | Accessible f...                     | Writa...                            | Visible in ...                      | Setpoint                 |
| 1              | Static               |           |        |             | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |
| 2              | Setpoint Temperature | Real      | 0.0    | 0.0         | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3              | Feedback Temperature | Real      | 4.0    | 0.0         | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4              | VoltageR Feed        | Real      | 8.0    | 0.0         | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5              | PLC Output           | Int       | 12.0   | 0           | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6              | Feed Rate            | Real      | 14.0   | 5.0         | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7              | Zero Temperature     | Bool      | 18.0   | false       | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 8              | Raw Data from Sensor | Int       | 20.0   | 0           | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9              | Idle Time            | Int       | 22.0   | 2600        | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Рисунок 5.7 – Таблица символов HMI Parameters

Далее, для того чтобы создать симуляцию обратной связи создадим функциональный блок FB2. В данном блоке сначала мы усредняем управляющий сигнал, затем делим его на 1000 для получения масштабируемой поправки и суммируем с показанием датчика, получая скорректированное значение температуры для дальнейших расчётов или отображения. Изобразим работу данного блока на рисунке 5.8 и рисунке 5.9. Для данного функционального блока есть своя таблица символов, изобразим её на рисунке 5.10.

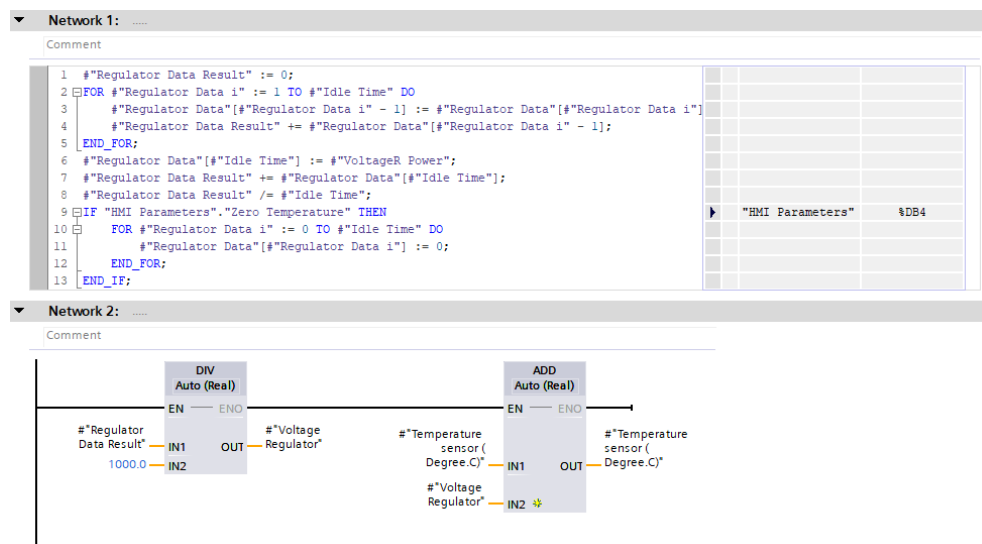


Рисунок 5.8 – Логика функционального блока FB2

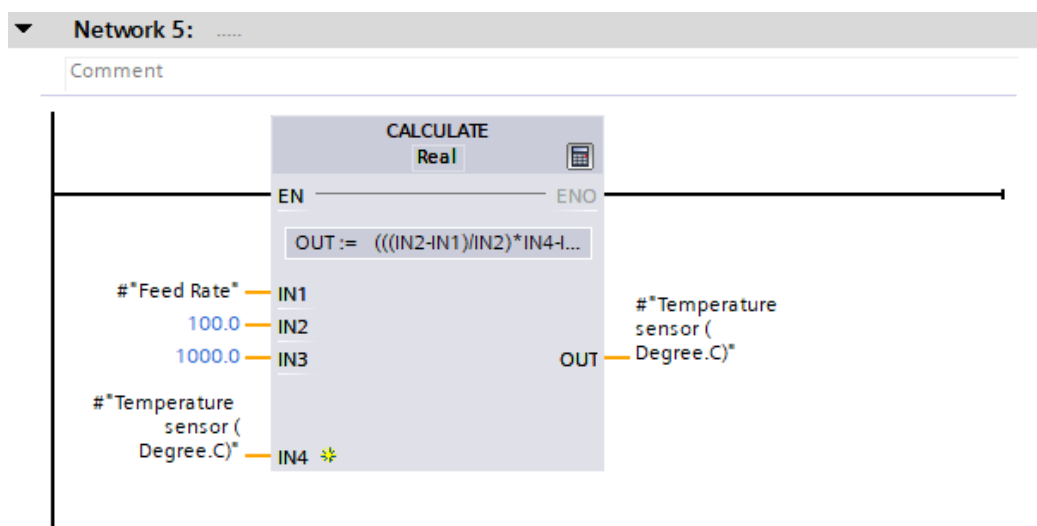


Рисунок 5.9 – Продолжение логики блока FB2

|    | Name                     | Data type          | Start value | Retain                   | Accessible f...                     | Writa...                            | Visible in ...                      | Setpoint                 |
|----|--------------------------|--------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 1  | ▼ Input                  |                    |             | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |
| 2  | Feed Rate                | Real               | 0.0         | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3  | VoltageR Power           | Real               | 0.0         | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4  | Idle Time                | Int                | 0           | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5  | Output                   |                    |             | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |
| 6  | ▼ InOut                  |                    |             | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |
| 7  | Temperature sensor (...) | Real               | 0.0         | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 8  | ▼ Static                 |                    |             | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |
| 9  | Voltage Regulator        | Real               | 0.0         | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 10 | Regulator Data           | Array[0..9999] ... |             | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 11 | Regulator Data i         | Int                | 0           | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 12 | Regulator Data Result    | Real               | 0.0         | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Рисунок 5.10 – Таблица символов DB5 блока FB2

Вызов данного функционального блока осуществляется в блоке циклического прерывания OB31 с временем цикла 1мс. Представим логику вызова блока на рисунке 5.11.

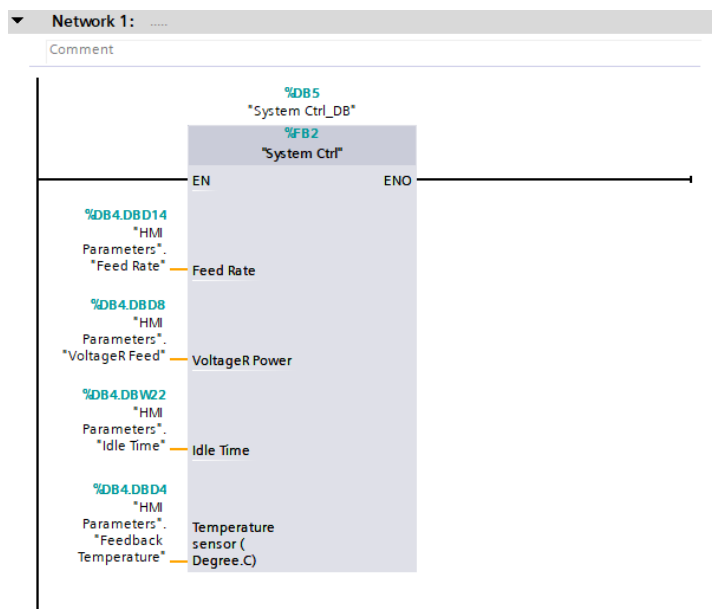


Рисунок 5.11 – Вызов блока FB2 в блоке OB31

Также были созданы FC блоки аналогового входа и выхода, преобразующие внутреннее целочисленное значение 0...32767 в вольты 0...10В и наоборот, преобразующее вольты 0...10В в сырое значение 0...27648. Логика данных блоков изображена на рисунках 5.12 и 5.13.

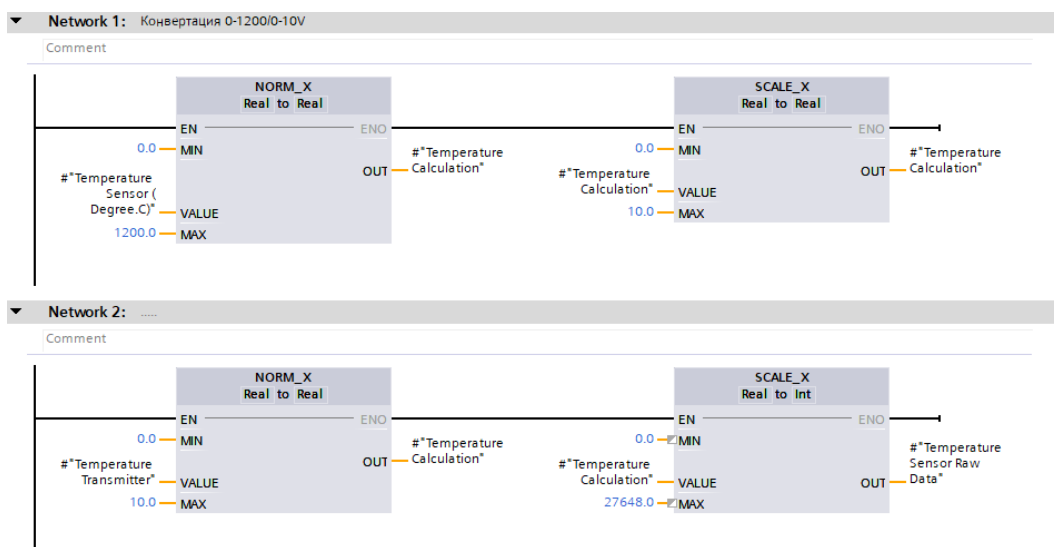


Рисунок 5.12 – FC1 блок аналогового входа

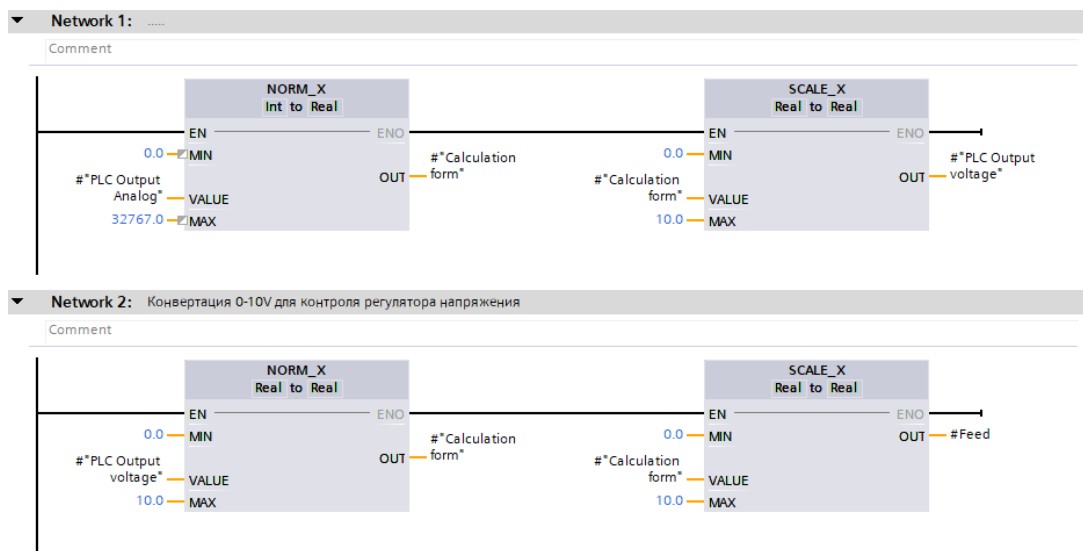


Рисунок 5.13 – FC2 блок аналогового выхода

Далее данные функции вызываются в основном блоке OB1 (Рисунок 5.14).

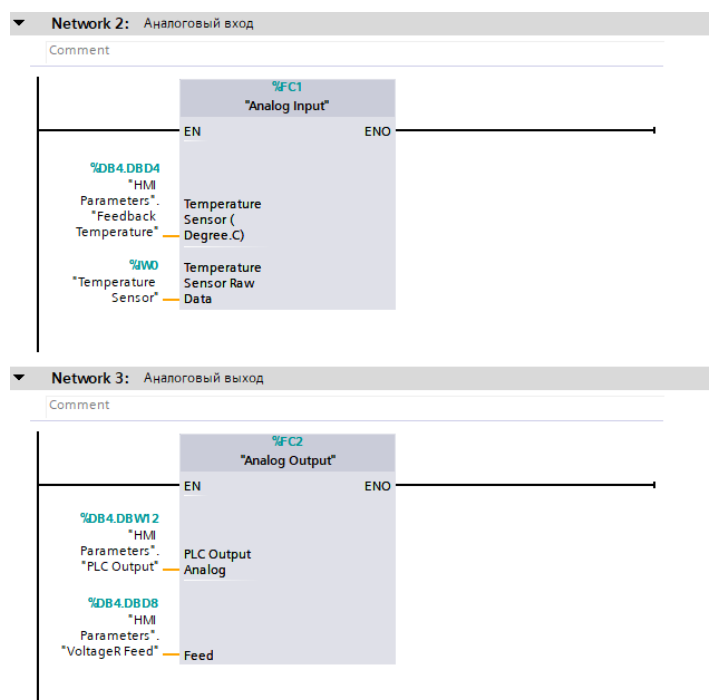


Рисунок 5.14 – Вызов FC1 и FC2 в блоке OB1

На этом программа управления завершена.

### 5.3 Разработка SCADA-системы для управления объектом

Разработаем SCADA-систему. У нас есть программная реализация, теперь необходимо создать HMI. Для этого добавим девайс WinCC Runtime Advanced для визуализации системы на ПК. Подключаем к нашему CPU 1512C-1 PN созданную станцию, используя IE. Изобразим подключение на рисунке 5.15.

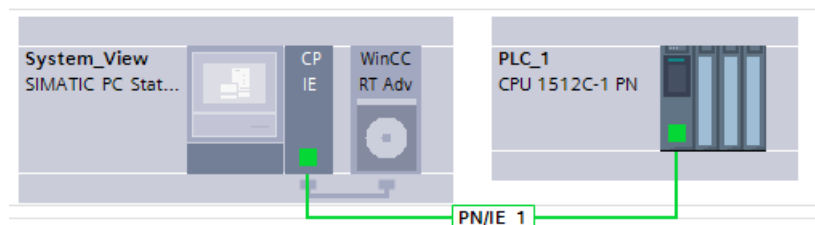


Рисунок 5.15 – Подключение CPU к WinCC RT

Следующим шагом создаем окно, назначаем его главным стартовым окном, чтобы при запуске симуляции открывалось оно. В окно добавляем необходимые символы, кнопки, поля ввода-вывода. В окне размещены следующие элементы (рисунок 5.16):

Кнопки: START – запуск. STOP – остановка. Reset Fault – сброс аварийной сигнализации. Zero Setting – сброс сигнала температуры. Тренд: показывает изменение трех параметров – уставка, температура с датчика и выходной сигнал с пид-регулятора. Шкала: отображает текущую температуру.

Поля ввода-вывода показывают такие характеристики как уставка, температура с датчика, накопительная сумма ошибок, коэффициенты усиливающего, интегрирующего и дифференцирующего звеньев [9].

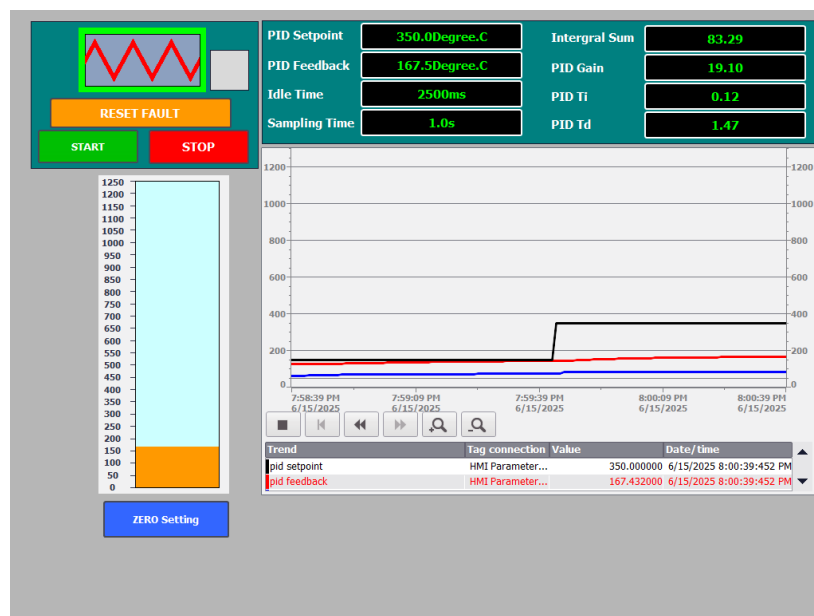


Рисунок 5.16 – Стартовое окно HMI WinCC RT Advanced

В данном окне отображаются все интересующие нас параметры, которые мы можем изменять.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения дипломной работы была разработана автоматизированная система управления температурным режимом электрической печи, обеспечивающая точное и надёжное поддержание заданных технологических параметров.

В первом разделе рассмотрены основные виды и конструктивные особенности промышленных электрических печей, их назначение и область применения.

Во втором разделе выполнен анализ требований к системе управления: определены критические точки контроля, сформулированы технические требования по точности, надёжности и безопасности, а также построена трёхуровневая архитектура АСУ (полевой, средний и верхний уровни).

В третьем разделе была построена функциональная схема автоматизации газотурбинного двигателя, а также был осуществлен подбор приборов.

В четвёртом разделе сформулирована задача синтеза контура управления температурой камеры сгорания газотурбинного двигателя на основе обратной связи. Был проведён анализ динамических свойств разомкнутой и замкнутой систем: исследована устойчивость с использованием прямого метода Ляпунова, а также выполнены прямые и косвенные оценки качества переходного процесса (время подъёма, время установления, перерегулирование). На основе полученных характеристик были сопоставлены настройки PID-регулятора по методам Циглера–Никольса и Чина–Хронеса–Ресвика. Сравнительный анализ показал, что более сбалансированные показатели по скорости реакции и запасам устойчивости обеспечивает настройка по Чину–Хронесу–Ресвику. Для компенсации остаточных возмущений был введён внешний PI-регулятор, настроенный экспериментальным (ручным) методом. Применение этого компенсатора позволило устранить постоянную ошибку.

Работа по разработке системы автоматического регулирования электрической печи была выполнена успешно. Были проделаны все необходимые этапы: от описания объекта автоматизации и требований к системе управления, до синтеза и анализа системы.

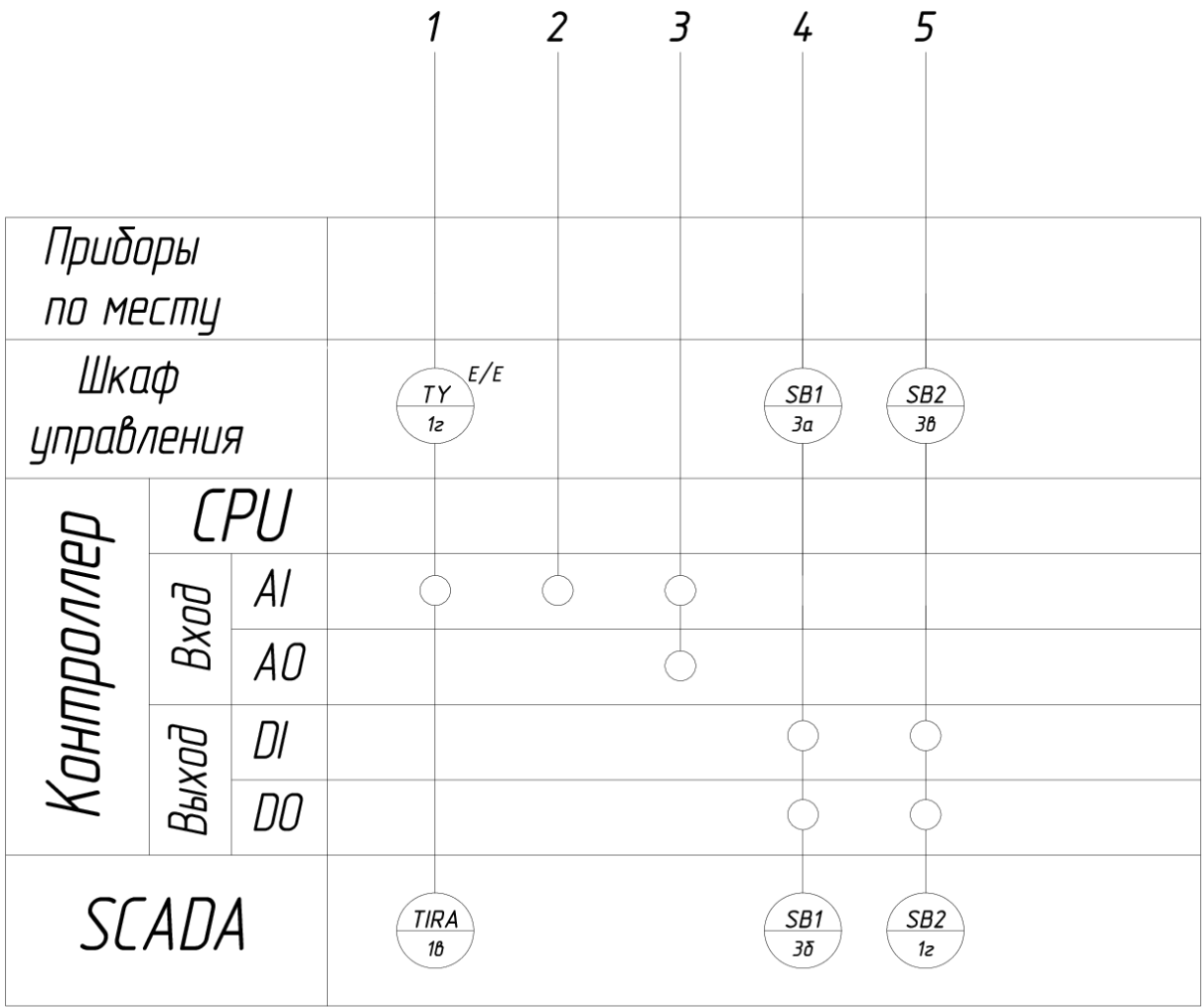
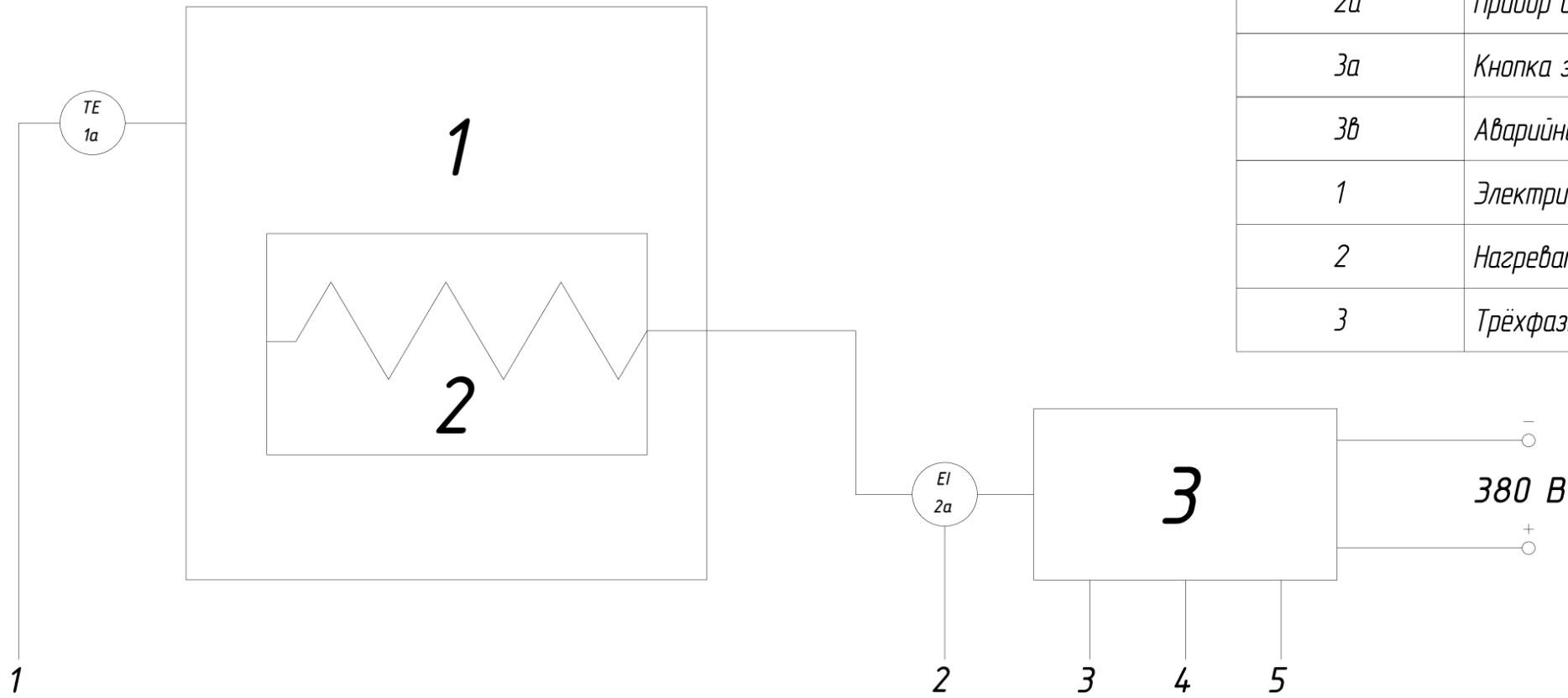
## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Губинский В.И. и др. Металлургические печи: учебное пособие / В.И. Губинский и др. – Днепропетровск: НМетАУ, 2006. – 84 с.
- 2 Ополева Г.Н. Электротехнологические установки: конспект лекций / Г.Н. Ополева. – Иркутск: ИрГУПС, 2010. – 74 с.
- 3 Kanthal AB. Global SD: Technical Manual. 04.05.2024, [https://www.kanthal.com/globalassets/kanthal-global/downloads/silicon-carbide-heating-elements-global-sd\\_b\\_eng\\_lr.pdf](https://www.kanthal.com/globalassets/kanthal-global/downloads/silicon-carbide-heating-elements-global-sd_b_eng_lr.pdf)
- 4 Lorentzzi Corp. SCR Power Controller Technical Manual. 01.06.2025, <https://lorentzzi.com/wp-content/uploads/2025/06/LTSCR-Three-Phase-SCR-Power-Regulator-User-Manual.pdf>
- 5 Siemens AG. Operating Instructions SITRANS TH200/TH300. 06.08.2015, [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/744/109480744/att\\_859830/v1/A5E00393069-04en\\_TH200TH300\\_OI\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/744/109480744/att_859830/v1/A5E00393069-04en_TH200TH300_OI_en-US.pdf)
- 6 Siemens AG. SIMATIC S7-1500 Programmable Controllers – Hardware Configuration Manual. 21.07.2017, <https://www.automation.siemens.com/sce-static/learning-training-documents/tia-portal/hw-config-s7-1500/s7-1500-manual-en.pdf>
- 7 Шустов В.А. Моделирование системы автоматического управления процессом термообработки для электрических печей сопротивления // Научная статья. – Саратов, 2022. – С. 28-29.
- 8 Siemens AG. Getting Started with SIMATIC STEP 7 Basic V10.5. 14.05.2015, [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/542/40263542/att\\_829827/v1/GS\\_STEP7Bas105enUS.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/542/40263542/att_829827/v1/GS_STEP7Bas105enUS.pdf)
- 9 Siemens AG. WinCC Unified: Visualizing processes with Unified Online Engineering. 13.11.2022, [https://support.industry.siemens.com/dl/files/308/109813308/att\\_1122197/v1/WinCC\\_VisualizingProcessesUnified\\_enUS\\_en-US.pdf](https://support.industry.siemens.com/dl/files/308/109813308/att_1122197/v1/WinCC_VisualizingProcessesUnified_enUS_en-US.pdf)

## **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

Функциональная схема автоматизации электрической печи

| Позиция | Наименование                       | Тип                 | Кол. | Примечание            |
|---------|------------------------------------|---------------------|------|-----------------------|
| 1а      | Термоэлектрический преобразователь | Pt10Rh-Pt           | 1    |                       |
| 1г      | Преобразователь сигнала            | TH300               | 1    | т. з.д.с. в 0...20 мА |
| 2а      | Прибор для измерения напряжения    |                     | 1    |                       |
| 3а      | Кнопка запуска                     |                     | 1    |                       |
| 3б      | Аварийная кнопка выключения        |                     | 1    |                       |
| 1       | Электрическая печь                 |                     | 1    |                       |
| 2       | Нагревательный элемент             | Global SD           | 1    |                       |
| 3       | Трёхфазный SCR-регулятор           | Lorentzzi LTSCR-350 | 1    |                       |



|           |              |          |       |      |                                                                                 |  |  |  |
|-----------|--------------|----------|-------|------|---------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
|           |              |          |       |      | Приложение А                                                                    |  |  |  |
|           |              |          |       |      | Разработка автоматизированной системы управления температуры электрической печи |  |  |  |
| Изм.      | Лист         | № докум. | Подп. | Дата |                                                                                 |  |  |  |
| Зав       | Каф.         |          |       |      |                                                                                 |  |  |  |
| Н. контр. | Манатов К.А. |          |       |      | Функциональная схема автоматизации электрической печи                           |  |  |  |
| Руков.    | Ширяева О.И. |          |       |      |                                                                                 |  |  |  |
| Студент   | Пичугин А.К. |          |       |      | Кафедра АИУ                                                                     |  |  |  |

## РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект студента  
Пичугина Александра Константиновича  
6B07103 – Автоматизация и роботизация

На тему: Разработка системы автоматического управления температурой печи с учётом внешних возмущений

Выполнено:

- а) презентация на 26 слайдах
- б) пояснительная записка на 52 страницах

## ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Разработка систем автоматического регулирования температуры печи имеет актуальность для оптимизации процесса, снижения затрат, повышения качества и безопасности производства, а также для улучшения управляемости процесса.

В пояснительной записке, предоставленной на рецензирование, приведены введение, 5 разделов и заключение.

В первом разделе приведен технологический процесс печи, дано описание объекта и области применения.

Во втором разделе определены точки контроля и структура АСУ ТП.

В третьем разделе разработана функциональная схема автоматизации системы управления температурой печи, а также произведен выбор оборудования.

В четвертом разделе получена математическая модель путем построения структурной схемы. На основе полученной модели показан полный анализ системы, а именно выполнена проверка на устойчивость, найдены запасы устойчивости, определены прямые и косвенные оценки качества для выявления основных требований для регулятора. В ходе синтеза регулятора были использованы эмпирические методы Чина-Хронеса-Ресвика и Циглера-Никольса. Был рассмотрен способ компенсации внешних возмущений.

В пятом разделе приведена программная реализация алгоритма управления температурой, а также программное управление на базе ПЛК Simatic S7-1500. Алгоритм управления реализован в программной среде TIA Portal.

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

Замечания:

1. Не полное представление технического задания, в соответствии с которым разработана САР.
2. Не приведено описание получения математических моделей.

## Оценка работы

Учитывая вышеизложенное, считаю, что дипломный проект заслуживает оценки «В» (45%), а студент Пичугин Александр Константинович присвоения академической степени бакалавра по специальности 6B07103 – Автоматизация и роботизация.

## Рецензент

PhD,

зав.каф. «АиУ»

АУЭС им. Т. Даукеева

Абжанова Л.К.

«  » июня 2025г.

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

На дипломный проект  
Пичугина Александра Константиновича  
6B07103 - Автоматизация и роботизация

Тема: «Разработка системы автоматического управления температурой  
печи с учётом внешних»

Перед дипломантом ставилась задача разработки автоматизированной системы управления температурой электрической печи.

В первом разделе приведен технологический процесс печи, дано описание объекта и области применения.

Второй раздел включает в себя определение точек контроля и построение структуры автоматизированной системы управления.

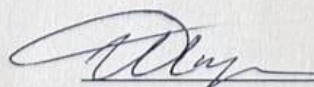
В третьем разделе разработана функциональная схема автоматизации системы управления температурой печи, а также осуществлен подбор приборов.

Четвертый раздел посвящен синтезу контура управления температуры печи. Математическая модель получена на основе известных звеньев. В ходе синтеза регулятора были использованы эмпирические методы Чина-Хронеса-Ресвика и Циглера-Никольса. На основе полученных результатов студентом был выбран регулятор, параметры которого были получены по методу Чина-Хронеса-Ресвика. В качестве компенсации внешних возмущений был использован PI-регулятор.

В пятом разделе приведена программная реализация алгоритма управления температурой в камере сгорания, а также программное управление на базе ПЛК Simatic S7-1500. Алгоритм управления реализован в программной среде TIA Portal.

**Закключение:** дипломный проект соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам по направлению подготовки 6B07103 – «Автоматизация и роботизация». Дипломант Пичугин Александр Константинович заслуживает допуска к защите.

**Научный руководитель**  
ассоциированный профессор. канд. техн. наук.

 Ширяева О.И.  
(подпись)

«5» июня 2025 г.

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Пичугин Александр Константинович

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Разработка системы автоматического управления температурой печи с учётом внешних возмущений

**Научный руководитель:** Ольга Ширяева

**Коэффициент Подобия 1:** 14.1

**Коэффициент Подобия 2:** 4.7

**Микропробелы:** 6

**Знаки из других алфавитов:** 2

**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*



проверяющий эксперт

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Пичугин Александр Константинович

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Разработка системы автоматического управления температурой печи с учётом внешних возмущений

**Научный руководитель:** Ольга Ширяева

**Коэффициент Подобия 1:** 14.1

**Коэффициент Подобия 2:** 4.7

**Микропробелы:** 6

**Знаки из здругих алфавитов:** 2

**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