

**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

Есентаев Даниил Абасевич

Разработка автоматизированной системы управления газотурбинным двигателем

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

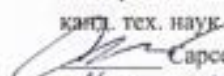
Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой АиУ

канд. тех. наук

 Сарсенбаев Н.С.
«16» 06 2025 г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к дипломному проекту

На тему: «Разработка автоматизированной системы управления газотурбинным двигателем»

6В07103 – Автоматизация и роботизация

Выполнил

Есентаев Д. А.

Рецензент

доктор PhD, доц.

 Оракбаев Е. Ж.

(подпись)

«16» 06 2025 г.

Научный руководитель

доктор PhD

 Кулакова Е. А.

(подпись)

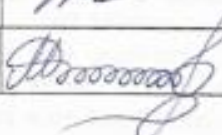
«16» 06 2025 г.

Алматы 2025

ГРАФИК
подготовки дипломного проекта

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологический раздел Технологический процесс работы газотурбинного двигателя	13.02.2025 г.	
Технологический раздел Разработка функциональной схемы автоматизации системы управления процессом	06.03.2025 г.	
Расчетный раздел Анализ и синтез систем автоматического регулирования температуры в камере сгорания	28.03.2025 г.	
Расчетный раздел Разработка логической программы управления	20.05.2025 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	28.03.25	
Расчетный раздел	Е. А. Кулакова, PhD	14.05.25	
Нормоконтролер	К. А. Манатов магистр техн. наук	05.06.2025	

Научный руководитель


подпись

Кулакова Е. А.

Задание принял к исполнению обучающийся


подпись

Есентаев Д. А.

Дата

«31» 06.2025 г.

АҢДАТПА

Бұл дипломдық жобада Siemens SGT-100 газ турбины қозғалтқышына арналған басқарудың автоматтандырылған жүйесі әзірленді. Жоба бес бөлімнен тұрады.

Жүйені жобалау барысында автоматтандырылған басқару жүйесінің құрылымы анықталды, функционалдық схемасы жасалды, сондай-ақ заманауи бақылау және басқару құралдары қолданылып, аппараттық база таңдалды. Басқару алгоритмі TIA Portal бағдарламалық ортасында іске асырылып, HMI арқылы визуализацияланды. Жүйенің негізі ретінде SIMATIC S7-1500.

Газ турбины қозғалтқыштың жану камерасындағы температураны реттеу жүйесіне талдау жүргізіліп, математикалық модель System Identification Toolbox көмегімен алынған. Жүйенің тұрақтылығы Ляпуновтың бірінші әдісімен бағаланды, ал PID-регулятордың параметрлері Циглер–Никольс әдісімен есептелді.

АННОТАЦИЯ

В данном дипломном проекте разработана автоматизированная система управления для газотурбинного двигателя Siemens SGT-100. Проект включает пять структурных разделов.

Разработка охватывает формирование архитектуры автоматизированной системы управления технологическим процессом, построение функциональной схемы, выбор аппаратной платформы с использованием современных средств контроля и управления. Алгоритм управления реализован в среде TIA Portal с последующей визуализацией на панели HMI. Аппаратной основой выбран контроллер SIMATIC S7-1500.

Проведён анализ системы регулирования температуры в камере сгорания. Для построения математической модели применён инструмент System Identification Toolbox в среде MATLAB. Устойчивость исследовалась методом Ляпунова, параметры PID-регулятора определены с использованием метода Циглера–Никольса.

ANNOTATION

This graduation project presents the development of an automated control system for the Siemens SGT-100 gas turbine engine. The work consists of five main sections.

The project includes the definition of the automated process control system architecture, development of a functional automation scheme, and selection of hardware components using modern monitoring and control devices. The control algorithm is implemented in the TIA Portal software environment with HMI-based visualization. The core of the system is the SIMATIC S7-1500 controller.

The temperature control system in the combustion chamber has been analyzed. The mathematical model was obtained using the System Identification Toolbox. System stability was evaluated using the first Lyapunov method, while PID controller parameters were tuned using the Ziegler–Nichols method.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Технологическая часть	9
1.1 Описание газотурбинного двигателя	9
1.2 Области применения газотурбинного двигателя	10
1.3 Описание выбранного объекта автоматизации	12
2 Разработка структурной схемы системы автоматического управления	15
2.1 Определение контрольных точек	15
2.2 Определение структуры автоматизированной системы управления технологическим процессом	16
3 Разработка функциональной схемы автоматизации системы управления газотурбинным двигателем	18
3.1 Построение функциональной схемы автоматизации	18
3.2 Выбор оборудования	19
4 Расчетная часть	29
4.1 Постановка задачи для синтеза контура управления	29
4.2 Построение передаточной функции	30
4.3 Анализ динамических свойств системы	32
4.4 Синтез типового регулятора	41
5 Создание программы управления	48
5.1 Разработка алгоритма для программы управления	48
5.2 Разработка программы управления расходом топлива в газотурбинном двигателе в ТИА-портал	49
5.3 Разработка визуализации работы газотурбинной установки с использованием панели оператора НМІ	52
Заключение	54
Список использованной литературы	55
Приложение А	56

ВВЕДЕНИЕ

В условиях стремительного развития промышленности ключевым направлением становится повышение эффективности, надёжности и безопасности технологического оборудования. Газотурбинный двигатель, играющий центральную роль в энергетических, нефтегазовых и транспортных системах, требует комплексного и интеллектуального подхода к управлению, позволяющего обеспечить его устойчивую и оптимальную работу в различных эксплуатационных режимах.

Автоматизированные системы управления газотурбинными установками сегодня являются важнейшим элементом технологической инфраструктуры. Их основная задача заключается в обеспечении стабильной работы двигателя при минимальных энергетических и эксплуатационных затратах, а также в увеличении ресурса оборудования за счёт интеллектуального контроля процессов. Ключевым научно-техническим вызовом остаётся разработка алгоритмов, способных адаптироваться к изменяющимся условиям внешней и внутренней среды и функционировать в реальном времени. Это требует применения современных вычислительных платформ с высокой скоростью обработки сигналов и надёжными средствами передачи данных.

Цель дипломного проекта состоит в разработке автоматизированной системы управления процессом работы газотурбинного двигателя, включая выбор оборудования, реализацию управляющих алгоритмов и визуализацию параметров через HMI-интерфейс, а также обеспечение надёжной и энергоэффективной эксплуатации двигателя, снижение вероятности отказов и повышение точности регулирования.

Актуальность темы исследования определяется широкой областью применения газотурбинных установок в промышленности, где предъявляются высокие требования к эксплуатационной надёжности, стабильности рабочих режимов и энергоэффективности. Современные достижения в области автоматизации позволяют значительно улучшить параметры управления, сократить влияние человеческого фактора, снизить энергозатраты и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Общая характеристика проекта включает описание газотурбинного двигателя Siemens SGT-100 как объекта автоматизации, анализ его рабочих режимов и параметров. Был осуществлён подбор аппаратной базы для управления газотурбинным двигателем. Была построена математическая модель двигателя в виде передаточной функции с использованием инструмента System Identification Toolbox в среде MATLAB. Устойчивость полученной модели проверялась с использованием первого метода Ляпунова. Далее был осуществлён синтез регулятора по методу Циглера–Никольса и проведена настройка параметров системы управления, также реализован алгоритм управления газотурбинным двигателем в среде TIA Portal. Для отображения текущих параметров работы и повышения удобства взаимодействия с системой была реализована визуализация на базе HMI.

В рамках проекта решались следующие задачи: анализ системы автоматического регулирования температуры в камере сгорания газотурбинного двигателя; построение математической модели объекта управления; выполнение синтеза типового регулятора и его настройка для достижения качественных переходных процессов; разработка алгоритма управления с учётом характеристик выбранного оборудования; реализация визуализации параметров системы в среде НМІ, а также обоснованный подбор аппаратной части системы управления.

1 Технологическая часть

1.1 Описание газотурбинного двигателя

Газотурбинный двигатель представляет собой разновидность тепловой машины внутреннего сгорания, обладающей высокой энергетической эффективностью и значительной удельной мощностью при компактных конструктивных размерах. За счёт этих свойств подобные установки широко применяются в энергетике, авиации, транспортной сфере и различных промышленных отраслях, где необходим надёжный источник механической энергии [1].

Функционирование двигателя основано на преобразовании энергии, выделяемой в процессе сжигания топлива в камере сгорания, в механическую работу, осуществляемую за счёт вращения турбины и жёстко сопряжённых с ней элементов конструкции.

Рабочий цикл такой установки можно условно разделить на четыре последовательных этапа: забор воздуха из окружающей среды, его сжатие, последующее сгорание топливовоздушной смеси и расширение полученных продуктов сгорания. Эти процессы реализуются в отдельных функциональных узлах, последовательно соединённых между собой.

На первом этапе атмосферный воздух поступает через входное устройство и направляется в компрессор. Компрессор выполняет функцию увеличения давления и температуры воздушного потока, что необходимо для эффективного воспламенения и стабильного горения топлива на следующей стадии.

Сжатый воздух подаётся в камеру сгорания, где смешивается с подаваемым топливом. Полученная горючая смесь воспламеняется, в результате чего образуются горячие газы, обладающие высоким давлением и температурой. Эти газы устремляются в сторону турбины, приводя её в движение.

Газовый поток, воздействуя на рабочие лопатки турбинного блока, передаёт им свою кинетическую энергию. Турбина приводит во вращение вал, механически соединённый с компрессором и выходным механизмом. После выполнения работы продукты сгорания выбрасываются в окружающую среду через сопловое устройство. В авиационных установках это обеспечивает создание реактивной тяги, а в стационарных — обеспечивает передачу крутящего момента к исполнительным механизмам.

Конструкция газотурбинного двигателя включает в себя несколько основных компонентов, неизменных вне зависимости от сферы применения. К ним относятся входное устройство, компрессорный модуль, камера сгорания, турбинный блок, сопло и приводной вал. Все элементы располагаются в строго определённой технологической последовательности и выполняют чётко заданные функции [2].

Входной тракт необходим для обеспечения стабильного поступления воздуха, снижения аэродинамического сопротивления и предотвращения попадания загрязнений внутрь конструкции. Это особенно важно при

эксплуатации двигателя в условиях повышенной запылённости.

Компрессор выполняет сжатие поступающего воздуха. В зависимости от конструкции он может быть осевого или центробежного типа. Осевой компрессор направляет воздух вдоль продольной оси установки и обеспечивает высокую степень сжатия при увеличенной длине агрегата. Центробежный тип компрессора осуществляет сжатие за счёт отклонения воздушного потока под действием центробежных сил, возникающих при вращении рабочих колёс.

Камера сгорания представляет собой участок, в котором осуществляется тепловой процесс. Здесь происходит равномерное смешение воздуха с топливом, воспламенение и устойчивое сгорание. При этом конструкция камеры должна обеспечивать устойчивую работу при высоких температурах и давлениях, а также способствовать снижению выбросов вредных веществ.

Турбина служит для преобразования тепловой энергии в механическую. Она состоит из нескольких ступеней, каждая из которых включает неподвижные направляющие элементы и подвижные рабочие лопатки. Направляющие аппараты формируют оптимальное направление движения газового потока, а лопатки воспринимают его энергию, обеспечивая вращение ротора.

Сопло завершает тракт двигателя и преобразует остаточное давление газов в кинетическую энергию, формируя реактивную струю в соответствии с третьим законом классической механики. Для повышения эффективности создаваемой тяги в конструкции предусматривается сужение соплового канала.

Кроме основного набора компонентов, газотурбинная установка включает в себя большое количество вспомогательных систем: от топливоподдачи и смазки до систем автоматического регулирования и управления. Конкретное исполнение установки определяется условиями эксплуатации, техническими характеристиками и предъявляемыми требованиями к надёжности и эффективности.

1.2 Области применения газотурбинного двигателя

Газотурбинные силовые установки обладают высоким уровнем универсальности, надёжности и удельной энергетической мощности, благодаря чему находят обширное применение в различных отраслях промышленности и транспортной сфере. Одним из ключевых направлений их использования является производство электроэнергии. На объектах теплоэнергетики, а также на промышленных предприятиях подобные установки функционируют как основные, резервные либо пиковые источники генерирования энергии. Их высокая динамическая приспособляемость позволяет оперативно реагировать на колебания потребления, обеспечивая устойчивость и гибкость энергоснабжения.

Особого внимания заслуживает возможность одновременного производства электрической и тепловой энергии в рамках единого технологического цикла. Такой подход, известный как комбинированная

энергетическая генерация, позволяет существенно повысить общий коэффициент полезного действия установки, свести к минимуму потери тепловой энергии и снизить расход топлива, тем самым увеличив общую экономическую и экологическую эффективность энергетического объекта.

Помимо функции генерации энергии, газотурбинные двигатели применяются в качестве привода различных механизмов и агрегатов. В нефтяной и газовой промышленности они широко используются для приведения в действие насосного и компрессорного оборудования, обеспечивая транспортировку углеводородного сырья по магистральным трубопроводам, поддержание требуемого давления на месторождениях, а также надёжную работу компрессорных станций.

В химической отрасли установки данного типа эксплуатируются для создания и стабилизации давления в сложных технологических системах. Они применяются в процессах перекачки и сжатия как газообразных, так и жидких сред, в системах охлаждения, рециркуляции и подачи исходного сырья. Кроме того, в энергетических установках газотурбинные двигатели нередко включаются в состав вспомогательных агрегатов: насосных станций парогенераторов, установок подачи кислорода, азота и иных технологических газов.

В транспортной отрасли наибольшее распространение газотурбинные установки получили в авиации и морском судоходстве [3]. Их применение обусловлено сочетанием высокой удельной тяги, надёжности и устойчивости к воздействию неблагоприятных условий эксплуатации. В авиационной технике преимущественно применяются турбореактивные конструкции, устанавливаемые на пассажирские, грузовые и военные воздушные суда. Принцип их функционирования основан на формировании тяги за счёт реактивного выброса продуктов сгорания, что обеспечивает достижение значительной крейсерской скорости и реализацию сложных манёвров.

Такие установки характеризуются высокой энергетической плотностью и возможностью работы в широком диапазоне эксплуатационных режимов, что делает их оптимальным выбором для современной авиационной техники.

В морской сфере газотурбинные двигатели применяются на крупных транспортных и военных судах, включая нефтеналивные танкеры, контейнеровозы, пассажирские лайнеры и надводные корабли различного назначения. Высокая чувствительность к изменению подачи топлива позволяет быстро менять режим движения, что критически важно при маневрировании в стеснённых условиях либо при необходимости оперативного реагирования на изменяющуюся обстановку.

В случае применения на военных платформах газотурбинные двигатели обеспечивают мобильность, манёвренность и устойчивость к перегрузкам, что способствует повышению боевой эффективности кораблей и авиационных комплексов.

Широкий спектр технических решений и конструктивных модификаций позволяет адаптировать газотурбинные двигатели под специфические

требования конкретной отрасли. Диапазон их применения охватывает как крупномасштабные энергетические комплексы, так и компактные силовые агрегаты, устанавливаемые на мобильных платформах. Выбор конфигурации, режимов функционирования и эксплуатационных характеристик установки определяется условиями среды, требуемой мощностью, экономическими соображениями и техническими регламентами. Всё это подтверждает универсальность, технологическую зрелость и актуальность газотурбинных силовых установок в современной промышленности и транспорте.

1.3 Описание выбранного объекта автоматизации

В качестве объекта автоматизации для проектируемой системы управления выбран газотурбинный двигатель промышленного назначения Siemens серии SGT-100. Изображение данного газотурбинного двигателя представлено на рисунке 1.1. Указанный тип двигателя является высокотехнологичным агрегатом, предназначенным для использования в составе газоперекачивающего, нефтяного и иного промышленного оборудования, где предъявляются повышенные требования к надёжности, энергетической эффективности и приспособляемости к различным условиям эксплуатации [4].



Рисунок 1.1 – Газотурбинный двигатель Siemens SGT-100

Газотурбинный двигатель Siemens серии SGT-100 спроектирован с учётом необходимости функционирования в широком диапазоне климатических условий, включая как низкие, так и высокие температуры окружающей среды, а также на высотах до двух тысяч метров над уровнем моря. Такой диапазон эксплуатационной устойчивости делает данную установку универсальной в применении. Модульная архитектура конструкции двигателя значительно упрощает проведение технического обслуживания и планового ремонта. В совокупности с продуманной газодинамической схемой и высоким уровнем

автоматизации рабочих процессов это обеспечивает снижение эксплуатационных затрат и топливной потребности, по сравнению с аналогичными решениями.

Установка Siemens SGT-100 применяется преимущественно в отраслях, где требуется бесперебойная и эффективная работа в условиях длительной непрерывной эксплуатации. Конструктивно двигатель включает несколько функциональных узлов, соединённых последовательно. Основные из них: двухступенчатый компрессор, состоящий из четырнадцати ступеней, промежуточный корпус, камера сгорания кольцевого типа, многоступенчатая турбина, а также система отвода отработанных газов. Компрессор содержит два ротора, создающих ступени низкого и высокого давления, которые приводятся во вращение за счёт энергии, вырабатываемой турбиной. Все роторы, включая ротор свободной турбины, соединены между собой посредством газодинамической связи и функционируют на различных частотах вращения.

Благодаря оптимизации аэродинамических процессов в тракте двигателя достигается значительное снижение расхода топлива при сохранении высокой удельной мощности. Для обеспечения надёжности на этапе пуска двигатель оснащён системой диагностических датчиков, контролирующих вибрационные характеристики, параметры температуры, давление масла, а также наличие металлических включений в смазочной жидкости. Эти данные позволяют своевременно обнаружить потенциальные неисправности и принять корректирующие меры до возникновения аварийной ситуации.

Рассмотрим ключевые компоненты двигателя более подробно.

Компрессор осевого типа состоит из двух последовательно расположенных секций: низкого и высокого давления. Секция низкого давления выполнена с шестью ступенями и включает неподвижные направляющие аппараты и подвижные рабочие лопатки, смонтированные на барабанно-дисковом роторе. Входной направляющий аппарат с регулируемым углом поворота позволяет адаптировать параметры потока воздуха под конкретные условия эксплуатации, повышая эффективность на различных режимах.

Секция высокого давления включает восемь ступеней и отличается повышенной механической прочностью, что позволяет ей надёжно функционировать при значительных тепловых и механических нагрузках. Она соединена с турбиной высокого давления, образуя единый высоконагруженный модуль.

Промежуточный корпус двигателя выполняет связующую функцию между двумя секциями компрессора и одновременно служит основанием для размещения приводов, приводимых в движение валом ротора высокого давления.

Камера сгорания кольцевого исполнения состоит из наружного корпуса, жаровой трубы и системы подачи топливной смеси. В процессе сгорания топливовоздушной смеси образуются газы высокой температуры и давления, которые поступают на вход турбины. Турбина преобразует тепловую энергию газов в механическое вращение, которое используется как для работы

компрессора, так и для привода внешних агрегатов. Конструкция турбины включает одну ступень низкого давления, одну ступень высокого давления, а также две ступени свободной турбины, которая используется для передачи механической энергии на исполнительные механизмы, например на газоперекачивающее оборудование. Крутящий момент передаётся через ведущий вал.

В качестве основного энергоносителя для двигателя применяется природный газ, который относится к числу сравнительно экологически чистых видов топлива. Он характеризуется низким уровнем выбросов диоксида углерода и других вредных соединений. При альтернативном использовании попутного нефтяного газа возможно повышение содержания сернистых компонентов в продуктах сгорания, что негативно влияет на экологические показатели и требует дополнительной очистки топлива, делая такое решение менее экономически оправданным.

Система выпуска отработанных газов предназначена для эффективного отвода продуктов сгорания в атмосферу, завершая технологический цикл функционирования установки.

2 Разработка структурной схемы системы автоматического управления

2.1 Определение контрольных точек

Для реализации автоматизированной системы управления газотурбинным двигателем Siemens серии SGT-100 требуется выполнение следующих функциональных задач:

- обеспечение дистанционного управления технологическим процессом;
- внедрение систем технического мониторинга параметров, подлежащих контролю;
- организация сбора, хранения и обработки измерительной информации;
- интеграция средств автоматического реагирования на аварийные и предаварийные режимы.

В результате анализа газотурбинного двигателя были определены следующие точки контроля:

- частота вращения ротора компрессора высокого давления, которую необходимо поддерживать в пределах 15000 ± 500 об/мин;
- частота вращения силовой (свободной) турбины, которую необходимо поддерживать в диапазоне 8500 ± 100 об/мин;
- максимальная температура газов за турбиной, которая при запуске двигателя не должна превышать $+650^{\circ}\text{C}$, а для номинальной работы двигателя поддерживается в диапазоне от $+700$ до $+750^{\circ}\text{C}$;
- расход топлива, при уменьшении расхода природного газа уменьшается частота вращения всех роторов двигателя и соответственно уменьшается выдаваемая мощность;
- уровень вибрации не должен превышать 65 мм/с и должен находиться в диапазоне 50 ± 5 мм/с;
- температура масла на входе двигателя не должна превышать $+45^{\circ}\text{C}$;
- температура в камере сгорания не больше 850°C .

Также для стабильной работы двигателя в номинальном режиме температура наружного воздуха должна находиться в диапазоне $+18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, и барометрическое давление должно быть равно 760 мм.рт.ст.

Точки управления двигателем представлены ниже:

- положение клапана подачи топлива в камеру сгорания ;
- положение клапана подачи воздуха в компрессор.

Для повышения уровня безопасности и обеспечения защиты оборудования предусмотрен перечень аварийных критериев, при срабатывании которых система инициирует автоматическое отключение установки:

- при повышении уровня вибрации в двигателе ≥ 65 мм/с;
- температура газов за свободной турбиной больше 750°C ;
- температура в камере сгорания больше 850°C ;
- частота вращения ротора свободной турбины превышает 9500 об/мин;
- частота вращения ротора высокого давления превышает 15500 об/мин;

- частота вращения ротора низкого давления превышает 11000 об/мин.

2.2 Определение структуры автоматизированной системы управления технологическим процессом

Автоматизированная система управления газотурбинной установкой должна соответствовать ряду технических и функциональных требований, обеспечивающих надёжную, безопасную и высокоэффективную эксплуатацию оборудования в различных режимах.

Обеспечение высокой точности регулирования. Одной из ключевых задач системы управления является поддержание заданных параметров работы двигателя с высокой точностью. К числу таких параметров относятся: частота вращения ротора компрессора высокого давления, частота вращения свободной турбины, температурные режимы, давление, расход топлива и объем воздушного потока. Стабильное поддержание этих параметров позволяет добиться оптимальной производительности и эффективности всей установки.

Надёжность и отказоустойчивость системы. Система управления должна обладать высокой степенью надёжности, включая устойчивость к отказам и аварийным воздействиям. Это предполагает наличие встроенных защитных алгоритмов и функций, предотвращающих возникновение критических ситуаций, таких как перегрев, превышение допустимых нагрузок и другие потенциально опасные отклонения. Таким образом, обеспечивается не только целостность оборудования, но и безопасность обслуживающего персонала.

Удобство и интуитивность интерфейса. Интерфейс взаимодействия с оператором должен быть наглядным, эргономичным и адаптированным для быстрого восприятия информации. Он должен предоставлять полную и актуальную информацию о текущем состоянии двигателя, а также обеспечивать возможность быстрого ввода управляющих команд. Это необходимо для оперативного реагирования на изменяющиеся условия работы и своевременного вмешательства в технологический процесс.

Структура автоматизированной системы управления. В настоящем проекте была реализована централизованная многоуровневая структура автоматизации, в которую входят следующие функциональные уровни:

Нижний (полевой) уровень. На данном уровне осуществляется непосредственное взаимодействие с объектом управления. Сюда входят датчики, измеряющие физические параметры (такие как температура газа, давление, расход, вибрация, частота вращения роторов), и исполнительные устройства, реализующие регулирующее воздействие. Все первичные сигналы от датчиков стандартизированы в виде аналоговых сигналов (например, 4–20 мА), пригодных для передачи на следующий уровень обработки. Исполнительные механизмы включают клапаны подачи топлива и воздуха, насосные агрегаты и другие исполнительные элементы, отвечающие за реализацию управляющих воздействий.

Средний уровень. На этом уровне функционирует программируемый логический контроллер (ПЛК), который обрабатывает поступающие с нижнего уровня сигналы и формирует управляющие воздействия в соответствии с заложенными алгоритмами. Контроллер выполняет функции автоматического регулирования, обеспечивая реализацию логики управления в реальном времени. Важным элементом архитектуры является возможность переключения между автоматическим и операторским режимами управления, что позволяет повысить гибкость и адаптивность всей системы.

Верхний уровень. Завершающее звено структуры – это человеко-машинный интерфейс (HMI), обеспечивающий визуализацию текущих параметров работы двигателя и предоставляющий оператору доступ к функциям управления. Через интерфейс осуществляется запуск и остановка установки, настройка режимов, задание параметров и контроль состояния оборудования. Программное обеспечение HMI предоставляет оператору полную картину функционирования системы в режиме реального времени, что позволяет оперативно принимать обоснованные решения [5].

Функциональное разделение уровней управления представлено на рисунке 2.1, где отображена схема взаимодействия всех компонентов системы автоматизации газотурбинного двигателя Siemens SGT-100.

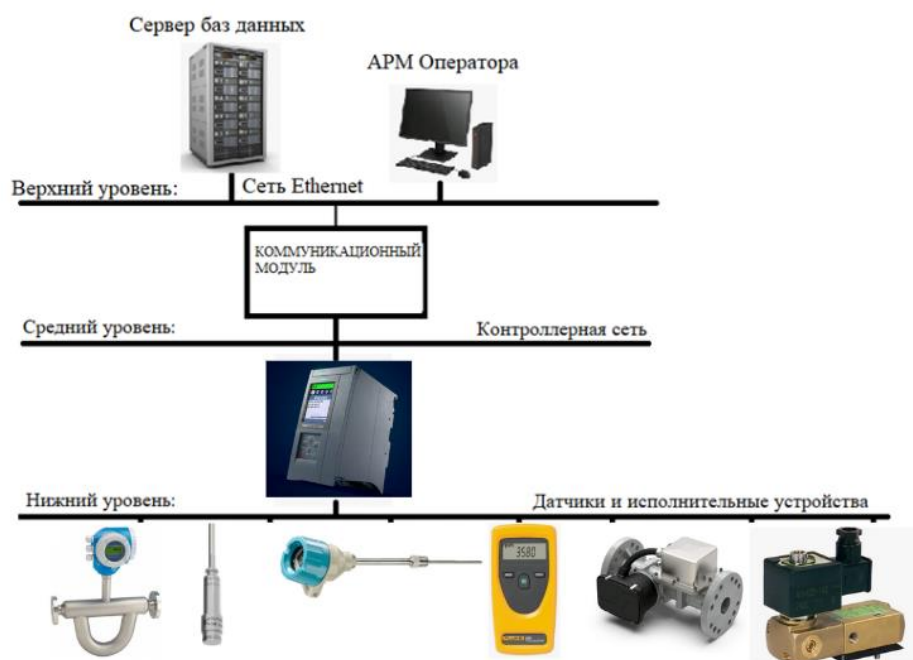


Рисунок 2.1 – Уровни САР газотурбинным двигателем

3 Разработка функциональной схемы автоматизации системы управления газотурбинным двигателем

3.1 Построение функциональной схемы автоматизации

Функциональная схема автоматизации представляет собой графическую или табличную форму отображения структуры автоматизированной системы управления, в которой показаны ключевые элементы оборудования, логика их взаимодействия и маршруты передачи управляющих и измерительных сигналов. Такая схема служит основой при проектировании систем управления технологическими процессами и позволяет визуализировать структуру и логику функционирования всей системы.

В её рамках отображаются все элементы автоматизации: измерительные преобразователи, исполнительные механизмы, логические контроллеры, средства визуализации, а также каналы связи между ними. Это обеспечивает наглядное представление конфигурации системы, позволяет определить необходимые технические средства и сформировать алгоритмы их взаимодействия.

В контексте управления газотурбинной установкой, функциональная схема отражает ключевые этапы преобразования энергии от подачи воздуха и топлива до выработки электрической мощности, с фиксацией контрольных точек по параметрам давления, температуры, частоты вращения и расхода.

Процесс работы установки начинается с поступления атмосферного воздуха в компрессор низкого давления (КНД) через входной регулирующий клапан (позиция 1). Параметр расхода воздушного потока контролируется измерителем FT 3–1. После прохождения КНД воздух направляется в компрессор высокого давления (КВД), где осуществляется дополнительное сжатие. Контроль температуры воздуха на соответствующих участках осуществляется с применением термопар ТЕ 5–1 и ТЕ 6–1, а мониторинг частоты вращения роторов — посредством тахометрических датчиков ST 11–1 и ST 12–1.

Затем сжатый воздух поступает в камеру сгорания [6]. Параллельно через клапан 2 в неё подаётся топливо — природный газ, расход которого отслеживается датчиком FT 4–1. В камере сгорания происходит смешивание газа с воздухом и воспламенение топливно-воздушной смеси. За фиксацию давления отвечает датчик РТ 9–1, а температура контролируется термопарой ТЕ 7–1. В случае превышения заданных температурных пределов осуществляется автоматическая коррекция подачи топлива, предотвращающая перегрев и аварийные режимы работы.

Образовавшиеся в процессе сгорания газы поступают на свободную (силовую) турбину, где их энергия преобразуется во вращательное движение. Контроль рабочих параметров турбины обеспечивается измерителями давления РТ 10–1, температуры ТЕ 8–1 и частоты вращения ST 13–1.

После этого отработанные газы направляются в выхлопной тракт, а

механическая энергия вращения передаётся на электрогенератор. Мощность, вырабатываемая в процессе, измеряется через устройство JG 14–1.

Функциональная схема автоматизации, отражающая все вышеуказанные процессы и взаимосвязи компонентов системы, приведена в Приложении А.

3.2 Выбор оборудования

3.2.1 Подбор расходомера

Измерение расхода топлива – ключевой элемент автоматизированной системы управления газотурбинной установкой Siemens SGT-100. Точная подача топлива обеспечивает эффективное горение, снижает энергопотери и минимизирует выбросы.

В рамках проектирования была проведена оценка различных промышленных расходомеров. Основными критериями выбора стали: диапазон рабочих температур и давлений, метрологические характеристики, интерфейс передачи данных и степень защиты. По результатам сравнительного анализа выбраны два массовых корриолисовых расходомера – Siemens SITRANS FC MASS 2100 DI 1.5 и Endress+Hauser Proline Promass Q 100. Их параметры приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Сравнение расходомеров

Параметр	Siemens SITRANS FC MASS 2100 DI 1.5	Endress+Hauser Proline Promass Q 100
Диаметр условного прохода, мм	1.5...15	2...150
Рабочее давление среды, МПа	До 10	До 10
Температура измеряемой среды, °С	от –50 до +180	от –50 до +205
Температура окружающей среды, °С	от –40 до +60	от –40 до +65
Погрешность, %	±0.1	±0.05
Выходной сигнал	4–20 мА; HART; Modbus RTU; Profibus	4–20 мА; HART; Modbus; EtherNet/IP
Степень защиты	IP67	IP66/IP67

Для интеграции в систему управления двигателя модели SGT-100, имеющего номинальную мощность 5,85 МВт и работающего при повышенных значениях давления и температуры в газовом тракте, в качестве основного был выбран расходомер Promass Q 100 производства компании Endress+Hauser,

изображенный на рисунке 3.1. Устройство обеспечивает высокую точность измерений даже при нестабильных режимах подачи топлива и обладает расширенным температурно-давлением рабочим диапазоном, что критически важно для надёжной эксплуатации в составе энергокомплекса.

Дополнительным преимуществом выбранного расходомера является поддержка современных цифровых протоколов передачи данных, включая EtherNet/IP и HART, что упрощает его интеграцию в действующие SCADA-системы и повышает гибкость настройки и диагностики. Конструктивное исполнение прибора – без использования подвижных элементов – обеспечивает высокую надёжность и минимальную потребность в техническом обслуживании, что особенно важно для объектов с непрерывным режимом работы, таких как газотурбинные установки.



Рисунок 3.1 – Массовый расходомер Endress+Hauser Promass Q 100

3.2.2 Подбор датчика давления

Непрерывный контроль давления в газотурбинных установках является необходимым условием для обеспечения стабильной и безопасной работы оборудования. В процессе функционирования газотурбинного двигателя Siemens SGT-100 в различных участках контура формируются зоны с высоким давлением. Поддержание этих параметров в пределах допустимых значений требует применения специализированных измерительных приборов, способных работать в условиях интенсивных термических и механических нагрузок.

Основными техническими требованиями, предъявляемыми к датчикам давления для таких условий, являются высокая температурная стойкость, точность регистрации переменных значений, устойчивость к вибрации, а также надёжность функционирования в длительной перспективе. Кроме того, важную

роль играет совместимость с существующими архитектурами автоматизированных систем управления.

В рамках разработки проекта были рассмотрены два прибора, удовлетворяющих заявленным условиям эксплуатации: пьезоэлектрический датчик Kistler 6021B и универсальный промышленный датчик ETL-GTS-312. Оба устройства рассчитаны на работу в диапазонах давления и температур, характерных для среды внутри двигателя SGT-100. Параметры расходомеров представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Сравнение датчиков давления

Параметр	Kistler 6021B	ETL-GTS-312
Диапазон измерения давления, МПа	До 20 (динамические измерения)	До 20
Диапазон температуры измеряемой среды, °C	От –55 до +700 (кратковременно до +1000)	До +500
Температура окружающей среды, °C	От –55 до +200	От –40 до +85
Погрешность, %	±0.1	±0.05
Выходной сигнал	4–20 мА; HART; Modbus RTU; Profibus	4–20 мА; HART; Modbus; EtherNet/IP
Степень защиты	IP67	IP66/IP67

В качестве основных критериев отбора использовались:

- пригодность эксплуатации при температуре до +700 °C и выше;
- устойчивость к вибрационным воздействиям;
- высокая чувствительность и точность измерений при анализе динамического давления;
- возможность прямой интеграции в существующую

автоматизированную систему.

На рисунке 3.2 представлен рекомендованный к установке в измерительном контуре газотурбинного двигателя датчик Kistler 6021B, прошедший предварительную инженерную оценку.

Выбор в пользу Kistler 6021B обусловлен его способностью функционировать в экстремально термически нагруженной среде – температура эксплуатации достигает +700 °C, с допустимыми кратковременными всплесками до +1000 °C. Помимо этого, датчик обеспечивает высокую точность измерения быстро меняющегося давления, что критически важно для оценки процессов

внутри камеры сгорания и других динамически активных узлов двигателя. Также отмечается его устойчивость к вибрационным нагрузкам, что особенно актуально для вращающихся систем.

В качестве резервного решения рассматривался ETL-GTS-312 – прибор, демонстрирующий хорошие характеристики при эксплуатации в менее термонапряжённых зонах системы. Несмотря на ограниченный температурный диапазон по сравнению с Kistler 6021B, данный датчик может быть эффективно использован в местах с пониженной термической нагрузкой либо в контуре дополнительного контроля.



Рисунок 3.2 – датчик давления Kistler 6021B

3.2.3 Подбор датчика температуры

Мониторинг температуры является ключевым процессом, необходимым для обеспечения эффективной и безопасной работы газотурбинного двигателя Siemens SGT-100. Повышение температуры в таких компонентах, как камера сгорания, может способствовать увеличению выходной мощности. Однако превышение допустимых температурных значений в других узлах установки может вызвать отказ оборудования или привести к аварийной ситуации. В связи с этим мониторинг температурных параметров играет критическую роль в системе промышленной безопасности, позволяя своевременно выявлять отклонения и предотвращать потенциальные угрозы.

Для измерения температуры в критических точках двигателя был выбран промышленный датчик Siemens SITRANS TS500 с термопарой типа К (хромель–алюмель), изображённый на рисунке 3.3. Устройство обеспечивает высокую точность измерений в широком температурном диапазоне и обладает устойчивостью к воздействию вибраций и агрессивной среды, характерной для газотурбинных установок.

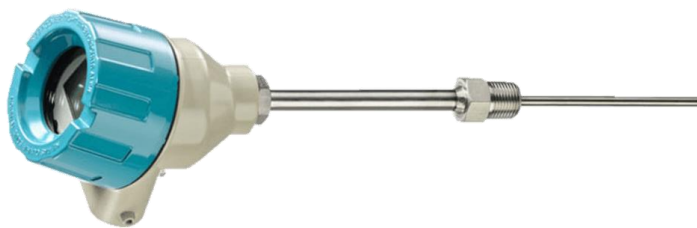


Рисунок 3.3 - датчик Siemens SITRANS TS500 с термопарой типа К

Принцип работы термопары основывается на возникновении термоэлектродвижущей силы (ЭДС) при разности температур между горячим и холодным спаями двух проводников из разнородных металлов. Значение ЭДС прямо пропорционально разности температур, что позволяет с высокой точностью определять температурные параметры объекта контроля.

Технические характеристики датчика SITRANS TS500 с термопарой типа К приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Технические характеристики датчика SITRANS TS500

Параметр	Значение
Тип термопары	К (Хромель-Алюмель)
Диапазон измеряемых температур, °С	от –40 до +1200
Условное давление, МПа	до 10
Диапазон температуры окружающей среды, °С	от –50 до +85
Погрешность измерения, %	±0,25
Степень защиты оболочки	IP67
Выходной сигнал	4–20 мА; HART

3.2.4 Подбор тахометра

Для эффективной работы системы автоматизации газотурбинного двигателя Siemens SGT-100 важно использование тахометров, позволяющих точно измерять параметры, такие как:

- частота вращения ротора компрессора низкого давления;
- частота вращения ротора компрессора высокого давления;
- частота вращения свободной турбины;
- частота вращения турбин низкого и высокого давления.

В своей основе тахометр состоит из двух основных элементов: сенсора, осуществляющего регистрацию измеряемых значений, и отображающего устройства, предназначенного для визуализации полученных данных. Для обеспечения контроля вышеуказанных параметров был выбран тахометр модели

Fluke 930 (рисунок 3.4), укомплектованный оптическим датчиком OSS200 (рисунок 3.5). Данная система позволяет выполнять бесконтактное измерение частоты вращения на небольшом расстоянии от объекта контроля. Параметры тахометра и оптического сенсора приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры тахометра Fluke 930 и оптического датчика

Параметр	Значение
Удаление от объекта, см	До 100 (При использовании оптического сенсора)
Рабочая температура, °C	От -20 до +120
Диапазон измерения, об/мин	От 10 до 30000
Точность измерений, %	±0.02 % значения
Метод определения	По отражающим меткам
Выходной сигнал	4–20 мА, цифровой выход (TTL/RS-232)



Рисунок 3.4 - тахометр Fluke 930



Рисунок 3.5 – оптический датчик

3.2.5 Подбор программируемого логического контроллера

Для создания автоматизированной системы управления газотурбинным двигателем Siemens SGT-100 требуется использование высокопроизводительного и надёжного программируемого логического контроллера (ПЛК), способного эффективно обрабатывать большое количество дискретных и аналоговых сигналов, поддерживать актуальные протоколы промышленной связи и обеспечивать стабильную работу в условиях реального производственного цикла.

В процессе выбора аппаратной платформы был проведён сравнительный анализ между ПЛК серии Siemens SIMATIC S7-300 и более современной серией SIMATIC S7-1500. Версия контроллера представлена S7-1500 на рисунке 3.6. По итогам анализа приоритет был отдан модели S7-1500. Данное решение обосновано тем, что этот контроллер обладает значительно более высокой вычислительной мощностью, широким набором функций и возможностью интеграции с цифровыми технологиями нового поколения. Сравнение характеристик приведены в таблице 3.5.

Среди его ключевых преимуществ – расширенные возможности обработки информации, визуализации технологических процессов, сетевого взаимодействия, а также поддержка таких современных протоколов обмена данными, как PROFINET с временной синхронизацией по технологии IRT и Modbus RTU.

Выбор контроллера SIMATIC S7-1500 для реализации данного проекта объясняется его высокой степенью надёжности, универсальностью и соответствием требованиям современных задач автоматизации сложных технологических объектов, в частности – систем управления газотурбинными установками последнего поколения.

Таблица 3.5 – Технические характеристики контроллеров Siemens

Параметр	SIMATIC S7-300	SIMATIC S7-1500
Рабочая температура, °C	от -40 до +70	от 0 до +60
Поддерживаемые протоколы	PROFINET IO, PROFIBUS DP, AS-Interface	PROFINET IO IRT, PROFIBUS DP, Modbus RTU
Интерфейсы	Ethernet, RS232, RS485, USB	Ethernet, RS232, RS422, RS485, USB
Кол-во дискретных входов/выходов	24/6	32/16
Кол-во аналоговых входов/выходов	4/2	8/4
Время выполнения операции	0.1 мкс	0.3 мкс

Дополнительным аргументом в пользу выбора контроллера SIMATIC S7-1500 является его способность к интеграции с современными средствами визуализации, возможностями удалённого мониторинга и диагностики, а также поддержкой масштабируемой архитектуры системы. Благодаря таким характеристикам данная модель ПЛК является наиболее подходящим вариантом для реализации автоматизированной системы управления на технологически сложном объекте — газотурбинной установке Siemens SGT-100.



Рисунок 3.6 – Siemens SIMATIC S7-1500

3.2.6 Выбор клапанов

Для надёжного и точного управления подачей топлива в газотурбинный двигатель Siemens SGT-100 требуется использование регулирующего клапана, способного функционировать в условиях повышенного давления и температуры, а также обладающего высокой пропускной способностью. С учётом предъявляемых технических характеристик и требований по совместимости с конкретной моделью газотурбинной установки, оптимальным решением стал выбор топливного регулирующего клапана Woodward 8400D (Рисунок 3.7). Этот тип клапанов разработан специально для эксплуатации в составе энергетических газотурбинных установок и соответствует их эксплуатационным стандартам. Устройство обеспечивает высокую скорость отклика на управляющие сигналы, демонстрирует устойчивость к агрессивным внешним условиям и оснащено шаговым электроприводом, обеспечивающим точное дозирование потока топлива. Технические характеристики клапана Woodward 8400D приведены в таблице 3.6.

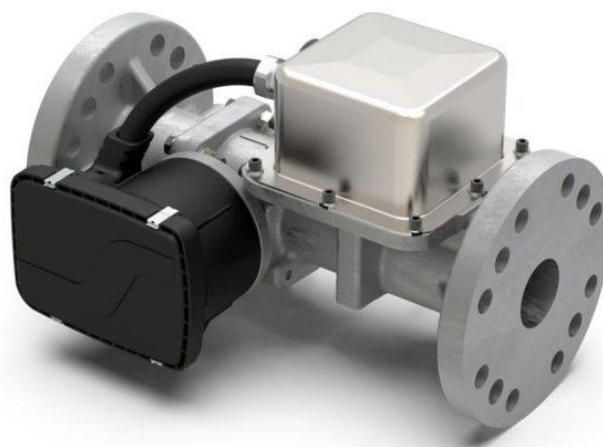


Рисунок 3.7 – топливный регулирующий клапан Woodward 8400D

Таблица 3.6 – Параметры клапана Woodward 8400D

Параметр	Значение
Материал корпуса	Нержавеющая сталь
Рабочая температура, °C	От -40 до +125
Рабочее давление, МПа	До 4.5
Время отклика, сек	Менее 0.25
Температура окружающей среды, °C	От -40 до +85
Привод	Шаговый электропривод
Входной/выходной сигнал	4–20 мА / HART
Коэффициент расхода	Kv = 65; Cv = 75

Для подачи воздуха в компрессорную часть газотурбинного двигателя Siemens SGT-100 необходимо использование электромагнитного клапана, обеспечивающего стабильное и точное управление воздушным потоком. В результате анализа промышленных решений предпочтение было отдано соленоидному клапану ASCO серии 551 производства Emerson (Рисунок 3.8). Данное оборудование широко применяется в пневматических системах автоматизации благодаря высокой скорости срабатывания, стойкости к резким температурным колебаниям и надёжности при длительной эксплуатации в условиях работы газотурбинных установок. Основные технические параметры клапана ASCO 551 представлены в таблице 3.7.



Рисунок 3.8 – Клапан ASCO 551

Таблица 3.7 – Параметры клапана ASCO 551

Параметр	Значение
Принцип работы	Прямого действия
Исполнение	Нормально закрытый
Материал корпуса	Алюминиевый сплав
Рабочая температура, °С	От -40 до +80
Температура окружающей среды, °С	От -40 до +60
Пропускная способность, м³/ч	38
Потребляемая мощность, Вт	22
Время срабатывания, мс	Открытие: 20–25; Закрытие: 30
Входной/выходной сигнал	24V DC / 4–20 мА
Мембрана	EPDM
Номинальный диаметр, мм	50

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 в камере сгорания газотурбинного двигателя на основе комбинированного принципа управления на рисунке 4.1;
- контур программного управления температурой в камере сгорания на рисунке 4.2.

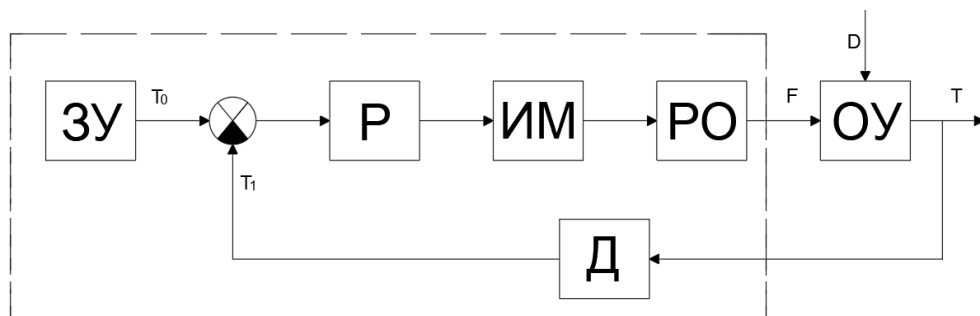


Рисунок 4.1 – Функциональная схема контура регулирования температуры в камере сгорания



Рисунок 4.2 – Функциональная схема контура программного управления температурой в камере сгорания

где F – расход газа;
 T – температура в камере сгорания;
 T_0 – заданная температура;
 D – внешнее возмущение.

На основании разработанных контуров управления сформулированы следующие задачи:

Задача №1. Для обеспечения требуемых показателей качества, исходя из математической модели замкнутой системы регулирования, необходимо выполнить синтез типового регулятора.

Задача №2. В соответствии с функциональной схемой требуется разработать систему программного управления температурой в камере сгорания.

4.2 Построение передаточной функции

Контроль расхода топлива в камере сгорания был выделен как ключевой элемент в системе управления газотурбинным двигателем. Расход топлива напрямую влияет на температуру газов: при увеличении расхода топлива интенсивность горения возрастает, что приводит к повышению температуры в камере. В результате повышенная температура способствует росту общей мощности двигателя, благодаря более эффективному расширению газов в турбине. Однако существует температурный предел, превышение которого вызывает снижение эффективности из-за увеличения термического напряжения.

Для моделирования передаточной функции была применена дроссельная характеристика. В данном случае входным параметром выступает расход топлива, а выходным – температура газов в камере сгорания. Исходные данные для этих параметров представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1- Исходные значения

№	Расход топлива F, кг/час	Температура газов, К
1	1193	822
2	1234	835
3	1296	842
4	1325	851
5	1377	868
6	1429	871
7	1470	892
8	1527	902
9	1597	912
10	1633	935

Для построения передаточной функции контура управления планируется использовать специализированный инструмент, являющийся частью программного обеспечения MATLAB, а именно System Identification Toolbox [9]. MATLAB широко применяется в инженерных и научных исследованиях, а также в образовательной сфере, обеспечивая решение разнообразных задач в области математического анализа, моделирования и проектирования. System Identification Toolbox предоставляет возможность автоматически создавать математическую модель системы на основании заданных входных и выходных данных, представленных в таблице 4.1. Интерфейс основного окна данного инструмента приведён на рисунке 4.3.

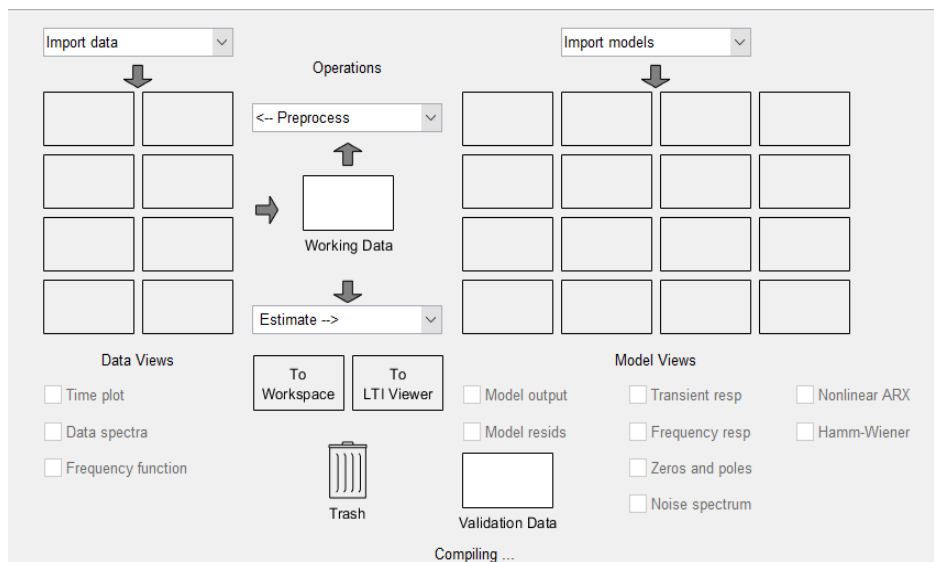


Рисунок 4.3 – Окно System Identification Toolbox

После загрузки входных и выходных данных начинается процесс моделирования, который изображен на рисунке 4.4.

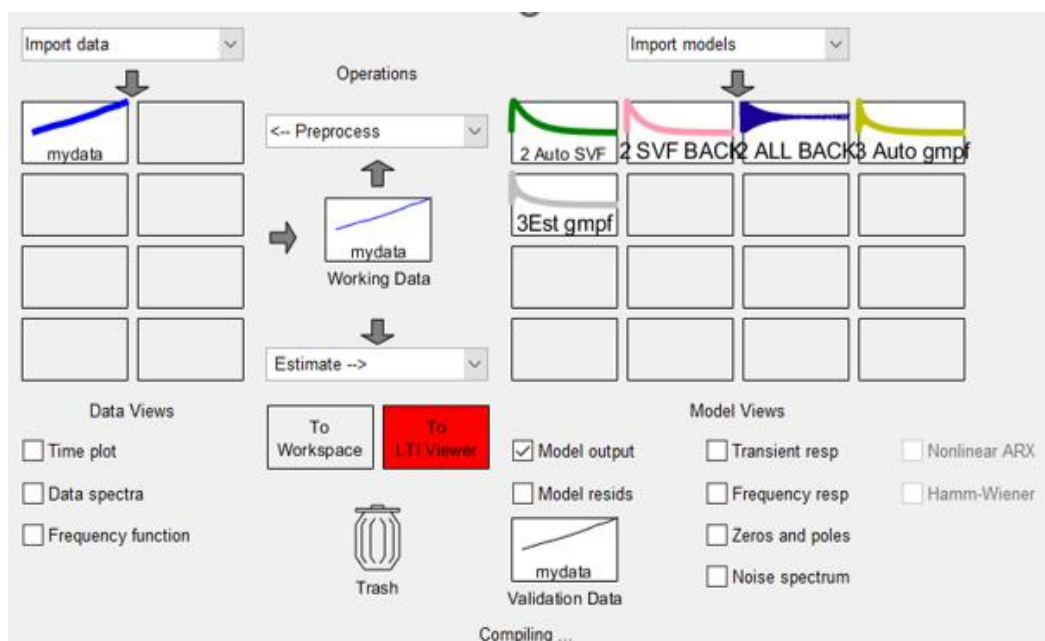


Рисунок 4.4 – Моделирование в System Identification Toolbox

Ключевым параметром, определяющим соответствие математической модели реальной системе, является показатель адекватности. В процессе подбора моделей для дальнейшего синтеза была выбрана передаточная функция с оценкой адекватности, равной 97,21%. Сравнение различных передаточных функций, а также итоговый результат представлены на рисунке 4.5, 4.6.

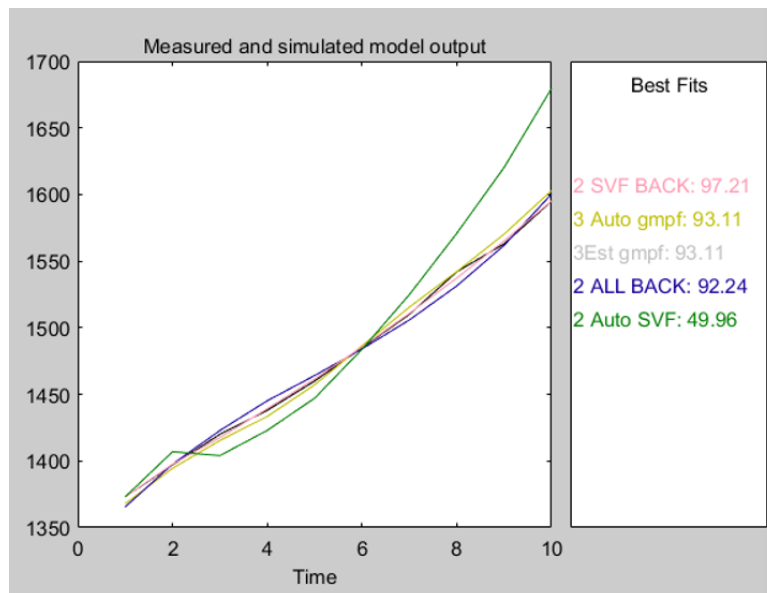


Рисунок 4.5 – Результаты сравнений оценок адекватности в System Identification Toolbox

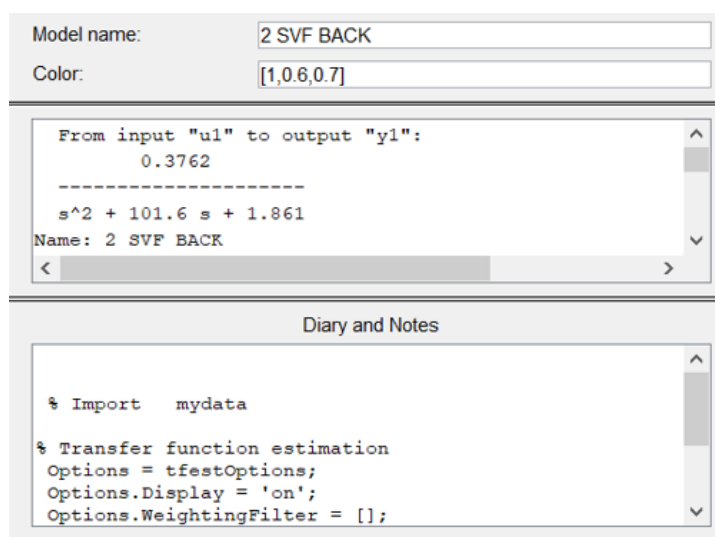


Рисунок 4.6 – Выбранная передаточная функция

4.3 Анализ динамических свойств системы

Исходя из результатов оценок адекватности и результатов с рисунка 4.6, передаточная функция разомкнутой системы имеет следующий вид (4.1):

$$G(s) = \frac{0.3762}{s^2 + 101.6s + 1.861}. \quad (4.1)$$

Передаточная функция системы автоматического регулирования подачи

топлива газотурбинного двигателя описывает взаимосвязь между входным сигналом, представляющим расход топлива, и выходным сигналом, характеризующим температуру газового потока. Данная функция служит основой для дальнейшего исследования характеристик системы управления.

Для преобразования передаточной функции замкнутой системы используется формула обратной связи, представленная в выражении (4.2):

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

С помощью формулы (4.1) и формулы (4.2) обратнойсвязивычисляем передаточную функцию замкнутой системы:

$$T(s) = \frac{\frac{0.3762}{s^2 + 101.6s + 1.861}}{1 + \frac{0.3762}{s^2 + 101.6s + 1.861}} = \frac{0.3762}{s^2 + 101.6s + 2.2372}.$$

Перед проведением моделирования системы в MATLAB необходимо предварительно убедиться в её устойчивости, применив первый метод Ляпунова. Алгоритм проверки устойчивости представлен ниже:

Алгоритм проверки устойчивости:

Шаг 1. Составляется характеристическое уравнение на основании передаточной функции разомкнутой системы. Характеристическое уравнение, обозначенное как формула (4.3), имеет следующий вид:

$$s^2 + 101.6s + 1.861 = 0, n = 2. \quad (4.3)$$

Шаг 2. Определяем корни характеристического уравнения. Поскольку уравнение относится ко второму порядку, его корни вычисляются с использованием формулы дискриминанта, как указано в формуле (4.4):

$$D = b^2 - 4ac = 101.6^2 - 4 * 1 * 1.861 = 10315.116 > 0, \quad (4.4)$$

$$s_1 = \frac{-101.6 - \sqrt{10315.116}}{2} = -102, s_2 = \frac{-101.6 + \sqrt{10315.116}}{2} = -0.0183.$$

Шаг 3. После нахождения корней характеристического уравнения следует отобразить их на комплексной плоскости. Для выполнения данной задачи используется программное обеспечение MATLAB. Результаты визуализации корней представлены на соответствующем графике (Рисунок 4.7).

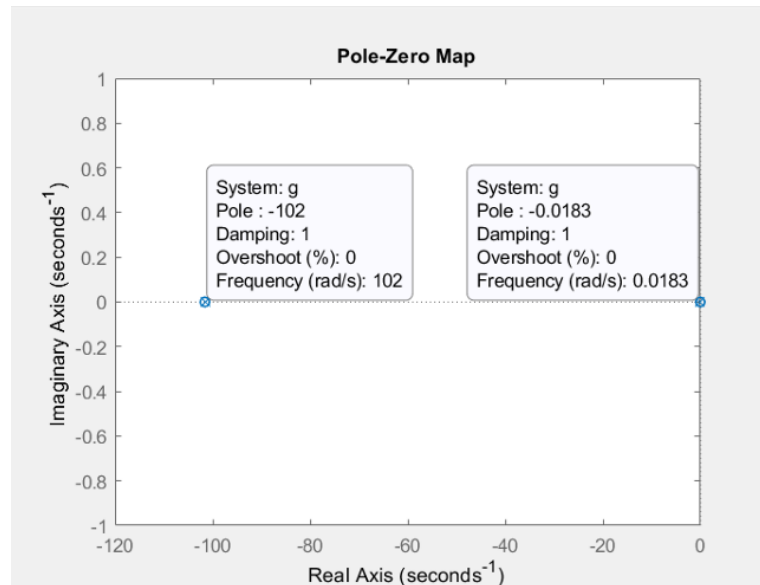


Рисунок 4.7 – Положение корней характеристического уравнения в комплексной области

Также проведем анализ замкнутой системы на устойчивость первым методом Ляпунова [8].

Алгоритм проверки устойчивости:

Шаг 1. Сформируем характеристическое уравнение на основе передаточной функции замкнутой системы. Характеристическое уравнение, обозначенное как формула (4.5), имеет следующий вид:

$$s^2 + 101.6s + 2.2372 = 0, n = 2 \quad (4.5)$$

Шаг 2. Определяем корни характеристического уравнения. Поскольку уравнение второго порядка, вычисляем корни с использованием формулы дискриминанта (4.6):

$$D = b^2 - 4ac = 101.6^2 - 4 * 1 * 2.2372 = 10313.6112 > 0, \quad (4.6)$$

$$s_1 = \frac{-101.6 - \sqrt{10313.6112}}{2} = -101.578,$$

$$s_2 = \frac{-101.6 + \sqrt{10313.6112}}{2} = -0.022.$$

Шаг 3. После нахождения корней изобразим их на комплексной плоскости. Для построения графика используем MATLAB. График результатов представлен на рисунке 19.

Вывод: согласно первому методу Ляпунова, как замкнутая, так и разомкнутая системы автоматического регулирования (САР) являются

устойчивыми. Это обусловлено тем, что их полюса представлены отрицательными действительными значениями и находятся в левой полуплоскости на комплексной плоскости.

Для дальнейшего исследования характеристик системы управления будет применена прикладная программа Simulink. Этот инструмент, входящий в состав MATLAB, представляет собой графическую среду для моделирования, симуляции и анализа поведения динамических систем.

Структурная схема системы управления газотурбинного двигателя представлена на рисунке 4.8:

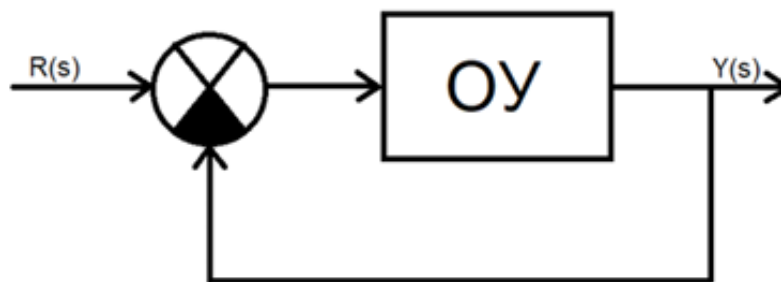


Рисунок 4.8 – Структурная схема САУ

где $R(s)$ - задающее воздействие;

$Y(s)$ – выходная координата.

Выполним моделирование замкнутой системы автоматического регулирования газотурбинного двигателя, представленной на рисунке 4.9, и проведём запуск для получения переходных характеристик.

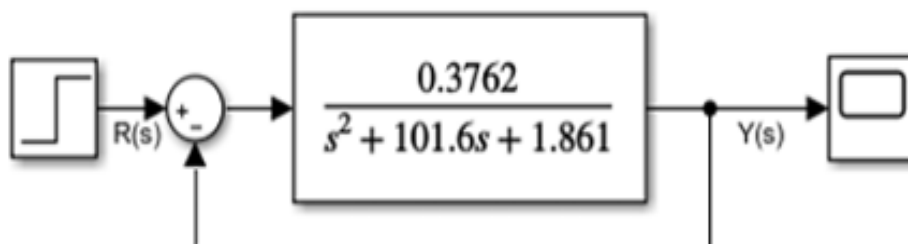


Рисунок 4.9 - Структурная схема замкнутой САР

На основе полученной переходной характеристики возможно определить прямые показатели качества. Результаты моделирования замкнутой системы автоматического регулирования представлены на рисунке 4.10.

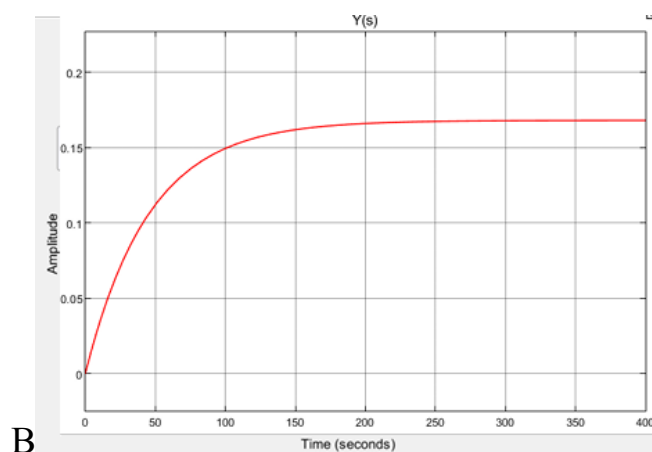


Рисунок 4.10 – Переходная характеристика структурной схемы системы автоматического регулирования

На основании анализа переходного процесса можно сделать предварительные выводы, что система характеризуется монотонным и неколебательным поведением, однако не достигает заданного значения (уставки). Также отмечается замедленная реакция системы на входное воздействие, что объясняется увеличенными значениями времени нарастания и времени регулирования.

Для более точной оценки параметров качества системы предлагается использовать инструмент MATLAB Linear System Analyzer Toolbox, позволяющий провести анализ необходимости включения типового регулятора в систему. На рисунке 4.11, отображен переходный процесс замкнутой системы, полученный с использованием указанного инструмента MATLAB.

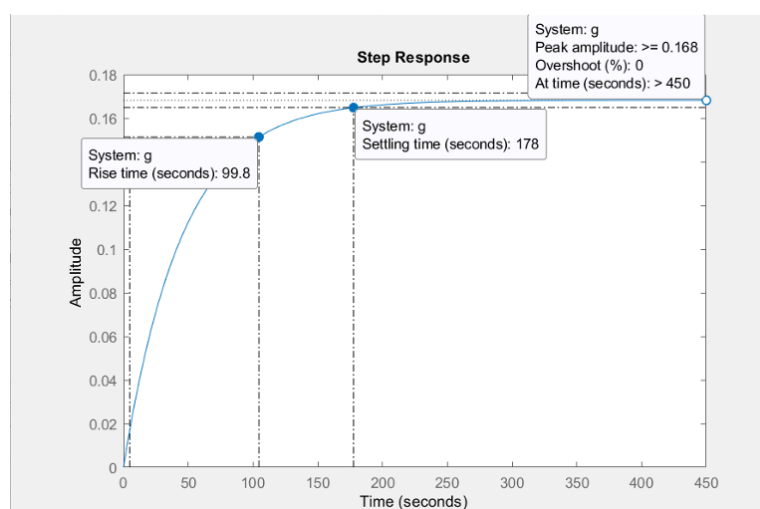


Рисунок 4.11 – Переходная характеристика замкнутой системы с определёнными прямыми оценками качества

Выполним расчет прямых оценок качества на основании полученного переходного процесса замкнутой системы:

Время регулирования – это показатель который характеризует временной интервал, за который выходная величина системы входит в установленный диапазон допуска, не выходя за пределы заданной погрешности. Он отражает динамическое свойство системы — её способность к быстрой стабилизации после воздействия. Время установления было определено на основании анализа переходного процесса и составляет: $T_{set}=178$ сек.

Перерегулирование представляет собой количественную характеристику, отражающую величину превышения выходной переменной относительно уставки в переходной фазе, до момента достижения устойчивого режима. Иными словами, данный параметр выражает, на сколько процентов выходной сигнал превосходит установившееся значение перед тем, как начнётся стабилизация процесса.

Процент перерегулирования вычисляется по следующему выражению (4.7):

$$P_{ov} = \frac{Y_{(max-Y_{ss})}}{Y_{ss}} * 100\%. \quad (4.7)$$

где Y_{max} – максимальное значение, достигнутое выходным сигналом;
 Y_{ss} – установившееся значение.

Поскольку переходной процесс исследуемой системы протекает без колебаний и является монотонным, значение процента перерегулирования составляет ноль.

Показатель количества колебаний отражает число колебательных циклов, которые совершает выходной сигнал до момента установления устойчивого состояния. В силу монотонного характера переходного процесса наличие колебаний отсутствует, соответственно, данный показатель также равен нулю.

На основании рассмотренных выше критериев качества можно обоснованно сделать вывод об отсутствии в системе как колебательных процессов, так и собственной частоты колебаний, что подтверждает её апериодическую природу.

Установившаяся ошибка определяется как разность между заданным (целевым) значением и достигнутым выходным значением. Расчёт этого показателя производится согласно выражению (4.8):

$$e_{ss} = Y_{ss} + Y; e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t). \quad (4.8)$$

Проще говоря, установившаяся ошибка представляет собой отклонение выходной переменной от её требуемого (установившегося) значения. С аналитической точки зрения, данная ошибка может быть определена с использованием следующего алгоритма расчёта:

Шаг 1. Определяется передаточная функция замкнутой системы при воздействии единичного ступенчатого сигнала. Для этого используется

выражение (4.9):

$$T(s) = \frac{E^R(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G(s)} = \frac{s^2 + 101.6s + 1.861}{s^2 + 101.6s + 2.2372}. \quad (4.9)$$

Шаг 2. Вычисляется динамическая составляющая ошибки на основе формулы (4.10):

$$E(s) = T(s) * R(s) = \frac{s^2 + 101.6s + 1.861}{s^2 + 101.6s + 2.2372} * \frac{1}{s}. \quad (4.10)$$

Шаг 3. На заключительном этапе определяется статическая ошибка, используя выражение (11):

$$E_{ss}(S) = \lim_{(n \rightarrow \infty)} E(t) = \lim_{(s \rightarrow 0)} [s * E(s)]. \quad (4.11)$$

Подставляя числовые значения в формулу (11), получаем конкретное значение статической ошибки:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left[s * \frac{s^2 + 101.6s + 1.861}{s^2 + 101.6s + 2.2372} * \frac{1}{s} \right] = 0.8318.$$

Графическое представление расхождения между заданной уставкой и фактическим выходным сигналом представлено на рисунке 4.12. На основании визуального анализа можно сделать вывод, что установившаяся ошибка составляет: $e_{ss} = 0.8313$.

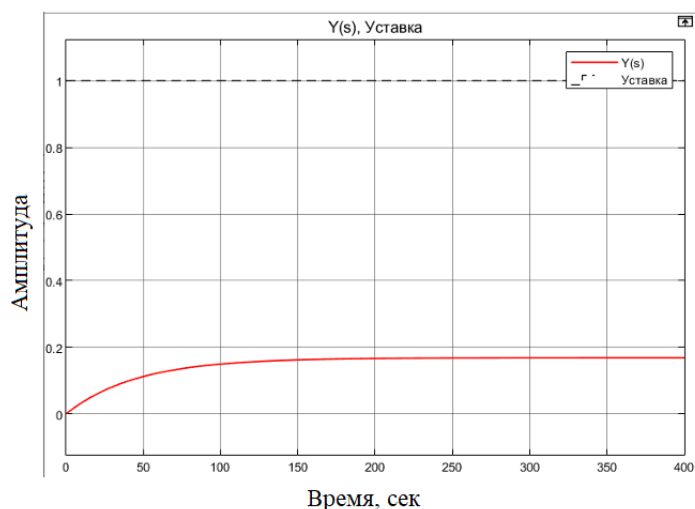


Рисунок 4.12 – Разность выходного сигнала от уставки

Время достижения первого максимума характеризует интервал, за который выходной сигнал достигает своего наибольшего значения (пикового отклика) в ходе переходного процесса до начала стабилизации. В случае рассматриваемой системы данный показатель равен нулю, что обусловлено отсутствием колебательной составляющей в отклике.

Время нарастания определяет скорость реакции системы на входное воздействие и, соответственно, служит критерием её быстродействия. По сути, оно отражает, насколько быстро выход достигает установленного диапазона значений. На основе анализа переходной характеристики время нарастания составляет: $T_R=99.8$ сек.

Декремент затухания используется для оценки уменьшения амплитуды колебаний при последовательных циклах переходного процесса. Он показывает, во сколько раз уменьшается амплитуда очередного колебания по сравнению с предыдущим. Однако, учитывая, что отклик системы не содержит колебаний, данный параметр к анализу не применяется.

Таким образом, все основные прямые показатели качества системы были рассмотрены. Их значения сведены в таблицу 4.2, в которой приведены прямые оценки динамических характеристик системы автоматического регулирования (САР) газотурбинного двигателя.

Таблица 4.2 – Прямые оценки качества САР

№	Оценки Качества	Значения
1	Время регулирования (T_{set})	178 сек
2	Перерегулирование (P_{ov})	0%
3	Число колебаний (M)	0
4	Колебательность (μ)	0%
5	Частота колебаний (w_{osc})	0
6	Установившаяся ошибка (e_{ss})	0.8318
7	Время достижения первого максимума (T_p)	0 сек
8	Время нарастания (T_R)	99.8 сек
9	Декремент затухания (λ)	0

На основании найденных корней характеристического уравнения замкнутой системы можно провести так называемую корневую оценку показателей качества регулирования.

Ранее были получены собственные значения замкнутой системы: $s_1=-101.5780$; $s_2=-0.022$. Из этих значений наибольшее влияние на динамику отклика оказывает меньший по модулю корень с отрицательной действительной

частью, поскольку именно он определяет наиболее медленно затухающее звено. В данном случае таким корнем является s_2 , который в рамках дальнейшего анализа обозначается как σ_{min} .

На его основе производится расчет времени регулирования системы, которое определяется по формуле (4.12):

$$T_{set} = \frac{4}{|\sigma_{min}|} = \frac{4}{|-0.022|} = 181.81 \text{сек}, \quad (4.12)$$

Показатель перерегулирования напрямую связан с коэффициентом демпфирования системы. В тех случаях, когда корни характеристического уравнения комплексные, данный коэффициент отражает степень колебательности переходного процесса. Однако в рассматриваемом случае все собственные значения системы являются отрицательными и действительными, что указывает на отсутствие колебательных составляющих. Следовательно, можно сделать вывод, что перерегулирование отсутствует, то есть его значение приближено к нулю.

Ещё один важный параметр, позволяющий судить о динамике системы, это степень устойчивости, который характеризует быстродействие системы и определяется по формуле (4.13):

$$\eta = |\sigma_{min}| = 0.022. \quad (4.13)$$

Колебательность по корням определяется как отношение мнимой части корня к его действительной части. В данном случае, поскольку все найденные собственные значения являются действительными, выполнить численную оценку колебательности не представляется возможным. Вместе с тем, на основании анализа переходного процесса установлено, что система демонстрирует монотонный отклик, что подтверждает отсутствие колебательных составляющих в её динамике.

Вывод: по результатам проведённого анализа можно утверждать, что система обладает монотонным поведением, что автоматически исключает любые проявления колебательности. Однако, при этом фиксируются замедленные характеристики динамики, в частности – высокие значения времени нарастания и времени регулирования. Также, рассчитанная степень устойчивости указывает на низкую скорость реакции системы на внешние воздействия, что обосновывает необходимость внедрения регулятора в структуру управления. Ключевым фактором в пользу применения регулятора выступает значительное значение установившейся ошибки, равное 0.8318, что свидетельствует о недостаточной точности функционирования системы.

4.4 Синтез типового регулятора

Для настройки параметров PID-регулятора будет применен эмпирический метод Циглера–Никольса основанный на характеристиках переходного процесса разомкнутой системы. Управляющее воздействие в идеальной структуре PID-регулятора определяется формулой (4.14):

$$U(t) = K_p \left(e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right). \quad (4.14)$$

где: $e(t)$ – ошибка регулирования;

K_p – коэффициент пропорциональной составляющей;

K_i – коэффициент интегральной составляющей;

K_d – коэффициент дифференцирующей составляющей.

Применение метода Циглера–Никольса требует предварительного определения ключевых параметров модели объекта управления: коэффициента передачи, времени запаздывания и постоянной времени. Эти параметры рассчитываются на основании анализа переходной характеристики, полученной в ответ на единичное воздействие, путём проведения касательной в точке перегиба.

Коэффициент передачи (k) характеризует установившееся значение выходного сигнала при постоянном входном воздействии и определяется как горизонтальное значение переходной характеристики на больших временах. Время запаздывания (L) представляет собой интервал времени от момента подачи входного воздействия до начала реакции системы, определяемый как абсцисса точки пересечения касательной с осью времени. Постоянная времени (T) равна разности между моментом, в который касательная достигает значения (k), и временем запаздывания.

На основании анализа переходной характеристики (рисунок 4.13) были определены следующие значения: $k=0.1682$; $L=4$ сек; $T=46$ сек.

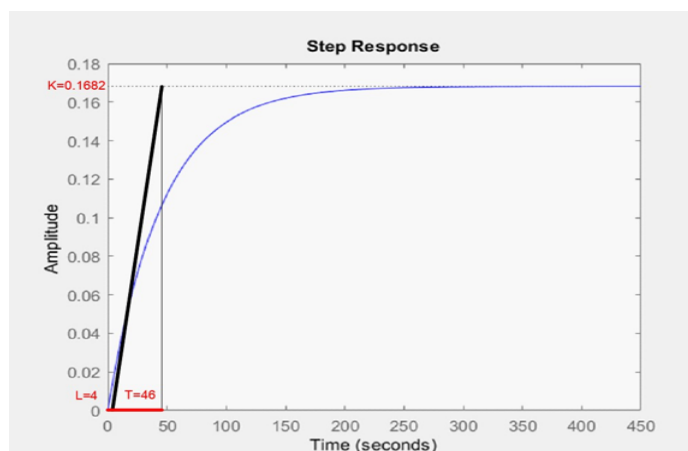


Рисунок 4.13 – Определение характеристик объекта управления методом касательной

4.4.1 Метод Циглера–Никольса (ZN1)

Метод Циглера–Никольса (ZN1) предусматривает два подхода к настройке коэффициентов PID-регулятора – на основе анализа разомкнутого и замкнутого контура системы [7].

Метод разомкнутого контура реализуется следующим образом:

Шаг 1. Выполняется идентификация отклика системы на единичное ступенчатое воздействие. На вход подаётся ступенчатый сигнал с целью анализа переходной характеристики.

Шаг 2. Строится касательная к точке перегиба отклика, на основании которой определяются ключевые параметры: время запаздывания, постоянная времени и коэффициент передачи.

Шаг 3. Производится расчёт параметров PID-регулятора с использованием эмпирических формул.

Метод замкнутого контура включает следующие этапы:

Шаг 1. В контур управления вводится пропорциональный регулятор. Его коэффициент постепенно увеличивается до момента, когда система начинает устойчиво колебаться с постоянной амплитудой. Это необходимо для определения критического усиления и периода устойчивых колебаний.

Шаг 2. На основе полученных критических параметров рассчитываются коэффициенты PID-регулятора.

Поскольку необходимые параметры уже были определены для метода с разомкнутой связью, в данной работе будет применяться именно метод открытого контура.

Схема моделирования системы с внедрённым в неё PID-регулятором представлена на рисунке 4.14.

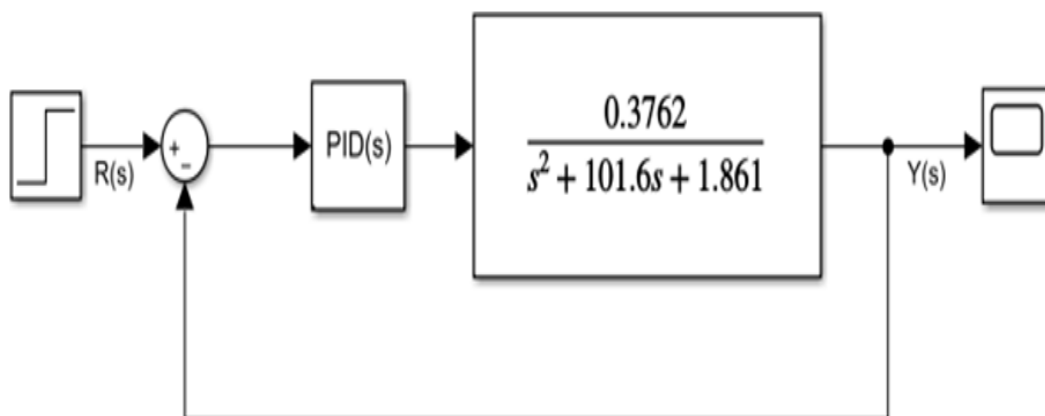


Рисунок 4.14 – Структурная модель системы автоматического управления с PID-регулятором

Произведём расчёт параметров PID-регулятора с использованием эмпирических соотношений, соответствующих методу Циглера–Никольса (ZN1), и представим результаты в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Расчёт параметров PID-регулятора по методу ZN1

Тип регулятора	K_p	$T_I = 1/I$	K_d
P	$\frac{T}{kL} = 68.37$	–	–
PI	$0.9 * \frac{T}{kL} = 61.53$	$T_I = \frac{L}{0.3} = 13.33$ $K_I = \frac{1}{T_I} = 0.075$	–
PID	$1.25 * \frac{T}{kL} = 82.04$	$T_I = 2L = 8$ $K_I = \frac{1}{T_I} = 0.125$	$0.5L = 2$

В соответствии с ранее рассчитанными коэффициентами осуществляется подстановка значений в структуру PID-регулятора для получения переходных характеристик системы. Результаты моделирования переходных процессов отображены на рисунке 4.15. Анализируя представленные графики, можно сделать вывод, что на дальнейших этапах будет использован именно PID-регулятор, поскольку он демонстрирует наименьшее время нарастания и минимальное установившееся отклонение по сравнению с другими типами регуляторов. Исходя из определённых параметров, выражение закона управления PID – регулятора, полученного по методу Циглера–Никольса, записывается в следующем виде:

$$U_{(t)} = 82.04 \left(e(t) + 0.125 \int_0^t e(t) dt + 2 \frac{de(t)}{dt} \right).$$

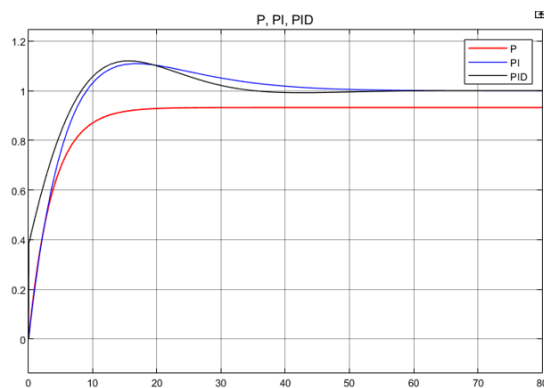


Рисунок 4.15 – Графики переходных процессов для P-, PI- и PID-регуляторов по методу Циглера–Никольса

При изучении переходных характеристик можно отметить наличие дифференцирующей составляющей в отклике системы с PID-регулятором. Аналогичная тенденция наблюдается и при реализации других методов настройки, где D-компонент также проявляется в динамике процесса. С целью исключения влияния данной составляющей была произведена параметрическая коррекция настроек регулятора, заключающаяся в обнулении коэффициента K_d . Таким образом, в дальнейшем анализе, включая все последующие методы, в расчет принимается модифицированный регулятор, в котором D-звено исключено за счёт соответствующей коррекции параметров.

Переходной процесс системы с PID-регулятором после настройки параметров отражён на рисунках 4.16 и 4.17 соответственно.

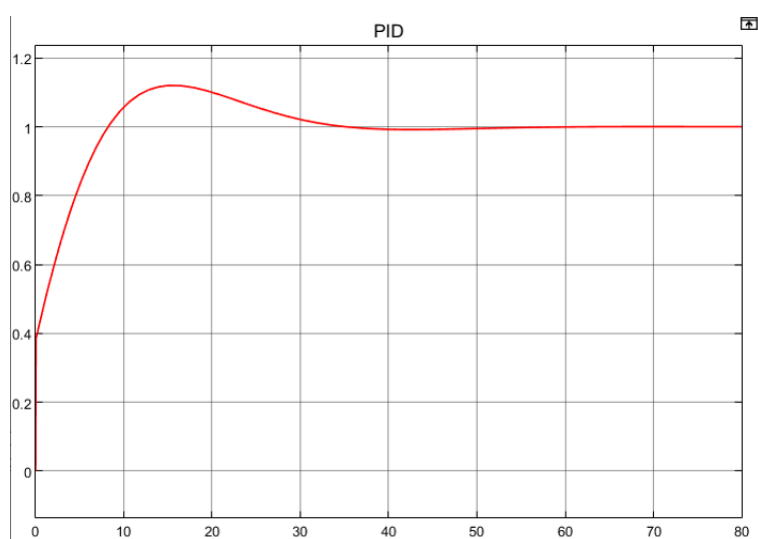


Рисунок 4.16 – переходной процесс PID-регулятора с D-составляющей ZN1

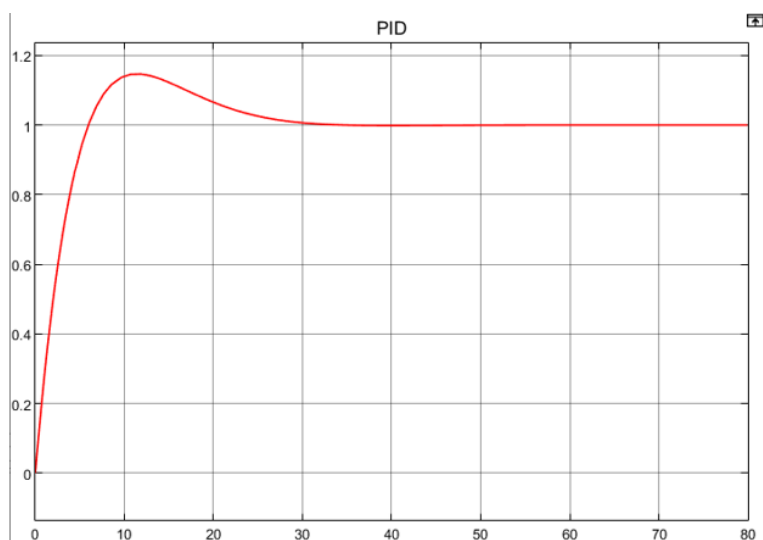


Рисунок 4.17 – переходной процесс PID-регулятора ZN1

Выполним определение положения полюсов замкнутой системы с целью расчета запаса устойчивости и получения корневой оценки времени регулирования. Согласно данным, представленным на рисунке 4.18, значение степени устойчивости системы, настроенной на основе метода Циглера–Никольса, составляет 0.161. Времени регулирования рассчитывается с использованием формулы (12):

$$T_{set} = \frac{4}{|\sigma_{min}|} = \frac{4}{|-0.161|} = 24 \text{ сек.}$$

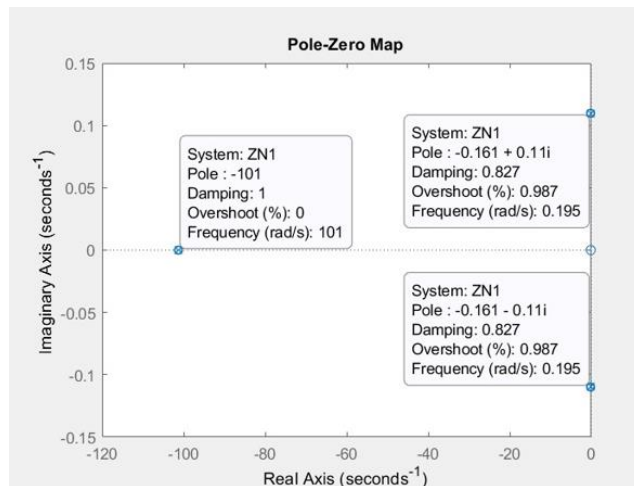


Рисунок 4.18 - Полюса системы методом Циглера–Никольса

Дополнительно на основании графических данных, представленных на рисунке 4.19, были определены амплитудный и фазовый запасы устойчивости системы.

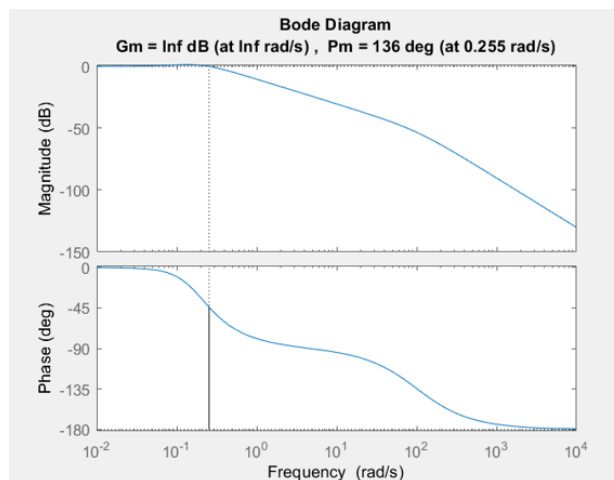


Рисунок 4.19 – Запасы устойчивости по амплитуде и фазе методом Циглера–Никольса

Анализируя представленные на рисунке данные, можно установить, что фазовый запас устойчивости составляет 136° , тогда как амплитудный запас стремится к бесконечности, что указывает на высокий уровень устойчивости системы. На основе проведённого анализа делается вывод о приемлемости применения метода Циглера–Никольса для настройки данной системы. Полученная система демонстрирует устойчивое поведение, а также снижение времени регулирования. При этом наблюдается перерегулирование величиной 14.7%, что укладывается в допустимые границы.

На основании рассчитанных прямых и косвенных показателей качества переходного процесса можно сделать вывод об эффективности применения метода Циглера–Никольса для настройки PID-регулятора в данной системе. Анализ таблиц 4.4 и 4.5 показывает, что применение PID-регулятора позволило существенно сократить время установления сигнала (с 178 до 26 секунд), а также полностью устранить установившуюся ошибку, что свидетельствует о высокой точности системы.

Таблица 4.4 – Прямые оценки качества системы без регулятора и с PID регулятором, настроенным по методу ZN1

Основные	№	Прямые оценки качества	Система без регулятора	Метод ZN1
	1	T_{set}	178 сек	26 сек
	2	P_{ov}	0%	14.7%
	3	M	0	0
	4	μ	0%	—
	5	w_{osc}	0	—
	6	e_{ss}	0.8318	0
Дополнительные	7	T_p	0 сек	11.83 сек
	8	T_R	99.8 сек	4.42 сек
	9	λ	—	—

Таблица 4.5 – Косвенные оценки качества системы без регулятора и с PID регулятором, настроенным по методу ZN1

№	Косвенные оценки качества	Система без регулятора	Метод ZN1
1	Запасы устойчивости по амплитуде	inf	inf
2	Запасы устойчивости по фазе	inf	136 °
3	Степень устойчивости	0.022	0.161

Несмотря на возникновение перерегулирования в размере 14.7%, данный показатель остается в пределах допустимых значений и не оказывает критического влияния на устойчивость и динамику системы. Кроме того, система демонстрирует приемлемые значения фазового запаса устойчивости (136°) и степени устойчивости (0.161), что подтверждает её устойчивое поведение при внешних воздействиях.

Таким образом, метод Циглера–Никольса позволяет обеспечить баланс между точностью, быстродействием и устойчивостью системы управления, что делает его рациональным выбором в рамках данной задачи.

5 Создание программы управления

5.1 Разработка алгоритма для программы управления

Алгоритм предназначен для реализации управления температурным режимом газов в камере сгорания. Его функционирование основано на установлении зависимости между температурой и расходом подаваемого газа. В качестве исполнительного элемента регулирования применяется клапан подачи газа. Структурная схема работы алгоритма представлена на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Блок-схема алгоритма управления температурным режимом газов в камере сгорания

5.2 Разработка программы управления расходом топлива в газотурбинном двигателе в TIA-портал

Для реализации алгоритма температурного контура в камере сгорания в среде TIA-портал требуется сформировать соответствующую аппаратную конфигурацию контроллера. В качестве основного устройства применяется контроллер Siemens (рисунок 5.2) CPU 1515–2 PN, к которому подключаются модули входных и выходных сигналов аналогового и дискретного характера. Электропитание контроллера обеспечивается через блок питания PS с номинальной мощностью 25 Вт.



Рисунок 5.2 – Конфигурация контроллера Siemens

На следующем этапе требуется сформировать таблицу символов, в которой будут зафиксированы все используемые в программе переменные, параметры и другие данные, обеспечивающие корректное функционирование алгоритма. Сформированная таблица символических обозначений (тегов) представлена на рисунке 5.3.

	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...	Comment
1	warning	Default tag table	Bool	%M0.0	☐	☒	☒	☒	Аварийная остановка
2	start	Default tag table	Bool	%M0.1	☐	☒	☒	☒	Запуск газотурбинного двигателя
3	valve air	Default tag table	Bool	%M0.2	☐	☒	☒	☒	Клапан подачи воздуха
4	compressor	Default tag table	Bool	%M0.3	☐	☒	☒	☒	Компрессор
5	compressed air	Default tag table	Bool	%M0.4	☐	☒	☒	☒	Сжатый воздух
6	KS	Default tag table	Bool	%M0.5	☐	☒	☒	☒	Камера сгорания
7	valve gas	Default tag table	Bool	%M1.0	☐	☒	☒	☒	Клапан подачи газа
8	burning	Default tag table	Bool	%M0.6	☐	☒	☒	☒	Процесс сгорания
9	flowmeter	Default tag table	Int	%MW2	☐	☒	☒	☒	Датчик расхода
10	flow	Default tag table	Real	%MD4	☐	☒	☒	☒	Расход
11	termometer	Default tag table	Int	%MW10	☐	☒	☒	☒	Термометр
12	temp	Default tag table	Real	%MD12	☐	☒	☒	☒	Температура
13	engine idling	Default tag table	Bool	%M0.7	☐	☒	☒	☒	Холостой ход
14	setpoint	Default tag table	Real	%MD16	☐	☒	☒	☒	

Рисунок 5.3 – Таблица тегов

Далее предоставлено описание функционирования разработанной программы.

При нажатии кнопки «Старт» осуществляется запуск газотурбинного двигателя, при этом формируется сигнал на открытие воздушного клапана и включение компрессора. В результате воздух начинает поступать в компрессор, где в течение 5 секунд проходит процесс сжатия.

По завершении указанного временного интервала сжатый воздух направляется в камеру сгорания. После подачи воздуха в камеру сгорания происходит открытие регулирующего газового клапана, что инициирует процесс воспламенения рабочей смеси.

Данные с расходомера обрабатываются с помощью блока масштабирования (Scale) для определения текущего расхода газа. Колебания расхода напрямую влияют на температуру в камере сгорания. Температурный датчик передаёт сигнал в диапазоне 4–20 мА, что позволяет определить фактическое значение температуры в камере.

На основе этих данных осуществляется регулировка расхода газа путём управления положением регулирующего клапана в соответствии с заданной логикой.

Алгоритм реализован в среде TIA Portal внутри основного организационного блока OB1. Логическая структура программы и ключевые этапы работы представлены на рисунках 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 и 5.8.

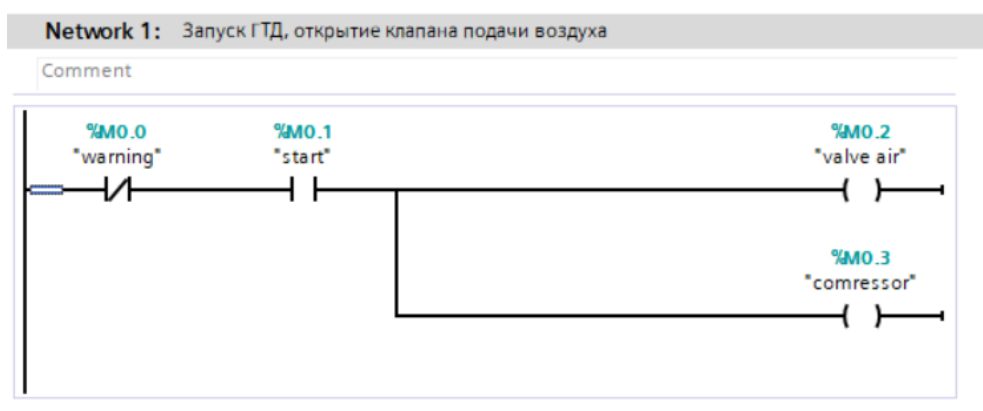


Рисунок 5.4 – Процесс запуск газотурбинного двигателя, открытие клапана подачи воздуха

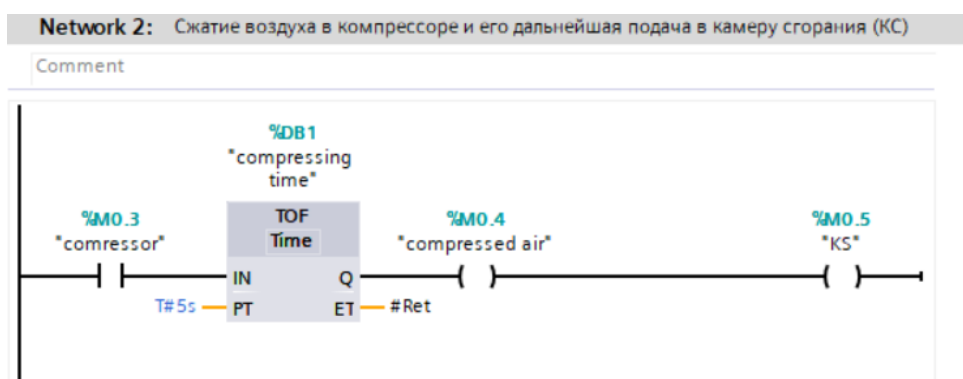


Рисунок 5.5 – Сжатие воздуха и процесс подачи воздуха в КС

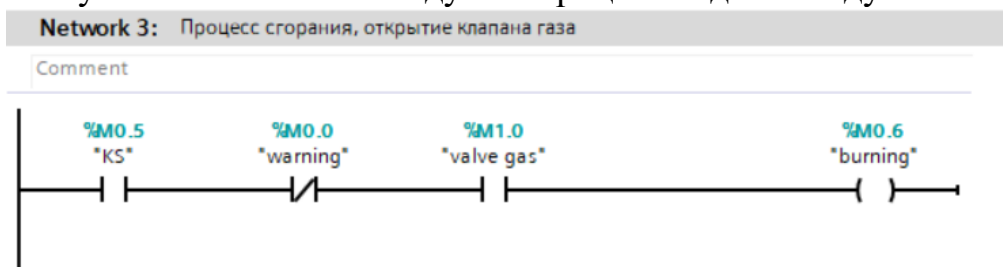


Рисунок 5.6 – Процесс сгорания

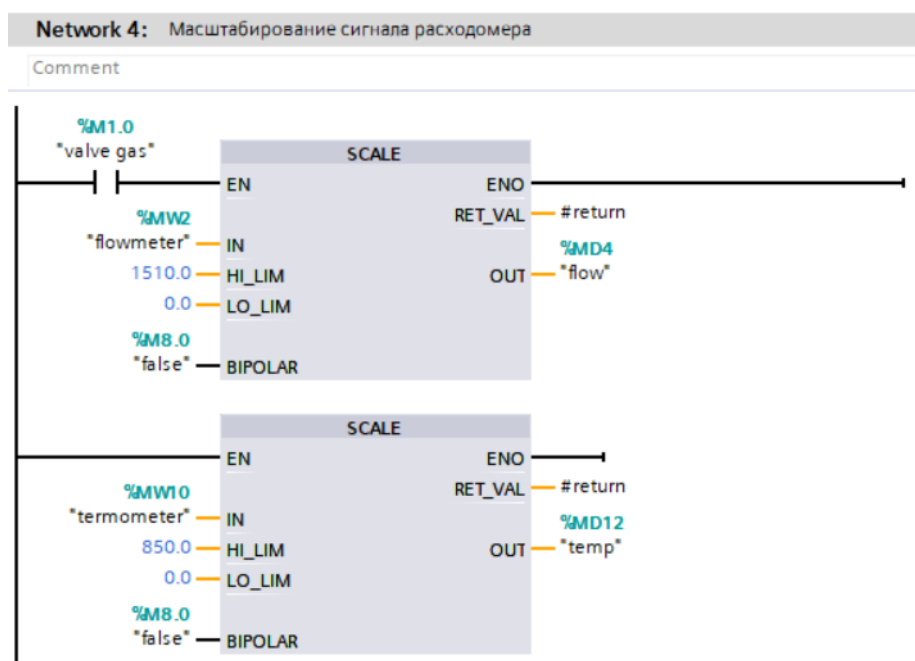


Рисунок 5.7 – Масштабирования аналоговых сигналов расходомера и термометра

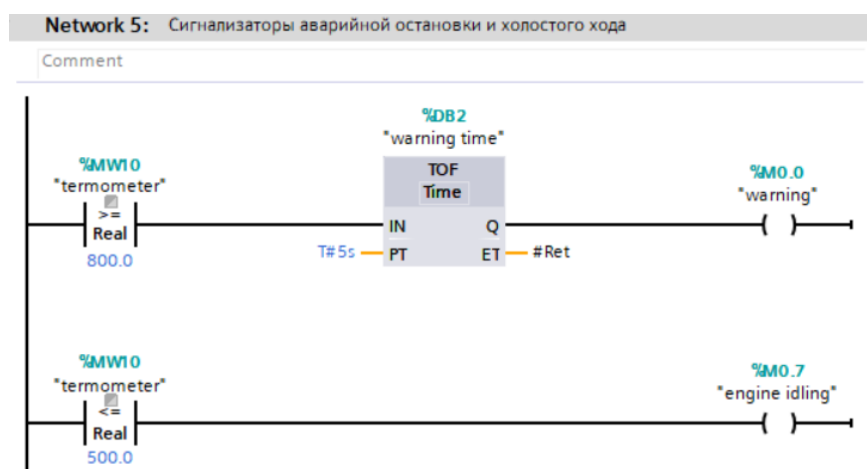


Рисунок 5.8 – Логика функционирования системы аварийной остановки и индикации холостого режима

5.3 Разработка визуализации работы газотурбинной установки с использованием панели оператора НМІ

В программной среде TIA Portal была разработана визуализация работы газотурбинной установки с использованием панели оператора НМІ (Рисунок 5.9). Интерфейс реализован на основе ранее составленной функционально-структурной схемы, что обеспечило логичную и последовательную взаимосвязь между элементами управления и визуального отображения процессов.

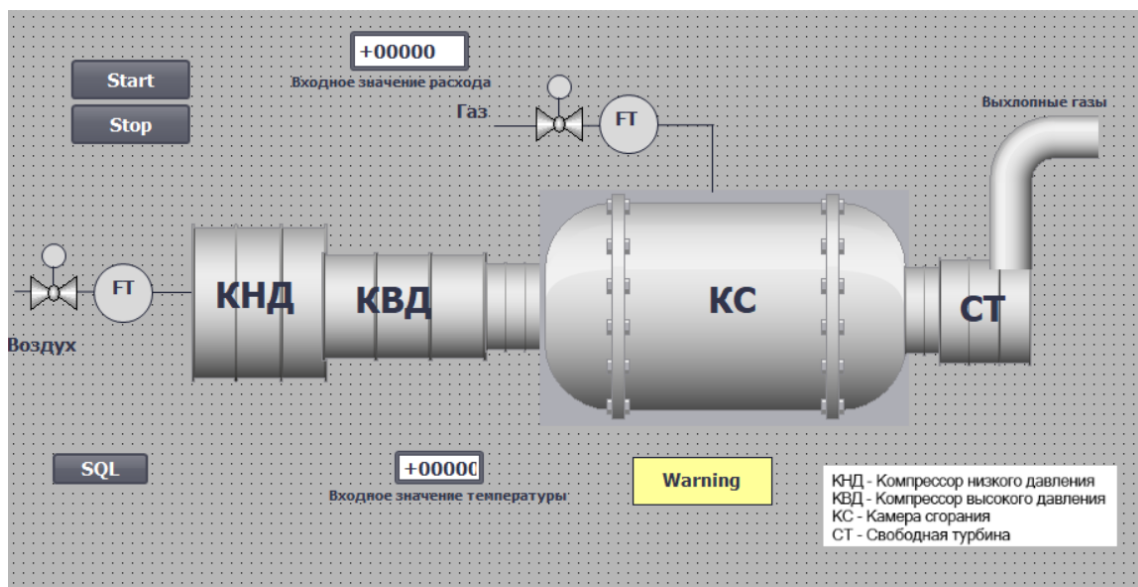


Рисунок 5.9 – Визуализация работы газотурбинной установки

На экране представлены все ключевые узлы установки: компрессор низкого давления (КНД), компрессор высокого давления (КВД), камера сгорания (КС) и свободная турбина (СТ). Поток воздуха и газа проходит через установленные расходомеры, значения которых визуализируются в цифровом виде. Температура, измеряемая в камере сгорания, поступает с датчика, формирующего аналоговый сигнал в диапазоне 4–20 мА, и также отображается на панели НМІ.

Запуск установки осуществляется посредством кнопки Start, по нажатию которой активируются все исполнительные механизмы: открываются клапаны подачи воздуха и газа, запускается компрессор, после чего происходит подача сжатого воздуха в камеру сгорания. В случае штатной работы двигателя отображается зелёный прямоугольный индикатор, подтверждающий нормальное состояние системы. При возникновении аварийной ситуации область «Warning» подсвечивается красным цветом, сигнализируя оператору о необходимости вмешательства.

Для завершения работы предусмотрена кнопка Stop, реализующая штатную или аварийную остановку установки.

Таким образом, интерфейс панели оператора, собранный в соответствии с

функционально-структурной схемой, обеспечивает наглядную визуализацию технологического процесса, удобство управления, оперативную индикацию текущих параметров и своевременное оповещение об отклонениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного дипломного проекта была реализована разработка автоматизированной системы управления газотурбинным двигателем Siemens SGT-100.

В первой главе рассмотрены принцип действия ГТД, его режимы функционирования и основные области применения, а также дана общая характеристика конструкции и состава узлов газотурбинной установки. В качестве объекта автоматизации выбран газотурбинный двигатель Siemens SGT-100.

Вторая глава посвящена определению точек измерения и построению общей архитектуры автоматизированной системы управления. На её основе была сформирована централизованная структура управления процессами ГТД.

Третья глава включает в себя построение функциональной схемы автоматизации и выбор контрольно-измерительных приборов и оборудования.

В четвёртой главе сформулирована задача синтеза системы регулирования температуры в камере сгорания на основе обратной связи. С использованием данных дроссельной характеристики в среде System Identification Toolbox была построена математическая модель, прошедшая анализ динамических свойств в замкнутом и разомкнутом виде. Устойчивость оценивалась на основе первого метода Ляпунова. Затем были рассчитаны оценки качества, по которым определялись требования к синтезу регулятора. В качестве метода настройки использовался алгоритм Циглера–Никольса. Также был реализован комбинированный принцип управления: при отклонении параметров переходного процесса применялся PI-регулятор, настроенный вручную для компенсации и повышения стабильности работы системы. Это решение позволило устранить отклонение и минимизировать перерегулирование.

Пятая глава включает программную реализацию алгоритма управления в среде TIA Portal. Была создана структура программных блоков, обеспечивающих управление температурой в камере сгорания на основе расхода топлива, а также реализованы логики переключения режимов работы двигателя. Основой системы управления выступал контроллер Siemens S7-1515–2 PN с модулями ввода-вывода.

Таким образом, автоматизированная система управления газотурбинной установкой Siemens SGT-100 была успешно спроектирована, смоделирована и реализована, что подтверждает достижение поставленных целей дипломного проекта.

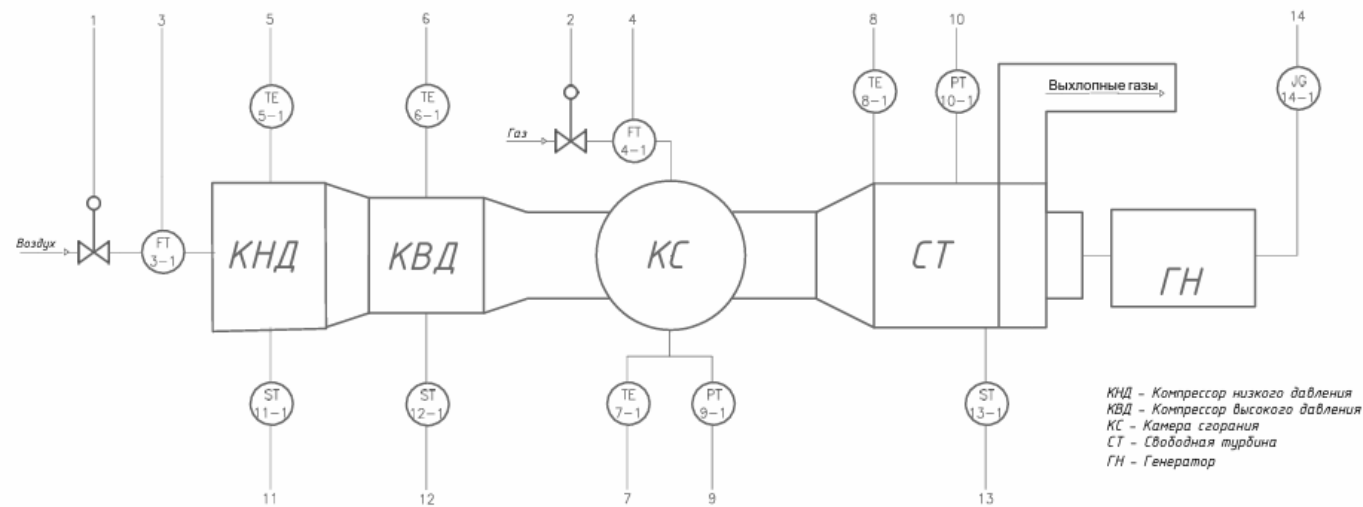
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Арбеков а., Вараксин а., Иванов в., Манушин э., Михальцев в., Моляков в., Троицкий н. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок. – М.: Издательство, 2017. – 680 с.
- 2 Злобин В.Г., Верхованцев А.А. Газотурбинные установки. Часть 1. Тепловые схемы. Термодинамические циклы: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2020. – 114 с.
- 3 Елистратова А.О., Кроха А.М., Устинов Н.А. Сравнение паротурбинной и газотурбинной установки для комбинированной выработки энергии в ЦТП // Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании. Сб. трудов II Международной науч.-практ. конф. – 2020. – С. 18–22.
- 4 Siemens AG. Газовая турбина SGT-100: техническое описание. – Erlangen: Siemens Energy, 2020. – 16 с.
- 5 Лapidус В.А., Осипов В.В., Паневин В.В. Автоматизация технологических процессов: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2021. – 400 с
- 6 Иванов В.Л., Манушин Э.А. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 536 с.
- 7 Воробьев В.Ю., Саблина Г.В. Расчёт и оптимизация параметров дискретного ПИД-регулятора методом Циглера–Николса // Автоматика и программная инженерия. – 2019. – № 1(27). – С. 9–14.
- 8 Гуляева Д.Р., Киселев А.В. Применение методов Ляпунова для исследования устойчивости систем // Информационные системы и технологии. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2016. – С. 40–44.
- 9 Гарбарт А.И., Саенко Я.Д. SIMULINK и MATLAB System Identification Toolbox – инструментарий современного инженера // Международный студенческий научный вестник. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018. – № 5. – С. 148.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Функциональная схема автоматизации газотурбинного двигателя

Поз.	Наименование	Кол.	Примечание
1	Клапан электромагнитный	1	ASCO 551 Series
2	Топливо-регулирующий клапан	1	Woodward 8400D
3,4	Расходомер вихревой	2	Endress+Hauser Promass Q 100
5,6,7,8	Термоэлектрический преобразователь температуры	4	Siemens SITRANS TS500
9,10	Датчик давления	2	Kistler 6021B
11,12,13	Тахометр оптический	1	Fluke 930
14	Прибор для измерения мощности	1	



ПРИБОРЫ ПО МЕСТУ		1	2	3	4	5	8	9	10	11	12	13	14
ПРИБОРЫ НА ЩИТЕ		HS 1-1	HS 2-1	FT 3-1	FT 4-1	TE 5-1	TE 8-1	PT 9-1	PT 10-1	ST 11-1	ST 12-1	ST 13-1	14-2
PLC	AI												
	AO												
	DI												
	DO												
	I												
SCADA	R												
	C												
	A												
	S												

Изм.	Кол.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Приложение А			
Зав.Каф.	Сарсенбаев Н.С.					Разработка автоматизированной системы управления газотурбинным двигателем	Литера	Масса	Масштаб
Нормоконтр.	Манатов К. А.								
Руков.	Кулакова Е. А.					Функциональная схема автоматизации газотурбинного двигателя	Кафедра АиУ		
Студент	Есентаев Д. А.								

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

На дипломный проект
Есентаев Даниил Абаевич
6B07103-Автоматизация и роботизация

Тема: «Разработка автоматизированной системы управления газотурбинным двигателем»

Перед дипломантом ставилась задача разработки автоматизированной системы управления газотурбинным двигателем.

В первой главе студент рассмотрел принцип работы газотурбинного двигателя и его области применения. Основные компоненты двигателя были подробно описаны, что позволило перейти к рассмотрению конкретного объекта управления – газотурбинного двигателя Siemens SGT-100.

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

В третьем разделе была построена функциональная схема автоматизации ГТД, а также был осуществлён подбор приборов.

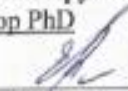
Четвёртая глава включает построение математической модели контура регулирования температуры камеры сгорания с использованием метода параметрической идентификации в среде MATLAB (System Identification Toolbox). Проведён синтез регулятора с применением трёх ПИД-регуляторов, настроенных по методу Циглера-Никольса, с целью выбора оптимального алгоритма управления.

Пятый раздел состоит из программной реализации контура управления температурой камеры сгорания и автоматизация режимов работы двигателя с использованием программируемого логического контроллера Simatic S7-1500. Реализация выполнена в среде TIA Portal с разработкой интерфейса оператора (HMI).

Студент продемонстрировал высокий уровень теоретической подготовки, способность к аналитическому мышлению и навыки практической реализации сложных инженерных решений.

Заключение: считаю, что дипломант полностью справился с поставленной задачей. Дипломный проект соответствует требованиям, предъявляемым к проектам по специальности 6B07103 – Автоматизация и роботизация. На основании характера и уровня выполненных исследований, а также качества достигнутых результатов Есентаев Даниил Абаевич допускается к защите.

Научный руководитель
доктор PhD


(подпись) Кулакова Е. А.
«16» 06 2025 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект студента
Есентаев Даниял Абиевич
6В07103 – Автоматизация и роботизация

На тему: Разработка автоматизированной системы управления газотурбинным двигателем.

Выполнено:

- а) презентация на __ слайдах
- б) пояснительная записка на __ страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

В представленном дипломном проекте описано создание автоматизированной системы управления газотурбинным двигателем.

В начальном разделе работы приведены теоретические основы функционирования газотурбинного двигателя. Описаны его устройство и принцип работы, а также обоснован выбор данного двигателя в качестве объекта управления.

Следующий раздел посвящён проектированию автоматизированной системы управления, в том числе выбору её структуры и определению ключевых точек контроля и регулирования.

В третьей части разработана функциональная схема автоматизации. На её основе подобран комплекс необходимых датчиков и исполнительных устройств.

Четвёртый раздел включает анализ и синтез системы регулирования температуры в камере сгорания. Математическая модель получена методом параметрической идентификации с использованием инструмента System Identification Toolbox в среде MATLAB. Синтез регулятора выполнен путём сравнения трёх ПИД-регуляторов, настроенных по эмпирическому методу Циглера-Никольса.

В пятой части представлена программная реализация алгоритма управления температурой в камере сгорания, а также автоматизация режимов работы двигателя на базе программируемого логического контроллера Simatic S7-1500. Алгоритм управления разработан в среде TIA Portal, дополнительно создан интерфейс оператора (HMI).

Материал изложен последовательно, чётко и на профессиональном уровне. Оформление соответствует ГОСТу.

Оценка работы

Считаю, что дипломный проект заслуживает оценки «90», а студент Есентаев Д. А. присвоения степени бакалавра по направлению 6В07103 – Автоматизация и роботизация.

Рецензент
доц. профессор, доцент кафедры Автоматизация и управление,
АУЭС им. С. Дуукеева

Оракбаев Е. Ж.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ессентаев Даниил Абасвич

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Разработка автоматизированной системы управления газотурбинным двигателем

Научный руководитель: Елена Кулакова

Коэффициент Подобия 1: 14.7

Коэффициент Подобия 2: 5.8

Микропробелы: 4

Знаки из других алфавитов: 1

Интервалы: 12

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

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

Дата

16.06.2021

 проверяющий эксперт
Кулакова Е.А.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Есентаев Даниил Абасович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Разработка автоматизированной системы управления газотурбинным двигателем

Научный руководитель: Елена Кулакова

Коэффициент Подобия 1: 14.7

Коэффициент Подобия 2: 5.8

Микропробелы: 4

Знаки из других алфавитов: 1

Интервалы: 12

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