

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»
Отделение автоматизации и робототехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

| Тема работы |
|--|
| Система управления температурой рабочей камеры макета химического реактора УДК 681.51.01:66.023.2-97 |

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------|---------|------|
| 8Т4Б | Михеева Оксана Викторовна | | |

Руководитель ВКР

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------|----------------------|---------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель ОАР | Тутов Иван Андреевич | — | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------|----------------------------|---------------------------|---------|------|
| Ст. преподаватель ОСГН | Хаперская Алена Васильевна | — | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|------------------------|---------------------------|---------|------|
| Ассистент ИШХБМТ | Невский Егор Сергеевич | — | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Руководитель ООП | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|---------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент ОАР | Громаков Евгений Иванович | к.т.н. | | |

| Руководитель ОАР | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|----------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент ОАР | Леонов Сергей Владимирович | к.т.н. | | |

Томск – 2018 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

| Код результата | Результат обучения (выпускник должен быть готов) |
|--|---|
| <i>Профессиональные компетенции</i> | |
| P1 | Демонстрировать базовые естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств. Уметь сочетать теорию, практику и методы для решения инженерных задач, и понимать область их применения |
| P2 | Иметь осведомленность о передовом отечественном и зарубежном опыте в области теории, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств. |
| P3 | Применять полученные знания для определения, формулирования и решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных систем автоматизации технологических процессов и производств с использованием передовых научно–технических знаний и достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств. |
| P4 | Уметь выбирать и применять соответствующие аналитические методы и методы проектирования систем автоматизации технологических процессов и обосновывать экономическую целесообразность решений. |
| P5 | Уметь находить необходимую литературу, базы данных и другие источники информации для автоматизации технологических процессов и производств. |
| P6 | Уметь планировать и проводить эксперимент, интерпретировать данные и их использовать для ведения инновационной инженерной деятельности в области автоматизации технологических процессов и производств. |
| P7 | Уметь выбирать и использовать подходящее программно–техническое оборудование, оснащение и инструменты для решения задач автоматизации технологических процессов и производств. |
| <i>Универсальные компетенции</i> | |
| P8 | Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий. |
| P9 | Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за риски и работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации технологических процессов и производств, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам |
| P10 | Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду. |
| P11 | Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности. |

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»
Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

(Подпись) _____ (Дата) Громаков Е. И.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|----------------------------|
| 8Т4Б | Михеевой Оксане Викторовне |

Тема работы:

| | |
|--|--------------------------|
| Система управления температурой рабочей камеры макета химического реактора | |
| Утверждено приказом директора (дата, номер) | №2183/с от 28.03.2018 г. |

Срок сдачи студентом выполненной работы: _____

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

| | |
|---------------------------------|--|
| Исходные данные к работе | <ul style="list-style-type: none">- Учебный стенд «Программно-аппаратный комплекс стабилизации температуры в химическом реакторе с водяной рубашкой»- Техническая документация к стенду- Набор экспериментальных данных для проведения идентификации объекта |
|---------------------------------|--|

| | |
|---|---|
| Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов | <ul style="list-style-type: none"> - Получение математической модели объекта управления - Проведение идентификации для определения неизвестных параметров - Линеаризация объекта управления в рабочей точке - Синтез регулятора для управления макетом химического реактора различными методами. Требования к качествам переходного процесса: минимальное время переходного процесса без перерегулирования - Проведение сравнительного анализа представленных и исследованных методов синтеза и выбор наилучшего |
| Перечень графического материала | |
| Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы | |
| Раздел | Консультанты |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Хаперская Алена Васильевна |
| Социальная ответственность | Невский Егор Сергеевич |
| Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: | |
| _____ | |

| | |
|---|--|
| Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику | |
|---|--|

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------|----------------------|------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель ОАР | Тутов Иван Андреевич | _____ | | |

Задание принял студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------|---------|------|
| 8Т4Б | Михеева Оксана Викторовна | | |

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»
Уровень образования Бакалавриат
Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники
Период выполнения осенний/весенний семестр 2017/2018 учебного года

Форма представления работы:

| |
|--|
| бакалаврская работа <small>(бакалаврская работа, дипломный проект/работы, магистерская диссертация)</small> |
|--|

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

| | |
|--|--|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | |
|--|--|

| Дата контроля | Название раздела (модуля)/ вид работы (исследования) | Максимальный балл раздела (модуля) |
|---------------|---|------------------------------------|
| 21.05.2018 | Основная часть | 75 |
| 25.05.2018 | Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | 15 |
| 30.05.2018 | Социальная ответственность | 10 |

Составил преподаватель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------|----------------------|------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель ОАР | Тутов Иван Андреевич | _____ | | |

СОГЛАСОВАНО:

| Руководитель ООП | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|---------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОАР | Громаков Евгений Иванович | к.т.н. | | |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

| | |
|--------|---------------------------|
| Группа | ФИО |
| 8Т4Б | Михеева Оксана Викторовна |

| | | | |
|---------------------|----------|---------------------------|--|
| Школа | ИШИТР | Отделение | Автоматизации и робототехники |
| Уровень образования | Бакалавр | Направление/специальность | 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств |

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

| | |
|--|--|
| 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих | Оклады участников проекта, нормы рабочего времени, ставки налоговых отчислений во внебюджетные фонды, районный коэффициент |
| 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов | |
| 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования | |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|---|---|
| - Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения | Определение назначения объекта и определение целевого рынка |
| - Планирование и формирование бюджета научных исследований | Планирование этапов работ, составление графика работ |
| - Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования | Оценка сравнительной эффективности проекта |

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

| |
|--|
| 1. Анализ конкурентных технических решений |
| 2. График проведения НИ |

| | |
|---|--|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | |
|---|--|

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|----------------------------|----------------------------|------------------------|---------|------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| Старший преподаватель ОСГН | Хаперская Елена Васильевна | — | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|--------|---------------------------|---------|------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| 8Т4Б | Михеева Оксана Викторовна | | |

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| | |
|---------------|---------------------------|
| Группа | ФИО |
| 8Т4Б | Михеева Оксана Викторовна |

| | | | |
|----------------------------|--------------|----------------------------------|--|
| Школа | ИШИТР | Отделение | Автоматизации и робототехники |
| Уровень образования | Бакалавр | Направление/специальность | 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств |

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

| | |
|--|--|
| 1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения | Система управления температурой рабочей камеры макета химического реактора |
|--|--|

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|--|--|
| – Состав системы | В данном разделе указывается то, что используется в разработанной системе. |
| – Принцип работы системы | Дается описание структуре системы и взаимодействия всех ее частей между собой. |
| – Методы защиты различных частей системы | Дается описание возможным методам защиты от несанкционированного доступа, повреждения информации. Также идет речь об аппаратном резервировании для повышения надежности системы. |
| – Факторы влияющие на человека | В данном разделе сообщается о факторах, влияющих на человека. |
| – Удобство в использовании | Анализ системы с точки зрения удобства использования. |
| – Надежность системы | Производится анализ надежности разработанной части системы. |

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|------------------|------------------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| Ассистент ИШХБМТ | Невский Егор Сергеевич | — | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|---------------|---------------------------|----------------|-------------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| 8Т4Б | Михеева Оксана Викторовна | | |

Глоссарий

| Термин | Определение |
|---|--|
| Технологический процесс (ТП) | Технологический процесс – последовательность технологических операций, необходимых для выполнения определенного вида работ. Технологический процесс состоит из рабочих операций, которые в свою очередь складываются из рабочих движений (приемов) |
| SCADA (англ. Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных) | Под термином SCADA понимают инструментальную программу для разработки программного обеспечения систем управления технологическими процессами в реальном времени и сбора данных |
| Объект управления | Объект управления – обобщающий термин кибернетики и теории автоматического управления, обозначающий устройство или динамический процесс, управление поведением которого является целью создания системы автоматического управления |
| Программируемый логический контроллер (ПЛК) | Программируемый логический контроллер или программируемый контроллер – специализированное компьютеризированное устройство, используемое для автоматизации технологических процессов. В отличие от компьютеров общего назначения, ПЛК имеют развитые устройства ввода-вывода сигналов датчиков и исполнительных механизмов, приспособлены для длительной работы без серьезного обслуживания, а также для работы в неблагоприятных условиях окружающей среды. ПЛК являются устройствами реального времени. |
| Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор | Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор – устройство, используемое в системах автоматического управления для поддержания заданного значения измеряемого параметра. ПИД-регулятор измеряет отклонение стабилизируемой величины от заданного значения (установки) и выдает управляющий сигнал, являющийся суммой трех |

| | |
|--|--|
| | <p>слагаемых, первое из которых пропорционально этому отклонению, второе пропорционально интегралу отклонения и третье пропорционально производной отклонения.</p> |
| <p>Система автоматического регулирования (САР)</p> | <p>Автоматически действующая система, которая в течение достаточно длительного времени поддерживает требуемое значение некоторой физической величины в каком-либо процессе или изменяет это значение по заранее заданной программе. Независимо от назначения всякая система автоматического регулирования включает в себя регулируемый объект и регулятор.</p> |

Реферат

Пояснительная записка содержит 84 страниц машинописного текста, 25 таблиц, 41 рисунок, 1 список использованных источников из 24 наименований, 3 приложения.

Цель работы – разработка системы управления температурой в рабочей камере макета химического реактора, получение математической модели объекта исследования и синтез регулятора, который позволяет достичь заданного значения температуры без перерегулирования и за минимальное время переходного процесса.

В данном проекте была разработана система управления температурой в рабочей камере химического ректора, была получена математическая модель объекта, выполнено моделирование переходных процессов в пакете прикладных программ *MATLAB&Simulink* для анализа динамики САР, настроен ПИД-регулятор.

Разработанная система управления температурой гарантирует, что переходный процесс в системе будет протекать без перерегулирования и за минимальное время.

Ниже представлен перечень ключевых слов:

ХИМИЧЕСКИЙ РЕАКТОР, ВОДЯНАЯ РУБАШКА, СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ, РЕГУЛЯТОР С ДВМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ, ПИД-РЕГУЛЯТОР, ПРОГРАММИРУЕМЫЙ ЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЛЕР.

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение..... | 14 |
| 1. Основная часть | 15 |
| 1.1. Описание технологического процесса..... | 15 |
| 1.2. Описание учебного стенда..... | 16 |
| 1.3. Состав учебного стенда..... | 19 |
| 1.3.1. Контроллерное оборудование | 19 |
| 1.3.2. Датчик температуры..... | 20 |
| 1.3.3. Датчик тока..... | 20 |
| 1.3.4. Циркуляционный насос..... | 21 |
| 1.4. Математическая модель химического реактора | 21 |
| 1.5. Идентификация объекта управления | 27 |
| 1.6. Линеаризация объекта управления в рабочей точке | 28 |
| 1.7. Настройка регулятора..... | 31 |
| 1.7.1. Настройка регулятора метод Циглера-Никольса..... | 31 |
| 1.7.2. Настройка регулятора методом <i>CHR</i> | 35 |
| 1.7.3. Автоматизированная настройка ПИД-регулятора | 41 |
| 1.7.4. Регулятор с двумя степенями свободы..... | 45 |
| 1.8. Анализ результатов синтеза регулятора..... | 51 |

| | |
|--|----|
| 1.9. Отработка внешних возмущений | 53 |
| 2. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..... | 56 |
| 2.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения..... | 56 |
| 2.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования | 56 |
| 2.1.2. Анализ конкурентных технических решений..... | 57 |
| 2.2. SWOT – анализ | 59 |
| 2.3. Структура работ в рамках научного исследования | 61 |
| 2.3.1. Определение трудоемкости выполнения работ | 61 |
| 2.3.2. Разработка графика проведения научного исследования..... | 63 |
| 2.4. Бюджет научно-технического исследования | 66 |
| 2.4.1. Материальные затраты | 66 |
| 2.4.2. Основная заработная плата исполнителей темы | 66 |
| 2.4.3. Дополнительная заработная плата исполнительской | 67 |
| 2.4.4. Отчисление во внебюджетные фонды (страховые отчисления) | 68 |
| 2.4.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта | 69 |
| 2.5. Эффективность исследования..... | 69 |

| | |
|---|----|
| 3. Социальная ответственность..... | 71 |
| 3.1. Аннотация | 71 |
| 3.2. Введение..... | 71 |
| 3.3. Состав системы | 72 |
| 3.4. Методы защиты SCADA | 74 |
| 3.5. Методы защиты OPC | 75 |
| 3.6. Методы обеспечения безопасности Ethernet..... | 75 |
| 3.7. Методы защиты программы ПЛК | 76 |
| 3.8. Влияние на человека | 77 |
| 3.9. Удобство в использовании | 77 |
| 3.10. Надежность системы | 78 |
| Заключение | 79 |
| Список используемых источников..... | 80 |
| Приложение А Функциональная схема технологического процесса.. | 82 |
| Приложение Б Иерархическая схема стенда..... | 83 |
| Приложение В Структурная схема системы САР | 84 |

Введение

Некоторые технологические процессы требуют управления, которое бы обеспечивало строго заданные качества переходного процесса. Одним из таких процессов является протекание химической реакции внутри реактора. В ходе реакции требуется поддержание температуры внутри на заданном уровне. Важным требованием к такой системе является отсутствие перерегулирования. При этом, желательно, чтобы переходный процесс завершился за минимально возможное время. Таким образом, недостаточно знать лишь выходную величину системы, а саму систему воспринимать как черный ящик. Для повышения качества регулирования необходимо иметь математическое описание внутренних параметров и структуры системы.

При получении математической модели чаще всего используют теоретические методы, основанные на знании законов физики, стандартных распределений, теории вероятности и т.д. Но для получения математической модели, которая бы максимально полно соответствовала бы реальному объекту, необходимо применить и экспериментальные методы идентификации систем.

Таким образом получение математических моделей объектов должно проводиться с применением как теоретических знаний, так и экспериментальных, полученных в ходе проведения различных опытов. [1].

Для того, чтобы отработать методологию получения практически пригодных математических моделей, необходимо получить математическое описание макета химического реактора. Также для данной модели необходимо синтезировать ПИД-регулятор, для того, чтобы температура в рабочей камере химического ректора достигала уставки за минимальное время без перерегулирования.

1. Основная часть

1.1. Описание технологического процесса

Схема технологического процесса (Приложение А), который протекает в химическом реакторе, представлена на рисунке 1. Регулируемой величиной является температура внутри рабочей камеры (РК) химического реактора. Температуру внутри рабочей камеры необходимо поддерживать на заданном уровне. Важным критерием является то, что во время протекания переходного процесса перерегулирование недопустимо, т.к. все химические процессы требуют строго заданной температуры с погрешностью ± 2 . Несоблюдение данного критерия может повлечь большие финансовые потери для производства, т.к. течение реакции при иной температуре может привести к полной остановке производства и разборке реактора по причине того, что внутри рабочей камеры будут находиться нежелательные продукты химической реакции.

Рабочая камера помещена внутри водяной рубашки (ВР). Внутри водяной рубашки находится вода, которая нагревается нагревателем (Н). Вода в водяной рубашке нагреваясь, передает свое тепло в рабочую камеру, тем самым оказывая управляющее воздействие на жидкость в рабочей камере.

Равномерный нагрев жидкости обеспечивается за счет циркуляционных насосов Н-2 и Н-3. Перемешивая жидкость внутри рабочей камеры и водяной рубашки, вода во всех частях объекта управления будет иметь одинаковую температуру.

Для быстрой закачки жидкости в рабочую камеру реактора используется насос Н-1, а для быстрой откачки – насос Н-4. С помощью них, не производя манипуляции над макетом, можно симитировать возмущающее воздействие.

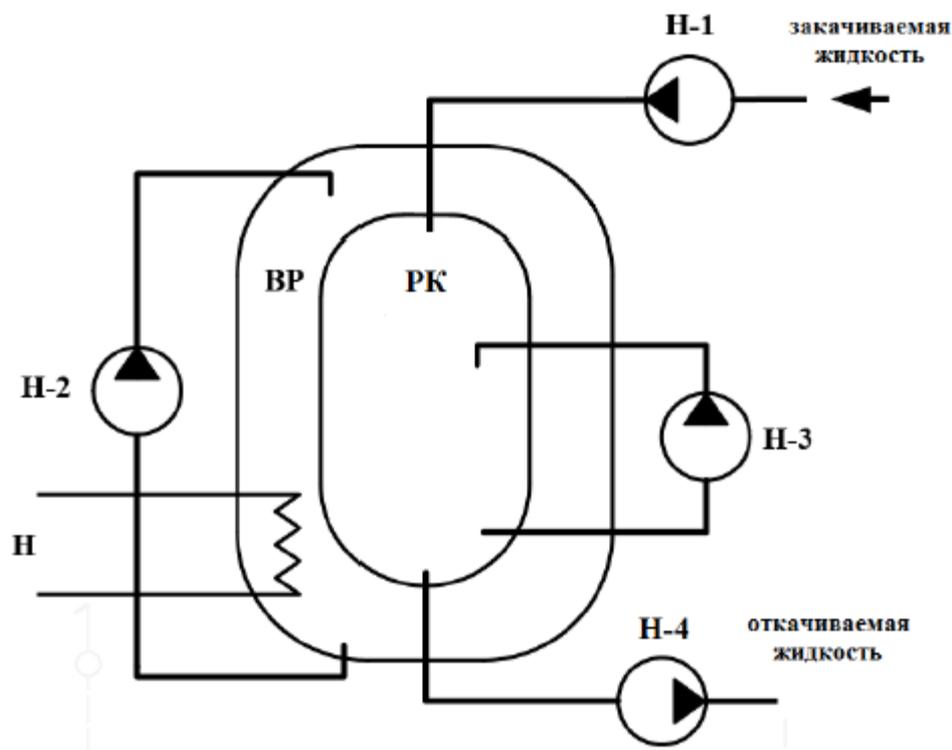


Рисунок 1 – Схема технологического процесса

1.2. Описание учебного стенда

Химический реактор – это агрегат для проведения химических реакций объемом от нескольких миллилитров до сотен кубометров, являющийся зачастую объектом повышенной опасности. Целью работы такой установки является выработка конечного продукта из исходных компонентов при соблюдении устойчивого и стабильного режима проведения реакции для достижения максимальной эффективности процесса.

Учебный стенд «Программно-аппаратный комплекс стабилизации температуры в химическом реакторе с водяной рубашкой» предназначен для обучения учащихся по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Он упрощает усвоение информации и позволяет закрепить полученные знания, а также его можно использовать в ряде образовательных дисциплин при проведении лабораторных работ по испытанию новых методов управления и настройке регуляторов [4].

Рабочая камера химического реактора учебного стенда представляет собой стеклянную банку, внутри которой находится вода. Банка плотно закрыта крышкой для изоляции от прямого воздействия температуры окружающей среды. В крышке проделано отверстие для датчика температуры.

Стеклянная банка помещается в пластиковый контейнер. Пластиковый контейнер играет роль водяной рубашки. Контейнер также, как и банка плотно закрыт крышкой. По периметру в зазор между банкой и контейнером уложен нагреватель, а на поверхности закреплен датчик температуры. В качестве нагревателя будет использована сборка из резисторов.

В качестве нагреваемой среды в контейнере используется дистиллированная вода, потому что она является плохим проводником электрического тока. Такой выбор обусловлен тем, что было невозможно полностью изолировать нагреватель от жидкости без нарушения герметичности установки.

Равномерный нагрев жидкости в рабочей камере и водяной рубашке обеспечивается за счет циркуляционных насосов. Они перемешивают воду, тем самым обеспечивая равномерность ее температуры по всему объему.

Также в состав учебного стенда были включены два насоса, с помощью которых можно быстро откачать или закачать воду. С помощью этих насосов возможно оказание возмущающего воздействия (изменение теплоемкости продукта в результате химической реакции, имитируемое изменением объема жидкости).

Сбор информации о течении процессов учебного стенда, в систему включен программируемый логический контроллер (ПЛК). На контроллер с датчиков приходит информация о течении процессов. Также ПЛК формирует управляющее воздействие на электромагнитное реле, которое подключено к нагревателю.

Таким образом, в состав учебного стенда входят:

- Физическая модель химического реактора;

- 2 датчика температуры;
- Нагревательный элемент;
- 2 циркуляционных насоса;
- 2 насоса для откачки и закачки жидкости в рабочую камеру;
- ПЛК.

Учебный стенд позволяет изучать физические эффекты, которые протекают в химическом реакторе. Также существует возможность апробации разных методов управления процессом нагрева жидкости в рабочей камере и водяной рубашке. В ходе проведения занятий с использованием учебного стенда у студентов происходит закрепление теоретических знаний.

Учебный стенд реализует следующие задачи:

- централизованный контроль за технологическим процессом;
- передача текущей информации на АРМ;
- повышение эффективности технологического процесса;
- автоматическое регулирование температуры в рабочей камере физической модели химического реактора.

Учебный стенд позволяет измерять температуры внутри рабочей камеры и водяной рубашки, а также ток потребления циркуляционных насосов. С помощью стенда возможно осуществлять контроль состояния насосов и нагревательного элемента. Также с помощью учебного стенда существует возможность управления насосами и нагревателем.

В учебном стенде реализована индикация на дисплее АРМ параметров системы, а также сигнализация в случае аварийных ситуаций.

Иерархическая схема учебного стенда приведена в приложении Б.

1.3. Состав учебного стенда

1.3.1. Контроллерное оборудование

В состав стенда входит программируемое реле ОВЕН ПР200. Данный реле является оптимальным для решения задач автоматизации локального [5].

Данное программируемое реле имеет следующие отличительные особенности:

- Напряжение питания: 24 В;
- Встроенный источник питания 24 В для питания датчиков с аналоговым выходом (в модификации на 230 В);
- 4 аналоговых входа 4...20 мА, 0...10 В, 0...4 кОм. Могут работать в режиме дискретного входа;
- Встроенный шунтирующий резистор для входа 4...20 мА;
- Аналоговые выходы 0...10 В или 4...20 мА;
- До двух встроенных интерфейсов RS-485;
- USB порт – для программирования (USB – MiniUSB);
- Встроенные часы реального времени срок службы 10 лет;
- Гальваническая развязка входов до 2830 В.

На рисунке 2 приведен внешний вид ОВЕН ПР200.



Рисунок 2 – Внешний вид ОВЕН ПР200

1.3.2. Датчик температуры

Датчики температуры ОВЕН ДТС015-И предназначены для непрерывного измерения температуры различных рабочих сред, например: паров, газов, воды, сыпучих материалов, химических реагентов, неагрессивных к материалу корпуса датчика [6].

Датчик оснащен коммутационной головкой, защищающей соединительные клеммы от брызг и пыли, а также содержит нормирующий преобразователь, предназначенный для преобразования значения температуры, измеренной термосопротивлением в унифицированный сигнал постоянного тока 4 – 20 мА.

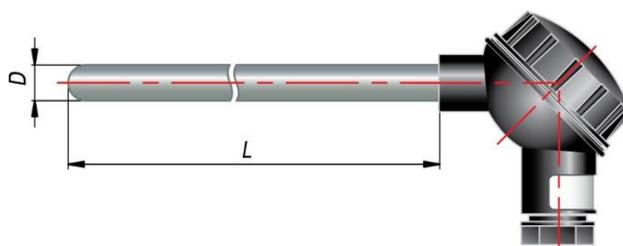


Рисунок 3 – Датчик температуры ОВЕН ДТС015-И

1.3.3. Датчик тока

Датчик тока АМЕ-8821-5 является бесконтактным преобразователем постоянного тока до 5 А [7]. В основе лежит магнитопровод, в разрез которого помещен датчик Холла, и нормирующего преобразователя. Датчик прекрасно подходит для задач мониторинга тока потребления двигателей, нагревателей и других активных нагрузок небольшой мощности.



Рисунок 4 – Датчик тока АМЕ-8821-5

1.3.4. Циркуляционный насос

Для того чтобы обеспечить равномерное прогревание жидкости в рабочей камере реактора и рубашке, используются циркуляционные насосы, предназначенные для омывания стекол в автомобилях ВАЗ 2110-2112 [8].



Рисунок 5 – Циркуляционный насос

1.4. Математическая модель химического реактора

Условная конструкция химического реактора приведена на рисунке 6. Будем использовать ее для получения математической модели.

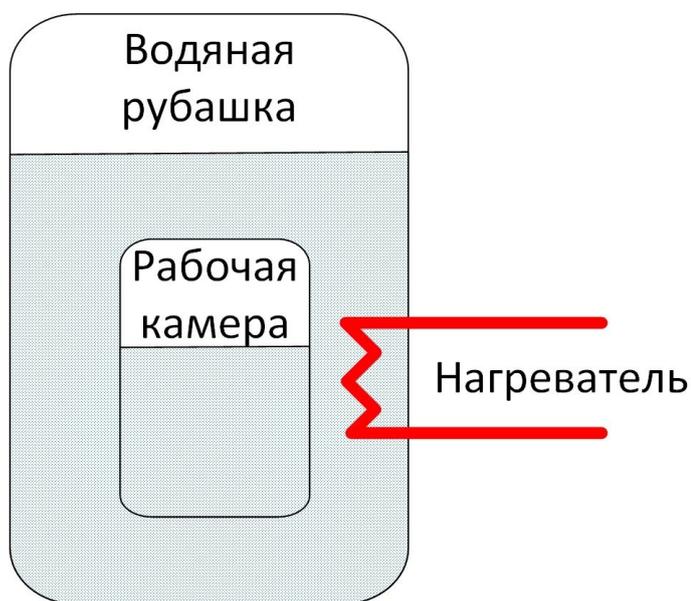


Рисунок 6 – Условная конструкция химического реактора

Рабочая камера и водяная рубашка химического реактора заполнены водой. Обмен энергией между ними происходит через стенки сосуда.

Условимся, что в системе существует два накопителя энергии – это вода в рабочей камере и в водяной рубашке. Обмен энергией между водой в

рабочей камере, водяной рубашке, окружающей среде и нагревателем происходит в соответствии с рисунком 7.



Рисунок 7 – Обмен энергией в химическом реакторе

Согласно закону сохранения энергии, энергия нагревателя идет на нагрев жидкости в водяной рубашке. Но при этом часть энергии воды в рубашке отдает рабочей камере и окружающей среде. Тогда справедливо выражение (1).

$$Q_n = Q_p - Q_{cp} - Q_{p.k.} \quad (1)$$

где

Q_n – количество теплоты, переданное нагревателем;

Q_p – количество теплоты, переданное воде в рубашке;

Q_{cp} – количество теплоты, переданное окружающему среде;

$Q_{p.k.}$ – количество теплоты, переданное воде в рабочей камере

химического реактора.

Мощность, которая рассеивается нагревателем в среде равна:

$$P = Q_n = \frac{U^2}{R_{эKB}} = K_n, \quad (2)$$

Зная это, получим участок математической модели из уравнения (1), изображенный на рисунке 8.

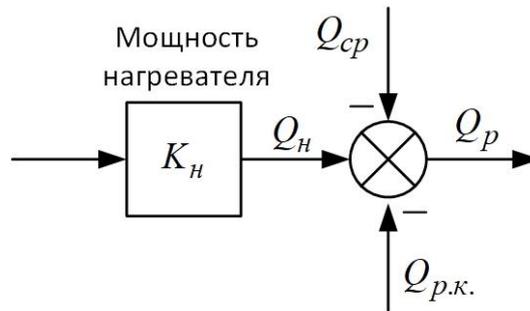


Рисунок 8 – Часть математической модели ОУ

Далее воспользуемся формулой для расчета количества теплоты, переданной телу при изменении его температуры на величину dT (3):

$$dQ = mcdT, \quad (3)$$

откуда получаем

$$Qdt = mcdT, \quad (4)$$

где

Q – количество теплоты, переданное телу за единицу времени;

m – масса нагреваемого тела;

c – удельная теплоемкость нагреваемого тела;

dT – температура, на которую нагрелось тело;

dt – время, за которое тело получало энергию.

Из формулы (4) можно получить, что вода в рубашке нагревается на величину dT равную:

$$dT = \frac{Q_p dt}{m_p c}, \quad (5)$$

где

Q_p – количество теплоты, получаемое водой в рубашке от нагревателя в единицу времени;

m_p – масса воды в рубашке;

c – удельная теплоемкость воды, равная 4200 кДж/(кг·°С).

Получая энергию от нагревателя, вода в рубашке будет нагреваться, а ее температура будет расти, следовательно, ее мгновенную температуру можно посчитать по формуле (6):

$$T_p(t) = T_{p0} + \frac{1}{m_p c} \int_0^t Q_p dt, \quad (6)$$

где

T_{p0} – начальная температура воды в рубашке.

Добавим математическую модель, описываемую уравнениями (5) и (6), к ранее приведенной (рисунок 9).

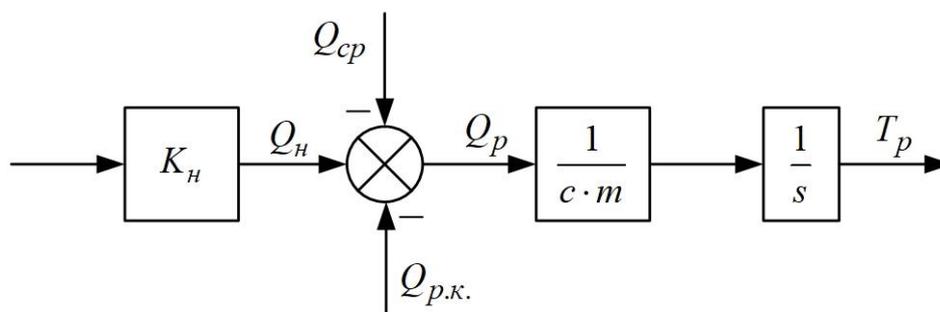


Рисунок 9 – Часть математической модели ОУ

Далее воспользуемся законом Ньютона-Рихмана (7) и (8) [9] для расчета количества теплоты, переданной окружающему воздуху и воде в рабочей камере реактора через стенки на границе раздела сред:

$$Q_{cp} = K_1(T_p - T_{cp}), \quad (7)$$

$$Q_{p.k.} = K_2(T_p - T_{p.k.}), \quad (8)$$

где

$T_p, T_{cp}, T_{p.k.}$ – температура воды в рубашке, окружающей среды и воды в рабочей камере реактора, соответственно;

K_1 – коэффициент теплопередачи стенок между водяной рубашкой и окружающей средой;

K_2 – коэффициент теплопередачи стенок между водяной рубашкой и рабочей камерой реактора.

Добавим математическую модель, описываемую уравнениями (7) и (8), к ранее приведенной (рисунок 10).

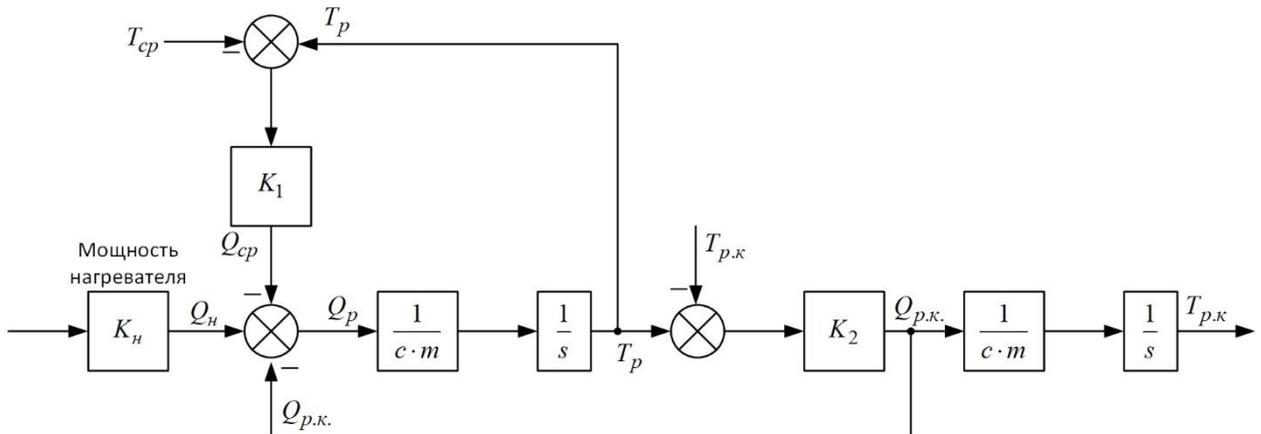


Рисунок 10 – Часть математической модели ОУ

И снова воспользуемся формулами (5) и (6) для того, чтобы рассчитать мгновенную температуру воды в рабочей камере (9):

$$T_{p.k}(t) = T_{p.k_0} + \frac{1}{m_{p.k}c} \int_0^t Q_{p.k} dt, \quad (9)$$

где

$Q_{p.k}$ – количество теплоты, получаемое водой в рабочей камере за единицу времени;

$m_{p.k}$ – масса воды в рабочей камере;

c – удельная теплоемкость воды, равная 4200 кДж/(кг·°С);

$T_{p.k_0}$ – начальная температура воды в рабочей камере.

В итоге получим математическую модель объекта, изображенную на рисунке 11.

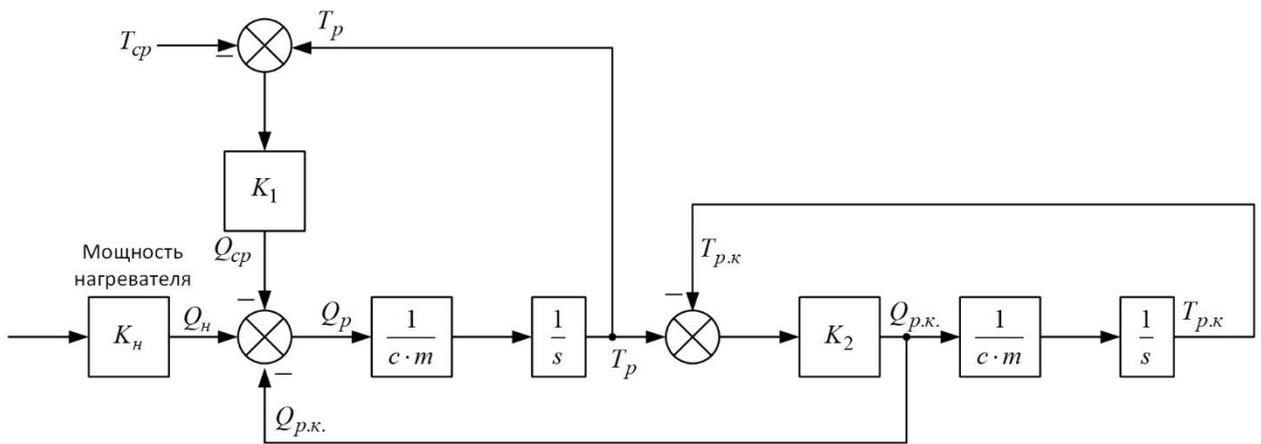


Рисунок 11 – Математическая модель ОУ

Стоит также вспомнить, что нагреватель – это инерционный объект, и ему свойственна задержка, так как он не сразу нагревается до максимального значения. Такое поведение объекта можно описать апериодическим звеном первого порядка:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1}, \quad (10)$$

где

k – коэффициент усиления (мощность нагревателя);

T – постоянная времени.

Тогда математическая модель примет вид, изображенный на рисунке 12.

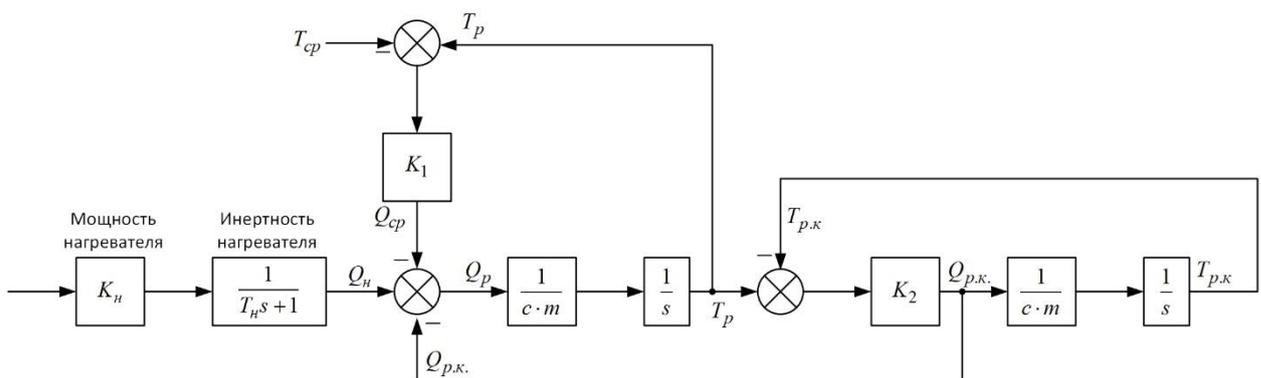


Рисунок 12 – Математическая модель ОУ

Для получения более точной математической модели ОУ введём коэффициент теплопроводности окружающей среды между рабочей камерой

и внешней средой K_3 . Таким образом получим окончательную математическую модель, представленную на рисунке 13.

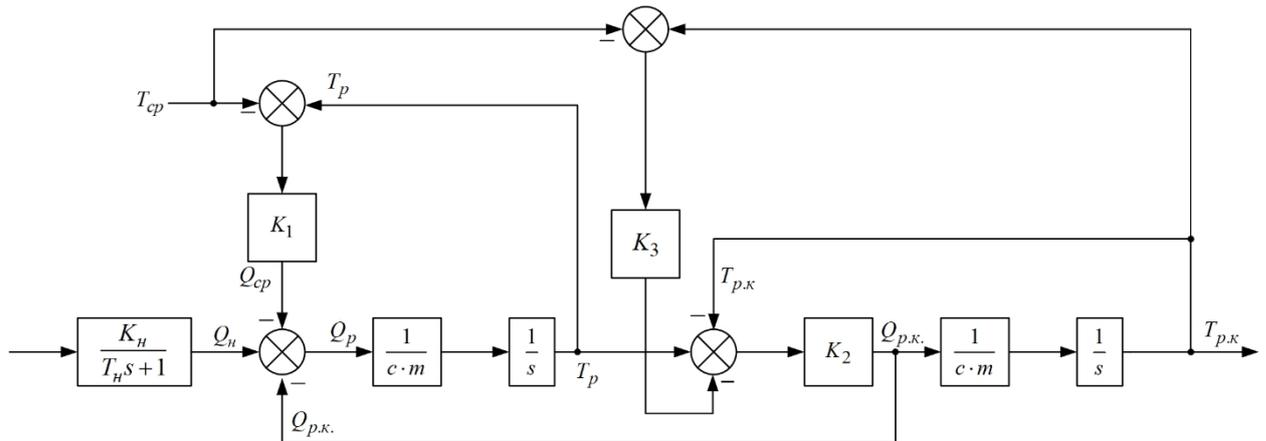


Рисунок 13 – Полная модель

1.5. Идентификация объекта управления

В математической модели объекта управления содержатся неизвестные величины. Необходимо было провести оценку неизвестных параметров, а именно коэффициентов теплопроводности K_1 , K_2 , K_3 , массы воды в водяной рубашке m_p и рабочей камере $m_{p.k}$. Также необходимо было отыскать постоянную времени нагревателя T_n .

Масса воды в рабочей камере и водяной рубашке была получена через вычисления объема жидкости внутри их:

$$V_{p.k} = 0.011 \text{ м}^3;$$

$$V_p = 0.192 \text{ м}^3.$$

Для оценки оставшихся параметров воспользуемся инструментом *Parameter Estimation Toolbox*. На объекте управления предварительно был произведен эксперимент, в ходе которого были получены данные выходных сигналах при различных управляющих воздействиях на объект. С помощью *Parameter Estimation Toolbox* возможно получить неизвестные параметры системы по экспериментальным наборам данных. На рисунке 14 приведена

структурная схема модели в *MATLAB&Simulink*. С помощью данной схемы произведем оценку параметров системы.

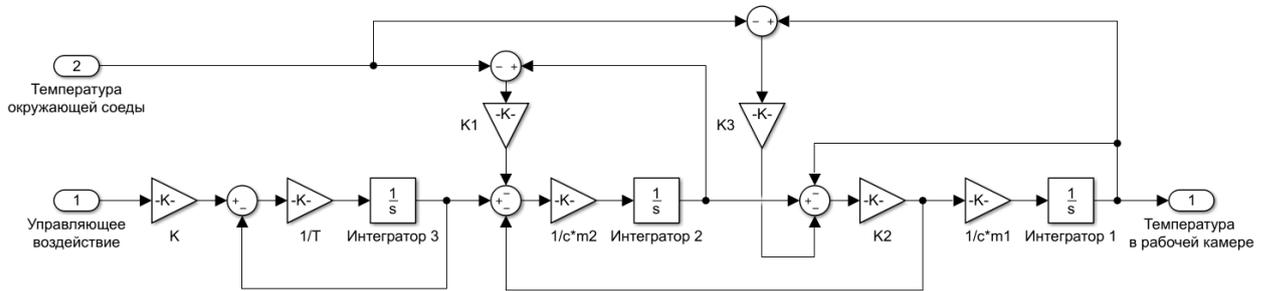


Рисунок 14 – Операторно-структурная схема в *MATLAB&Simulink*

Для того, чтобы воспользоваться данным инструментом, необходимо следующее:

1. Определение параметров модели, требующих оценки;
2. Настройка параметров процесса оценки (задание начальных значений и границ поиска по каждому параметру) и проведение самой оценки.

В итоге были подобраны следующие параметры:

$$K_1 = 0.5468;$$

$$K_2 = 1.0819;$$

$$K_3 = 3.8355 \cdot 10^{-4};$$

$$T_H = 2.9559 \text{ с.}$$

1.6. Линеаризация объекта управления в рабочей точке

В систему вводится нелинейность в виде ограничения входного сигнала на нагреватель. Мощность нагревателя равна 1538 Вт. Но максимальная мощность нагрева, которую возможно получить от нагревателя равна 30% от заявленной, иначе нагреватель выходит из строя.

Произведем линеаризацию объекта управления в рабочей точке. Для этого воспользуемся инструментом *MATLAB&Simulink TrimModel*. Данный инструмент помогает отыскать входное воздействие на систему при известной

рабочей точке [10]. На рисунке 15 приведены значения входных воздействий на систему при различных уставках и возмущающих воздействиях.

Для того, чтобы проводить последующие опыты с моделью объекта химического реактора, в качестве рабочей точки выберем температуру окружающей среды 20°C и температуру уставки 50°C. После линеаризации и инициализации модели, она уже будет находится в состоянии, когда температура на выходе объекта управления равна 50°C.

Также в ходе линеаризации были получены передаточные функции модели химического реактора по задающему и возмущающему воздействиям.

Передаточная функция ОУ по задающему воздействию:

$$W_1(s) = \frac{0,01555}{s^3 + 0,3638 \cdot s^2 + 0,008625 \cdot s + 5,374 \cdot 10^{-6}}. \quad (11)$$

Передаточная функция ОУ по возмущающему воздействию:

$$W_2(s) = \frac{10^{-4} (0,0898 \cdot s^2 + 0,1892 \cdot s + 0,0537)}{s^3 + 0,3638 \cdot s^2 + 0,008625 \cdot s + 5,374 \cdot 10^{-6}}. \quad (12)$$

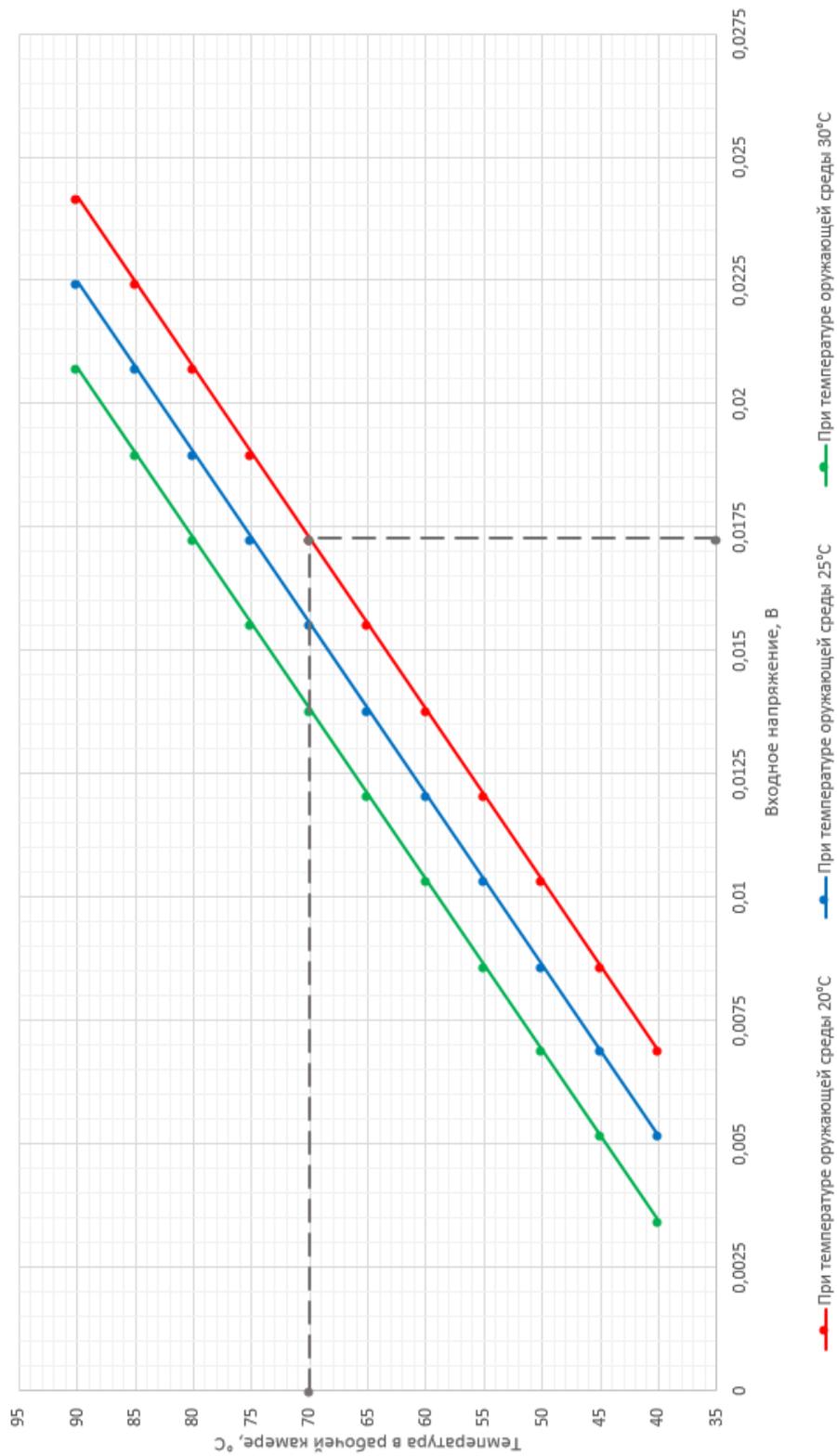


Рисунок 15 – Значения входных значений при различных уставках и возмущения

1.7. Настройка регулятора

При синтезе регулятора будем проводить все эксперименты при скачке задающего воздействия с 50°C до 70°C. При оценке грубости систем будем уменьшать и увеличивать массу воды в рабочей камере и водяной рубашке на 20%. Настраивать регуляторы будем с помощью линеаризованной модели системы, а проводить эксперименты на нелинеаризованной.

1.7.1. Настройка регулятора метод Циглера-Никольса

Настроим ПИД-регулятор по задающему воздействию. Для этого воспользуемся передаточной функцией $W_1(s)$. Структурная схема системы представлена на рисунке 16.

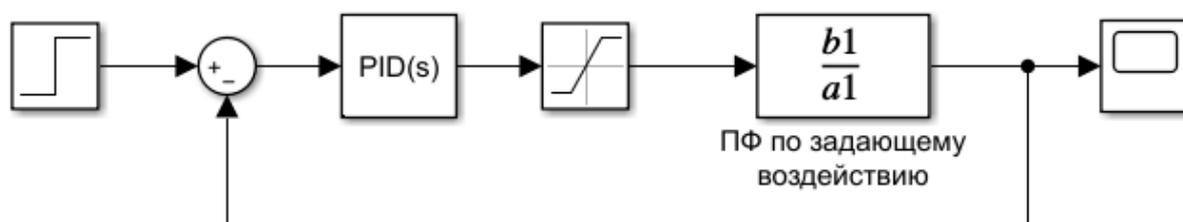


Рисунок 16 – Структурная схема в *MATLAB&Simulink*

Настроить ПИД регулятор по методу Циглера-Никольса можно вводом в систему П-регулятор и выводом ее на границу устойчивости, создав в ней автоколебания. Для того, чтобы найти коэффициенты по данному методу необходимо два параметра:

$K_{кр}$ – коэффициент П-регулятора, при котором возникают автоколебания;

$T_{кр}$ – период колебаний, возникших в системе.

Введем в систему П-регулятор. Для того, чтобы в системе возникли автоколебания, будем менять пропорциональный коэффициент регулятора с помощью автоматизированной настройки регулятора. На рисунке 17 приведены автоколебания в системе.

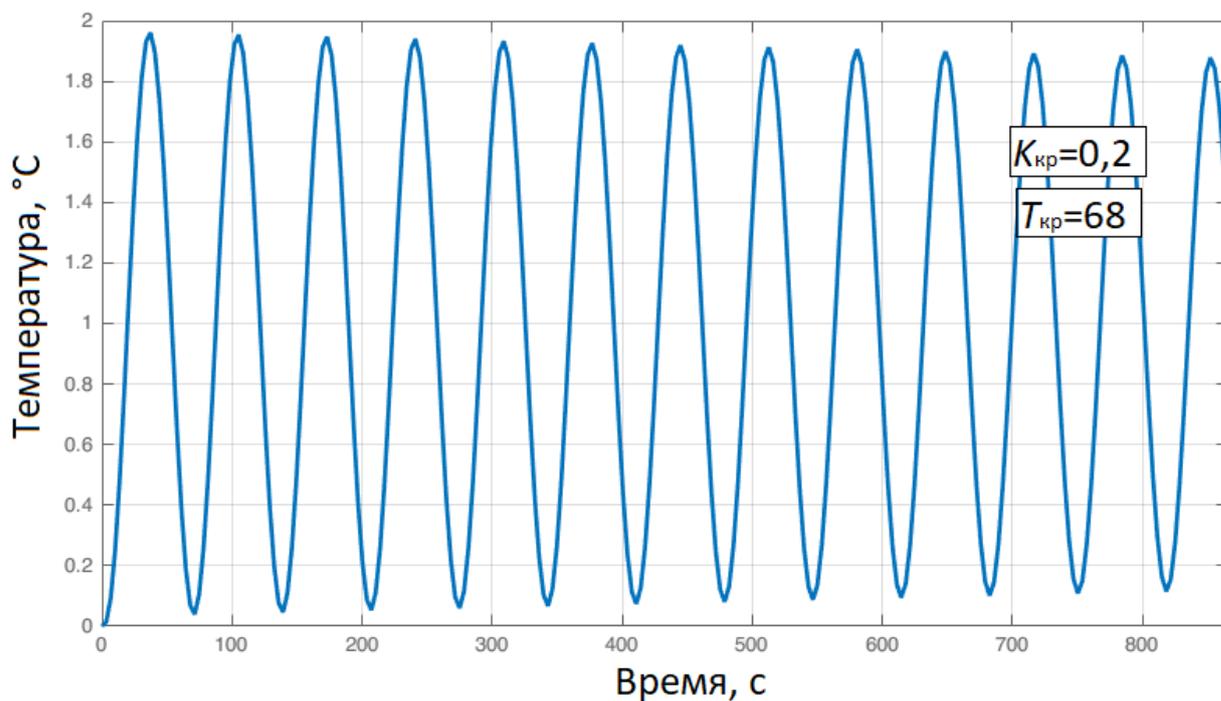


Рисунок 17 – Автоколебания в системе

Был подобран коэффициент $K_{кр} = 0.2$ и найден из графика период колебаний $T_{кр} = 68$. Значит, возможно найти коэффициенты ПИД-регулятора. Формулы расчета и значения параметров регулятора приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчета коэффициентов по задающему воздействию

| | K_p | T_I | T_D |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Формула | $0,6 \cdot K_{кр}$ | $\frac{T_{кр}}{2}$ | $\frac{T_{кр}}{8}$ |
| Значение | 0,12 | 34 | 8,5 |

Переходная характеристика на нелинеаризованной модели с коэффициентами из таблицы 1 представлена на рисунке 18.

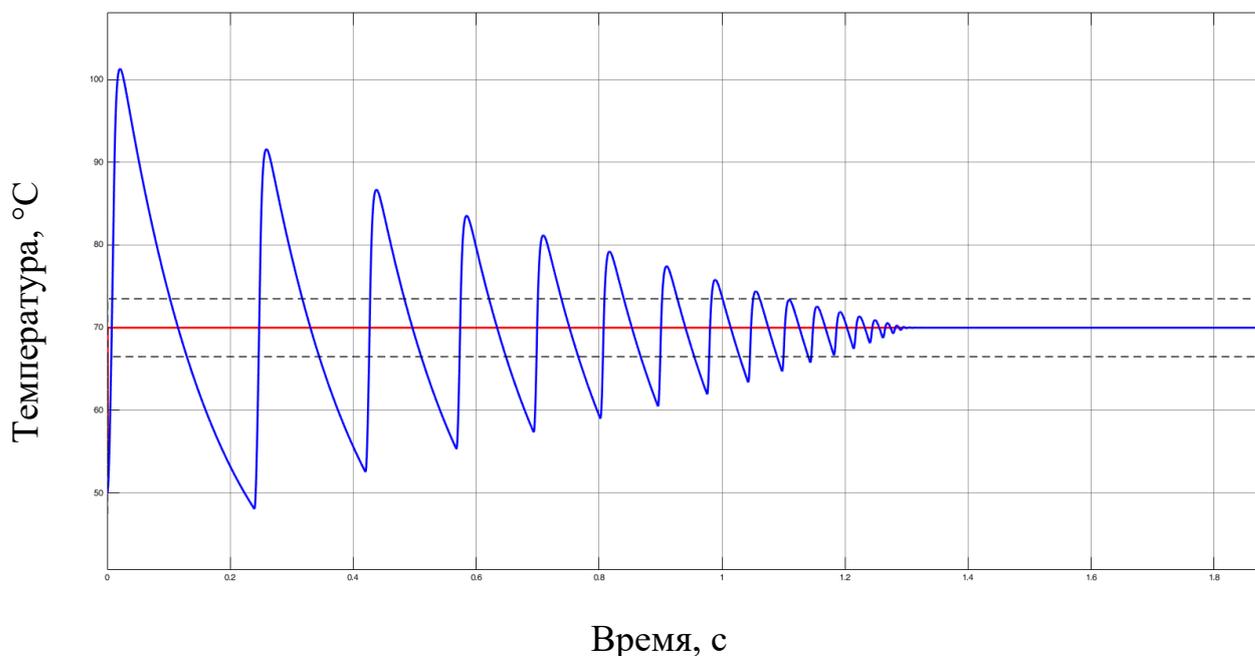


Рисунок 18 – Настройка ПИД-регулятора по методу Циглера-Никольса

Показатели качества синтезированной системы приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Качества переходного процесса для системы по уставке

| | Показатели качества | | |
|----------|---------------------|--------------|---------------|
| | t_{III}, c | $\sigma, \%$ | $e, ^\circ C$ |
| Значение | 10578,16 | 44,57 | 0 |

Произведем оценку грубости системы, синтезированной по методу Циглера-Никольса. Для этого уменьшим и увеличим параметры системы, а именно массу жидкости внутри рабочей камеры и водяной рубашки, на 20%. Результаты оценки качеств переходных процессов приведены в таблице 3. Качества переходного процесса при увеличении коэффициентов на 20 % определить невозможно, т.к. в системе возникают автоколебания.

Таблица 3 – Проверка грубости системы

| Уменьшение параметров на 20% | Показатели качества | | |
|------------------------------|---------------------|--------------|---------------|
| | t_{III}, c | $\sigma, \%$ | $e, ^\circ C$ |
| | 3510,59 | 41,21 | 0 |
| Увеличение параметров на 20% | Показатели качества | | |
| | t_{III}, c | $\sigma, \%$ | $e, ^\circ C$ |
| | - | - | - |

На рисунке 19 приведены переходные характеристики системы при уменьшении и увеличении параметров системы. Из данных графиков можно сделать вывод, что система не является грубой, т.к. ее показатели качества претерпевают существенные изменения при варьировании параметров системы в пределах $\pm 20\%$.

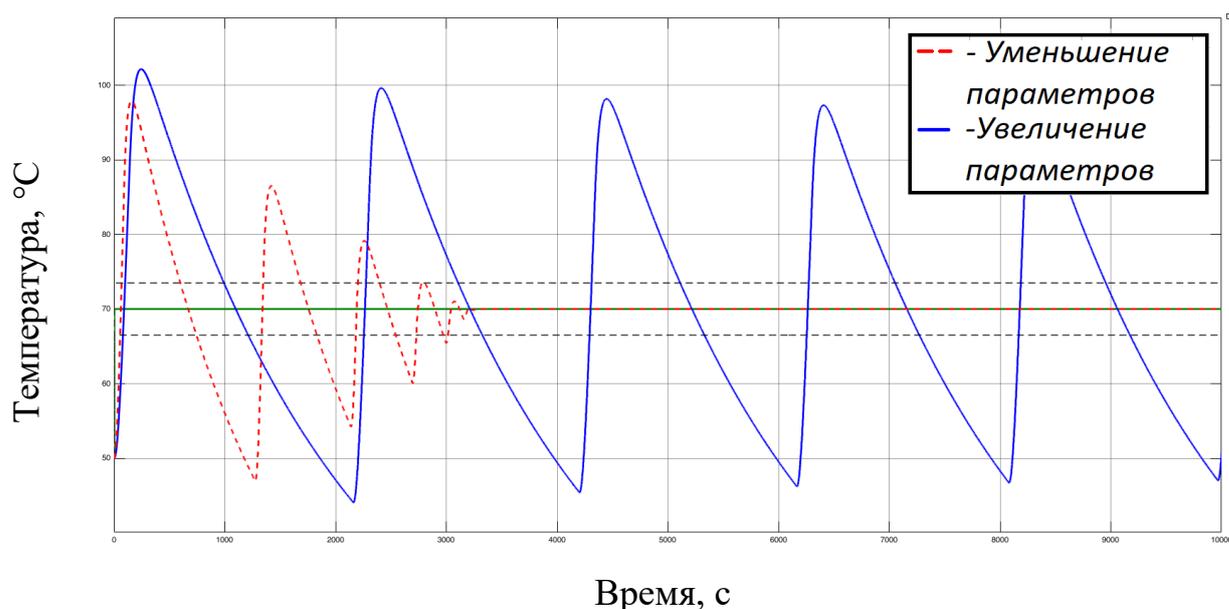


Рисунок 19 – Уменьшение параметров системы

Настройку ПИД-регулятора по возмущающему воздействию в данном случае не была выполнена, т.к. оказалось невозможным вывести систему с передаточной функцией $W_2(s)$ в режим автоколебаний.

Выполняя настройку регулятора методом Циглера-Никольса, ни в одном из случаев не были достигнуты необходимые качества переходных

процессов в системе (минимальное время переходного процесса при нулевом перерегулирование). Поэтому данный метод неприменим для разработки системы управления химическим реактором.

1.7.2. Настройка регулятора методом *CHR*

Настройка ПИД-регулятора с помощью метода Циглера-Никольса обеспечивается тем, что происходит настройка декремента затухания. Метод *Chien, Hrones* и *Reswick (CHR)* отличается от метода Циглера-Никольса тем, что в нем используется критерий максимальной скорости нарастания при отсутствии перерегулирования или при наличии не более чем 20%-ого перерегулирования [11].

С помощью метода *CHR* можно настроить регулятор по отклику системы как на изменение задающего воздействия, так и по отклику на изменение возмущения.

Настроим регулятор по отклику на единичный скачок уставки с помощью передаточной функции $W_1(s)$. А по отклику на единичный скачок возмущения с помощью функции $W_2(s)$. На рисунках 20-21 приведены графики переходных характеристик для нахождения параметров a и L . С помощью данных параметров рассчитываются коэффициенты ПИД-регулятора.

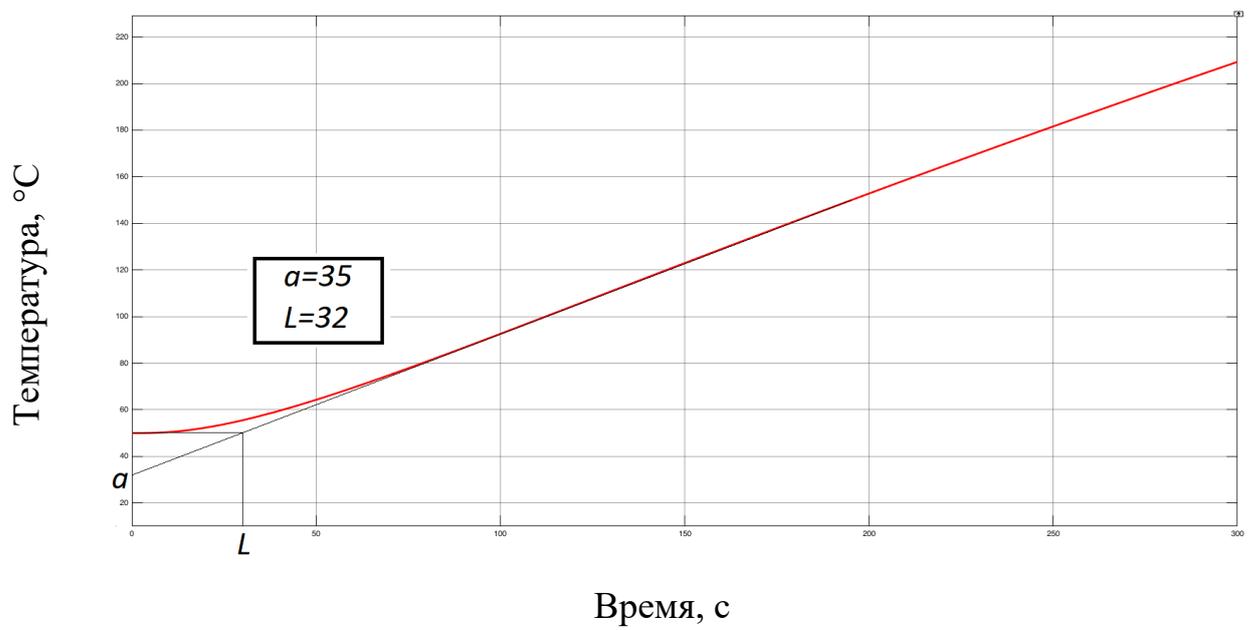


Рисунок 20 – Отклик на изменение уставки

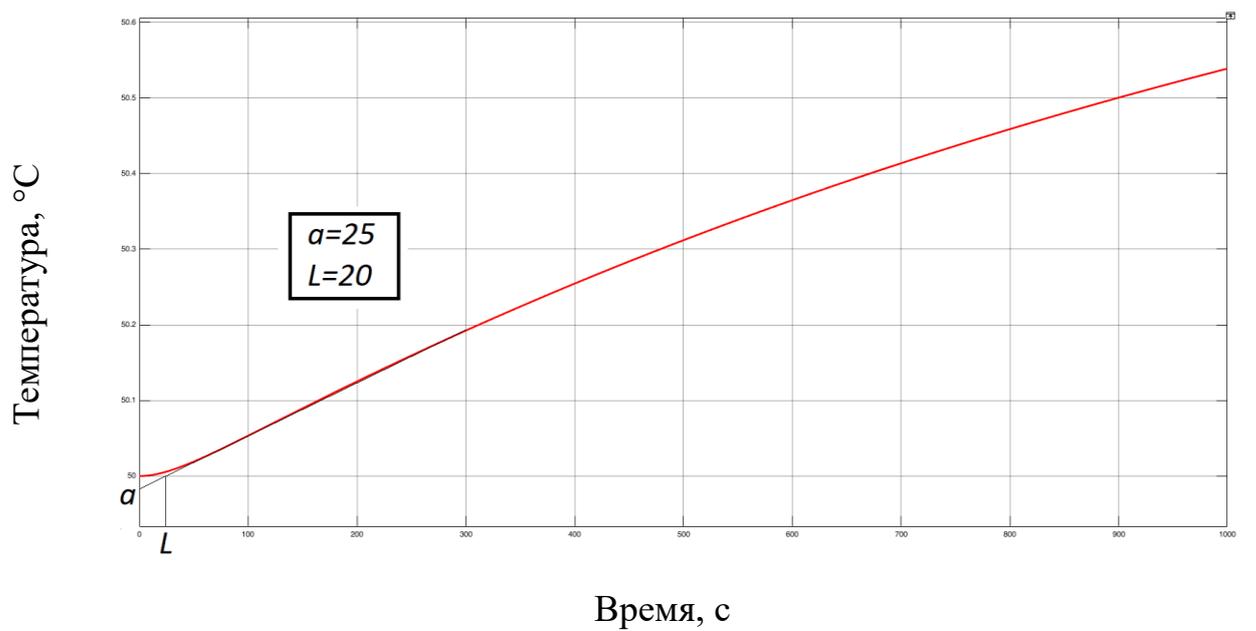


Рисунок 21 – Отклик на изменение возмущения

В таблице 4 приведен расчет параметров ПИД-регулятора с помощью полученных параметров a и L по отклику на изменение уставки и возмущения, а также качества переходных процессов в системе (Рисунок 22-23).

Таблица 4 – Коэффициенты регулятора и показатели качества

| | | | |
|---------------------------------------|--|--------------------|---------------------|
| Настройка по задающему воздействию | Коэффициенты регулятора | | |
| | K_P | T_I | T_D |
| | $0,6 / a$ | $\frac{L}{K_p}$ | $\frac{0,5L}{K_p}$ |
| | 0,017 | $1,867 \cdot 10^3$ | 933,333 |
| | Показатели качества при полученных коэффициентах | | |
| | t_{III}, c | $\sigma, \%$ | $e, ^\circ C$ |
| | 956,034 | 5,714 | 0 |
| Настройка по возмущающему воздействию | Коэффициенты регулятора | | |
| | K_P | T_I | T_D |
| | $0,95 / a$ | $\frac{2,4L}{K_p}$ | $\frac{0,42L}{K_p}$ |
| | 0,038 | $1,263 \cdot 10^3$ | 221,053 |
| | Показатели качества при полученных коэффициентах | | |
| | t_{III}, c | $\sigma, \%$ | $e, ^\circ C$ |
| | 336,085 | 2,850 | 0 |

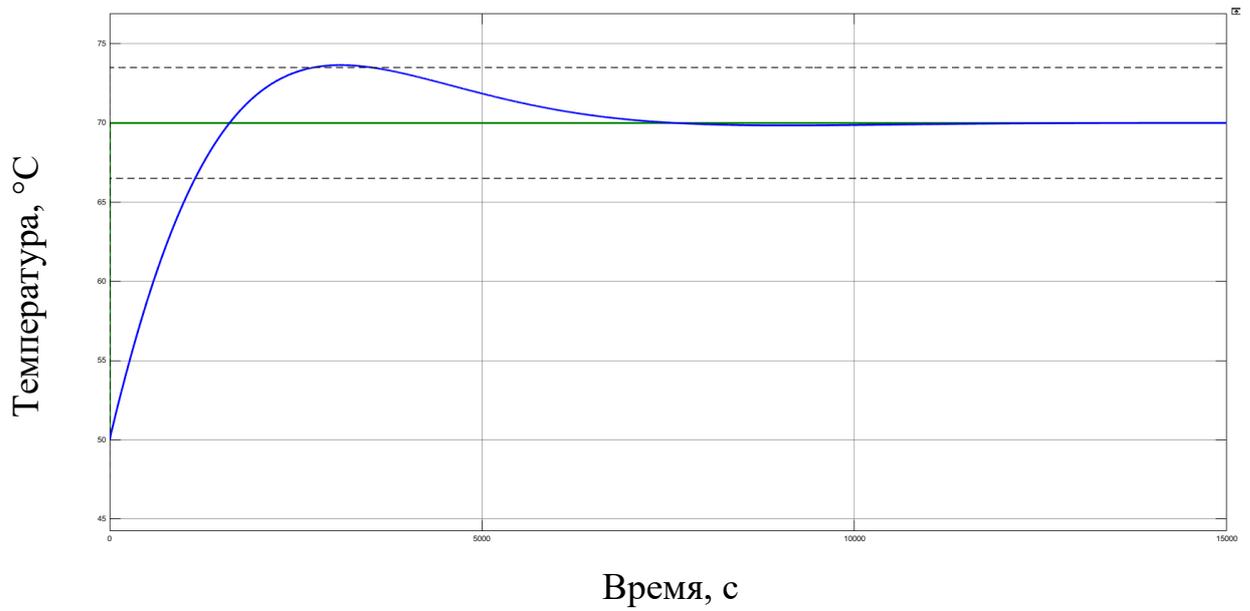


Рисунок 22 – Переходный процесс (синтез по уставке)

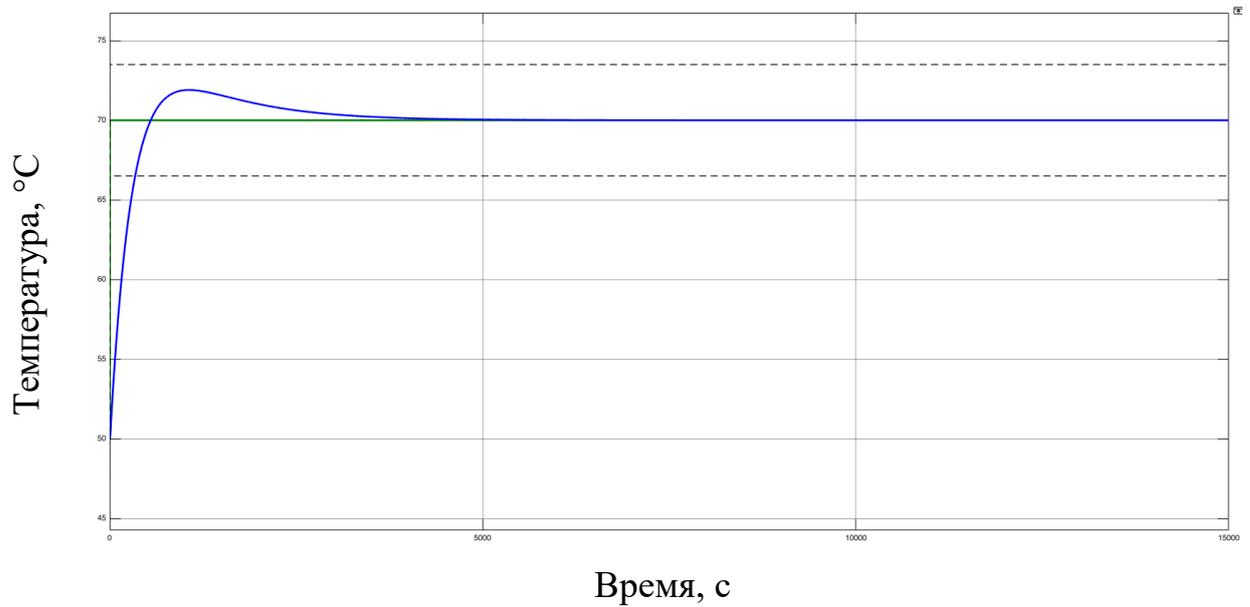


Рисунок 23 – Переходный процесс (синтез по возмущению)

Производя оценку грубости системы получили показатели, приведенные в таблице 5.

Таблица 5 – Оценка грубости системы

| | | Показатели качества при полученных коэффициентах | | |
|---------------------------------------|------------------------------|--|--------------|---------------|
| | | t_{III}, c | $\sigma, \%$ | $e, ^\circ C$ |
| Настройка по задающему воздействию | Уменьшение параметров на 20% | 1112,086 | 5,235 | 0 |
| | Увеличение параметров на 20% | 1110,470 | 5,247 | 0 |
| Настройка по возмущающему воздействию | Уменьшение параметров на 20% | 325,761 | 2,523 | 0 |
| | Увеличение параметров на 20% | 328,458 | 2,424 | 0 |

Графики переходных процессов при исследовании грубости системы, которая была синтезирована по уставке и возмущению представлены на рисунках 24-25.

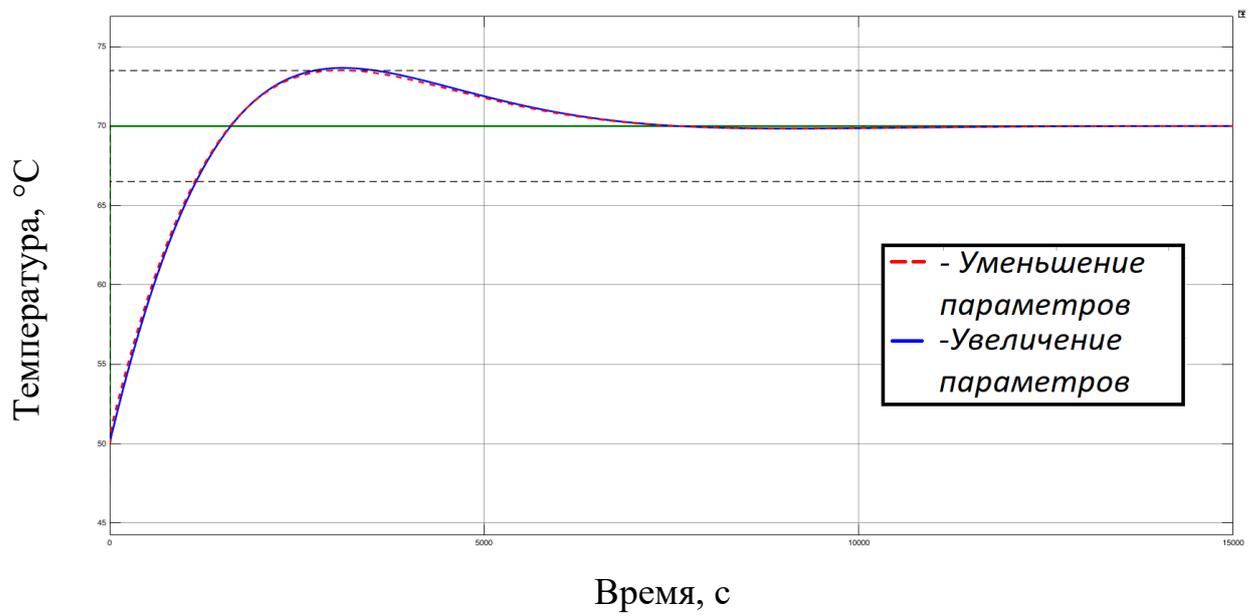


Рисунок 24 – Оценка грубости по задающему воздействию

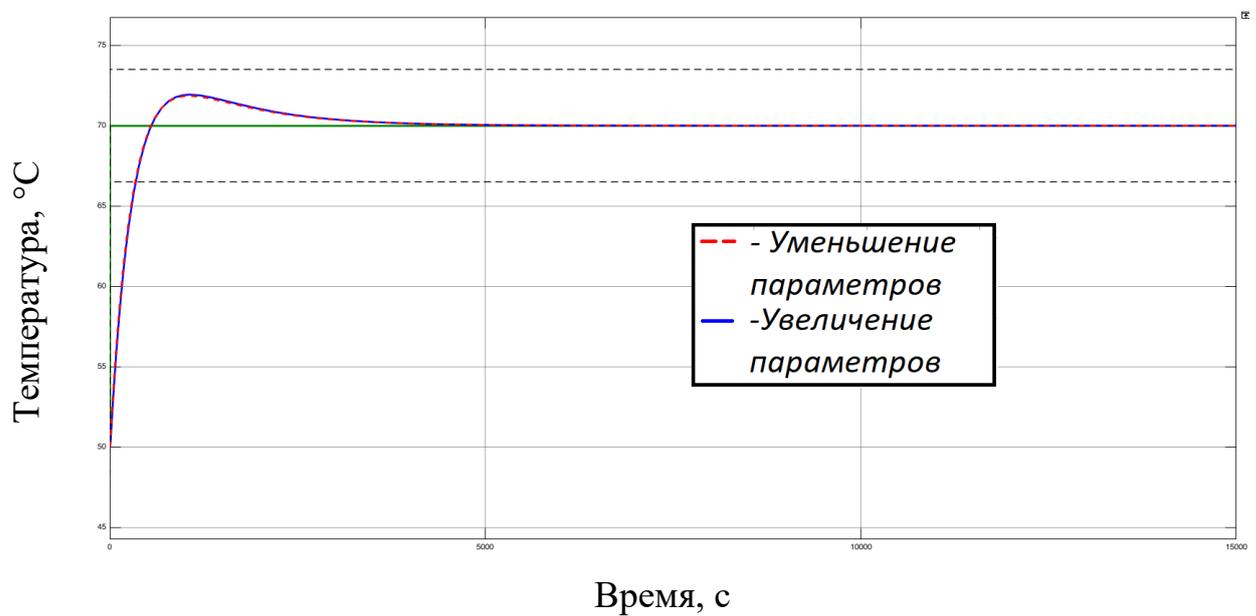


Рисунок 25 – Оценка грубости по возмущающему воздействию

Система, синтезированная по методу *CHR* дает показатели качества, которые непригодны для применения управления процессами, протекающими в химическом реакторе.

1.7.3. Автоматизированная настройка ПИД-регулятора

В предыдущих разделах было выявлено, что инженерный метод настройки ПИД-регулятора Циглера-Никольса и метод настройки *CHR* дают плохие показатели качества переходных процессов.

Для достижения необходимых качеств переходного процесса воспользуемся автоматизированной настройкой коэффициентов ПИД-регулятора для объекта управления по задающему и возмущающему воздействию.

Настраивать регулятор будем с учетом того, что в системе должно быть минимальное время переходного при отсутствии регулирования. Смоделированная система приведена на рисунке 26.



Рисунок 26 – Модель системы в *MATLAB&Simulink*

В таблице 6 приведены значения коэффициентов ПИД-регулятора, настроенного по задающему и возмущающему воздействию.

На рисунках 27-28 представлены переходные процессы в системе при скачке уставки с 50°C до 70°C.

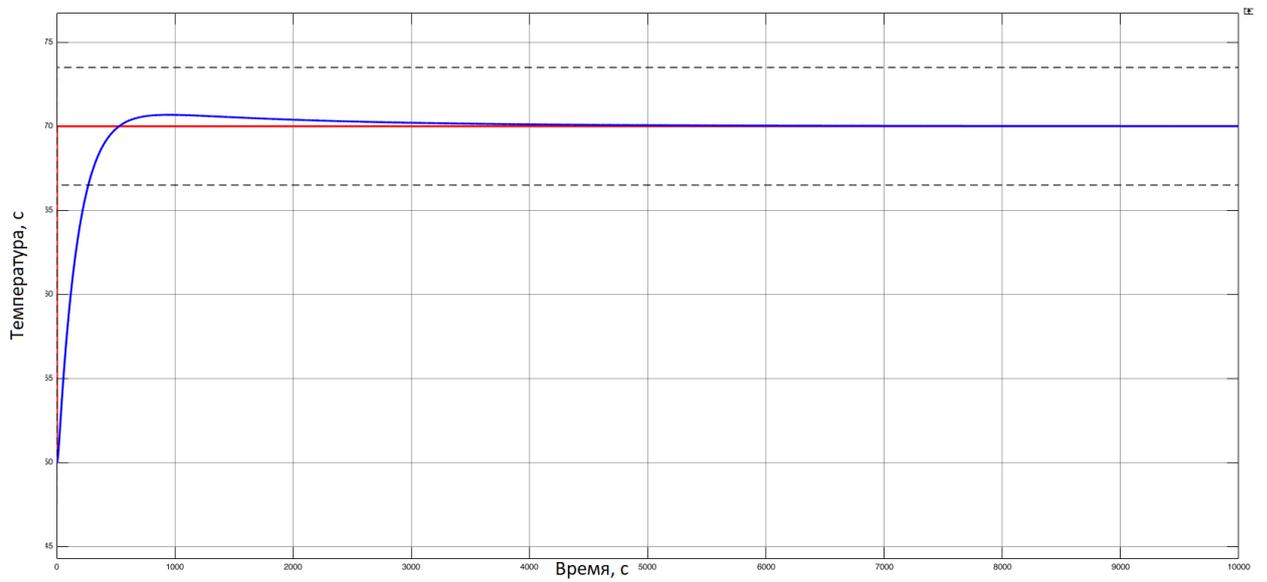


Рисунок 27 – Настройка регулятора по заданию

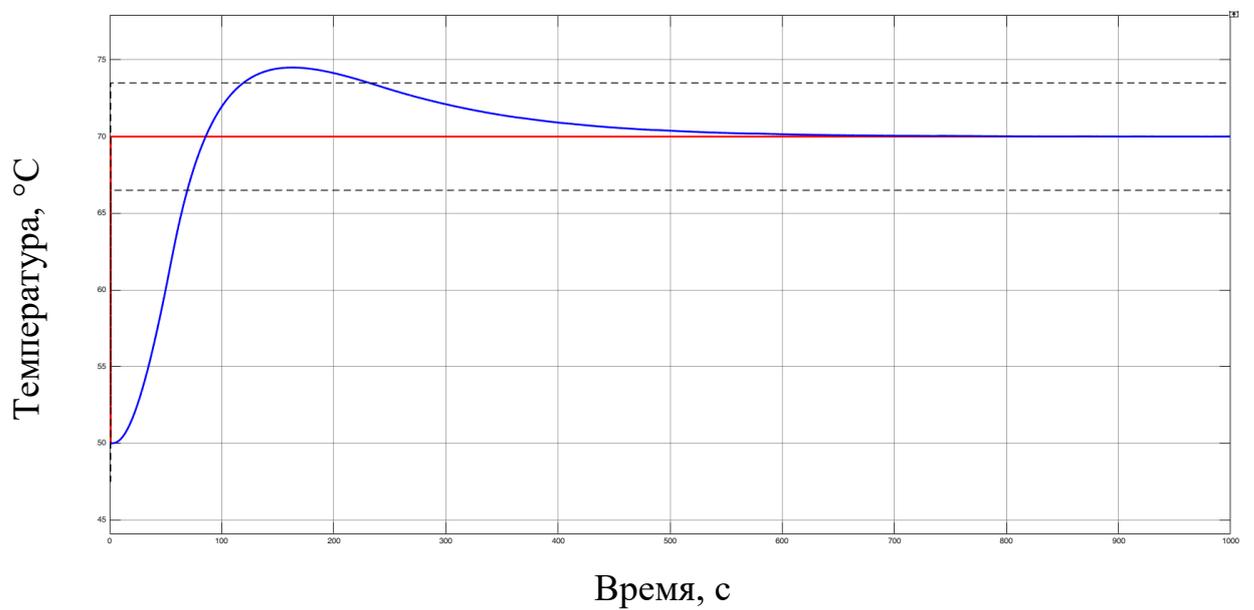


Рисунок 28 – Настройка регулятора по возмущению

В таблице 4 приведены качества переходных процессов при различных методах настройки регулятора.

Таблица 6 – Качества переходных процессов при автонастройке

| | | | |
|---------------------------------------|--|-----------------------|---------------|
| Настройка по задающему воздействию | Коэффициенты регулятора | | |
| | K_P | K_I | K_D |
| | 0,0138 | $8,216 \cdot 10^{-6}$ | 1,731 |
| | Показатели качества при полученных коэффициентах | | |
| | t_{III}, c | $\sigma, \%$ | $e, ^\circ C$ |
| | 256,120 | 1,439 | 0 |
| Настройка по возмущающему воздействию | Коэффициенты регулятора | | |
| | K_P | K_I | K_D |
| | 296,262 | 1,791 | 11121,316 |
| | Показатели качества при полученных коэффициентах | | |
| | t_{III}, c | $\sigma, \%$ | $e, ^\circ C$ |
| | 227,557 | 6,4 | 0 |

Теперь проверим грубость систем с полученными регуляторами. Для этого уменьшим и увеличим параметры системы на 20%. Значения качеств переходных процессов приведены в таблице 7. Графики переходных процессов приведены на рисунках 29-30.

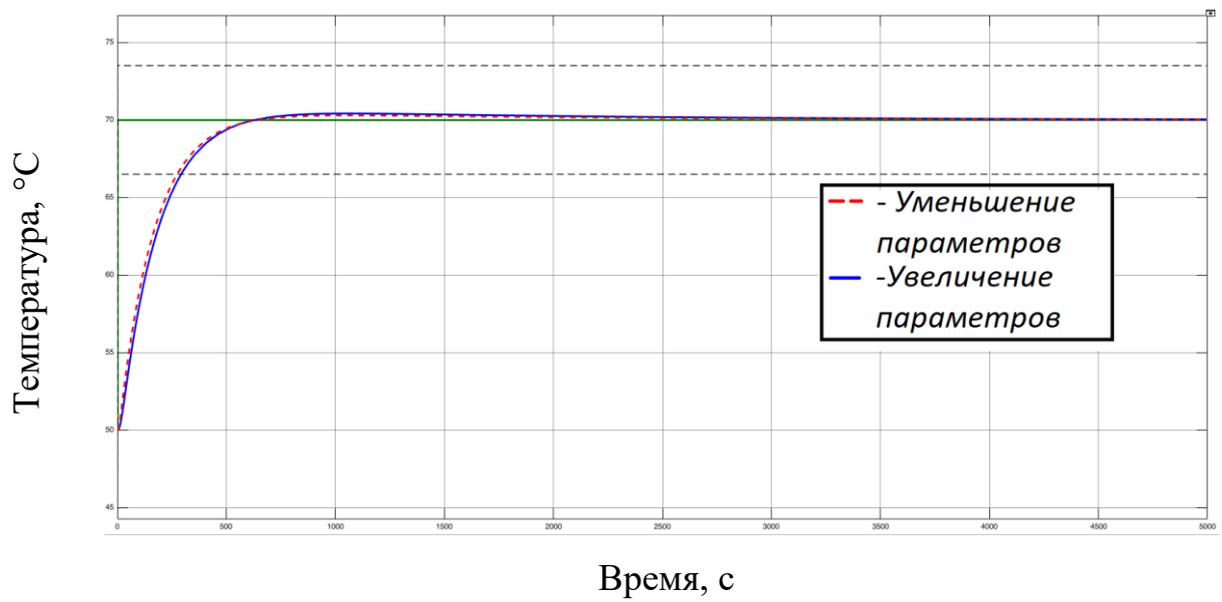


Рисунок 29 – Проверка грубости системы по заданию

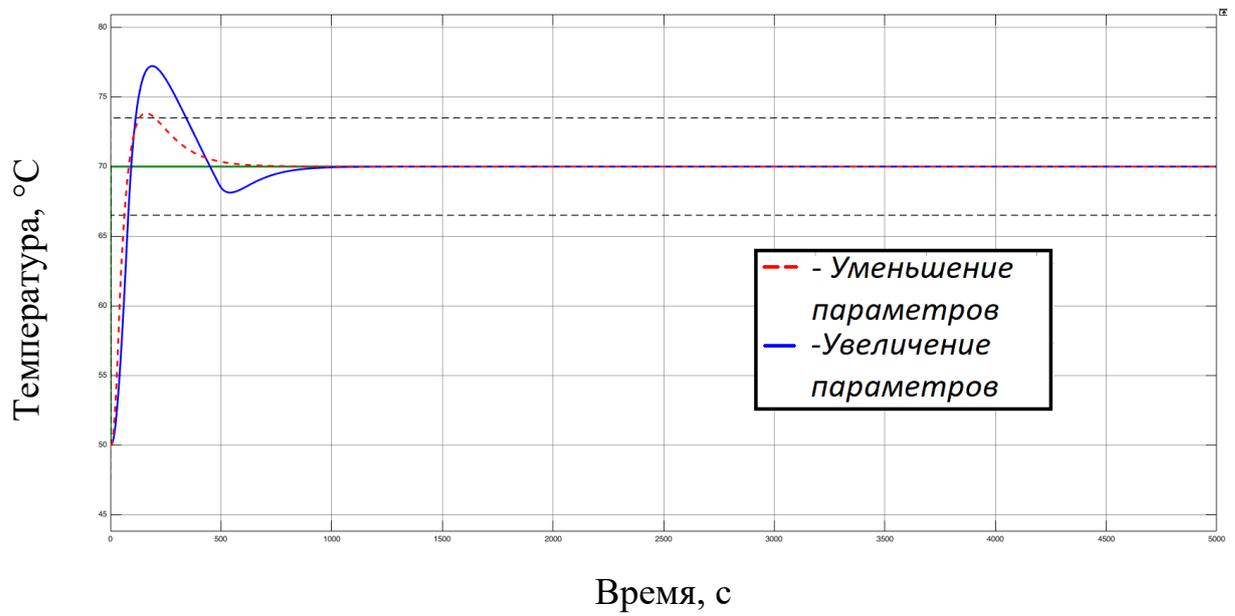


Рисунок 30 – Проверка грубости системы по возмущению

Таблица 7 – Проверка грубости системы

| | | Показатели качества при полученных коэффициентах | | |
|---------------------------------------|------------------------------|--|--------------|---------------|
| | | t_{III}, c | $\sigma, \%$ | $e, ^\circ C$ |
| Настройка по задающему воздействию | Уменьшение параметров на 20% | 246,479 | 1,343 | 0 |
| | Увеличение параметров на 20% | 269,953 | 1,529 | 0 |
| Настройка по возмущающему воздействию | Уменьшение параметров на 20% | 160,453 | 5,414 | 0 |
| | Увеличение параметров на 20% | 848,983 | 12,843 | 0 |

1.7.4. Регулятор с двумя степенями свободы

Управление через обратную связь зачастую бывает на порядок медленнее, чем разомкнутое управление. Это обусловлено тем, что в разомкнутой системе не нужно ждать, пока энергия управляющего сигнала пройдет через объект управления и возвратится на вход регулятора по обратной связи [12]. Но при этом, компенсировать неизвестные возмущающие воздействия с помощью разомкнутого управления достаточно трудно. Также при низкой точности модели объекта управления невозможно организовать разомкнутое управление.

Достоинства разомкнутого и замкнутого управления возможно совместить в системе при синтезе регулятора с двумя степенями свободы. На рисунке 36 представлена структурная схема системы, в которой используется регулятор с двумя степенями свободы. На рисунке 31 регулятор R имеет два входа и один выходной сигнал $u(t)$ на объект управления P . Один вход для сигнала обратной связи $y(t)$, а второй для задающего воздействия $r(t)$.

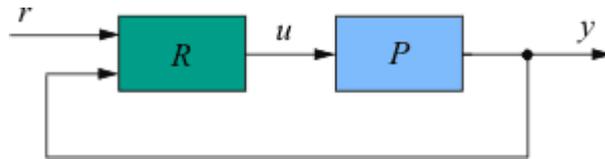


Рисунок 31 – Системы с регулятором с двумя степенями свободы

Для того, чтобы синтезировать ПИД-регулятор с двумя степенями свободы, необходимо разбить проектирование на два этапа.

На первом этапе необходимо обеспечить робастность и ослабление влияния шумов и внешних возмущений. Для этого настраивают коэффициенты ПИД регулятора K_P , K_I , K_D .

На втором этапе необходимо обеспечить заданную реакцию объекта управления на входное воздействие $r(t)$. Для этого синтезируется регулятор с прямой связью. На рисунке 32 приведена структурная схема системы с ПИД-регулятором, в которой используется не только принцип замкнутого, но и разомкнутого управления.

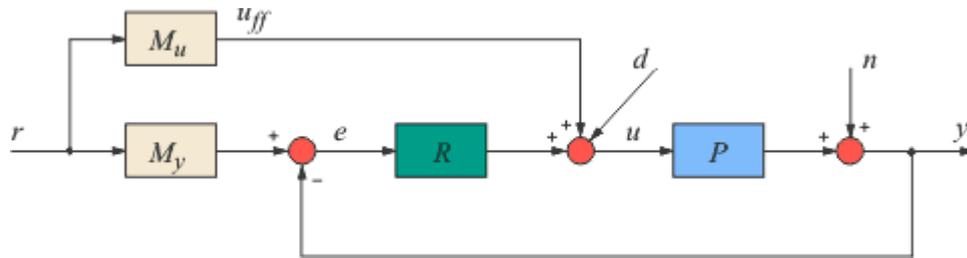


Рисунок 32 – ПИД-регулятор с комбинированным управлением

Данная системы дает большее быстроедействие по задающему воздействию, т.к. входной сигнал $r(t)$ идет на вход объекта управления через передаточную функцию M_u минуя цепь отрицательной обратной связи.

Для данной схемы передаточную функцию блока M_u выбирают так, чтобы выходной сигнал $y(t)$ в точности повторял входной сигнал $r(t)$, если ошибка регулирования равна нулю.

Для того, чтобы рассчитать передаточную функцию блока M_y , рассмотрим передаточную функцию всей системы, представленной на рисунке 2. Данная системы имеет передаточную функцию (ПФ) следующего вида:

$$G(s) = M_y(s) + \frac{P(s) \cdot M_u(s) - M_y(s)}{1 + P(s) \cdot R(s)},$$

где $P(s)$ – ПФ объекта управления, $R(s)$ – ПФ ПИД-регулятора, $M_u(s)$ и $M_y(s)$ – ПФ разомкнутого регулятора.

Передаточная функция $M_y(s)$ является желаемой передаточной функцией системы. Для достижения этого необходимо, чтобы второе слагаемое $G(s)$ системы было равным нулю.

Для достижения этого, передаточную функцию $M_u(s)$ рассчитывают следующим образом:

$$M_u(s) = P^{-1}(s) \cdot M_y(s).$$

В данном случае возникает сложность с физической реализацией подобной передаточной функцией. Обратная передаточная функция объекта $P^{-1}(s)$ включает операцию идеального дифференцирования, реализация которой достаточно проблематична.

Для того, чтобы решить данную проблему, необходимо аппроксимировать нереализуемую передаточную функцию $M_u(s)$ с минимальной погрешностью для системы.

Необходимо чтобы в установившемся режиме соблюдалось условие:

$$\hat{P}^{-1}(0) = \frac{1}{P(0)},$$

где $\hat{P}^{-1}(0)$ – это аппроксимированная функция $P^{-1}(s)$.

Для системы третьего порядка обратный оператор можно аппроксимировать следующей передаточной функцией:

$$P^{-1}(s) = \frac{1}{K} \frac{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)}{\left(\frac{T_1s}{N} + 1\right)\left(\frac{T_2s}{N} + 1\right)\left(\frac{T_3s}{N} + 1\right)},$$

где $T_1 = \frac{1}{s_1}$, $T_2 = \frac{1}{s_2}$, $T_3 = \frac{1}{s_3}$, s_i – корни характеристического полинома системы, N – степень ослабления шумов.

По управляющему воздействию, система имеет следующую передаточную функцию:

$$W_1(s) = \frac{0,01555}{s^3 + 0,3638 \cdot s^2 + 0,008625 \cdot s + 5,374 \cdot 10^{-6}}$$

Корни системы имеют следующие значения:

$$s_i = (-0,00064 \quad -0,0248 \quad -0,338).$$

Тогда постоянные времени будут равны:

$$T_i = (1562,50 \quad 40,32 \quad 2,96).$$

Коэффициент K будет равен:

$$K = 869,57.$$

Параметр N выбирается из диапазона 2..20 так, чтобы граничная частота фильтра не была ниже частоты $1/T_i$ [13]. Частота фильтра рассчитывается из соотношения $T_F = T_i/N$. В данном случае $N = 10$.

Была выбрана передаточная функция $M_y(s)$:

$$M_y(s) = \frac{1}{s + 1}.$$

После того, как все параметры для аппроксимации передаточной функции $P^{-1}(s)$ были найдены, можем записать передаточную функцию $M_u(s)$:

$$M_u(s) = \hat{P}^{-1}(s) \cdot M_y(s) = \frac{2,189 \cdot 10^{-2} \cdot s^3 + 7,956 \cdot 10^{-3} \cdot s^2 + 1,186 \cdot 10^{-4} \cdot s + 1,174 \cdot 10^{-7}}{s^4 + 4,634 \cdot s^3 + 4,496 \cdot s^2 + 0,867 \cdot s + 5,365 \cdot 10^{-3}}$$

Система управления полученным регулятором была смоделирована в *MATLAB&Simulink* (Рисунок 33).

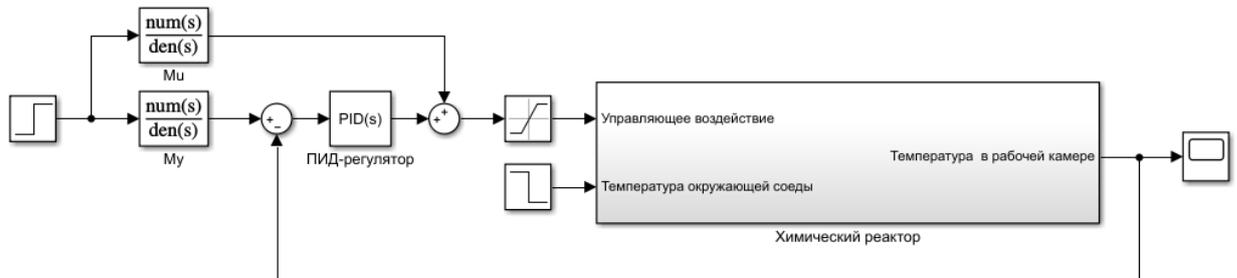


Рисунок 33 – Система с полученным регулятором

ПИД-регулятор был настроен вручную, подбором коэффициентов. Коэффициенты ПИД-регулятора приведены в таблице 6. Рассмотрим переходный процесс в системе при скачке управляющего воздействия с 50°C до 70°C. На рисунке 34 приведен переходный процесс в системы. Качества переходного процесса приведены в таблице 8.

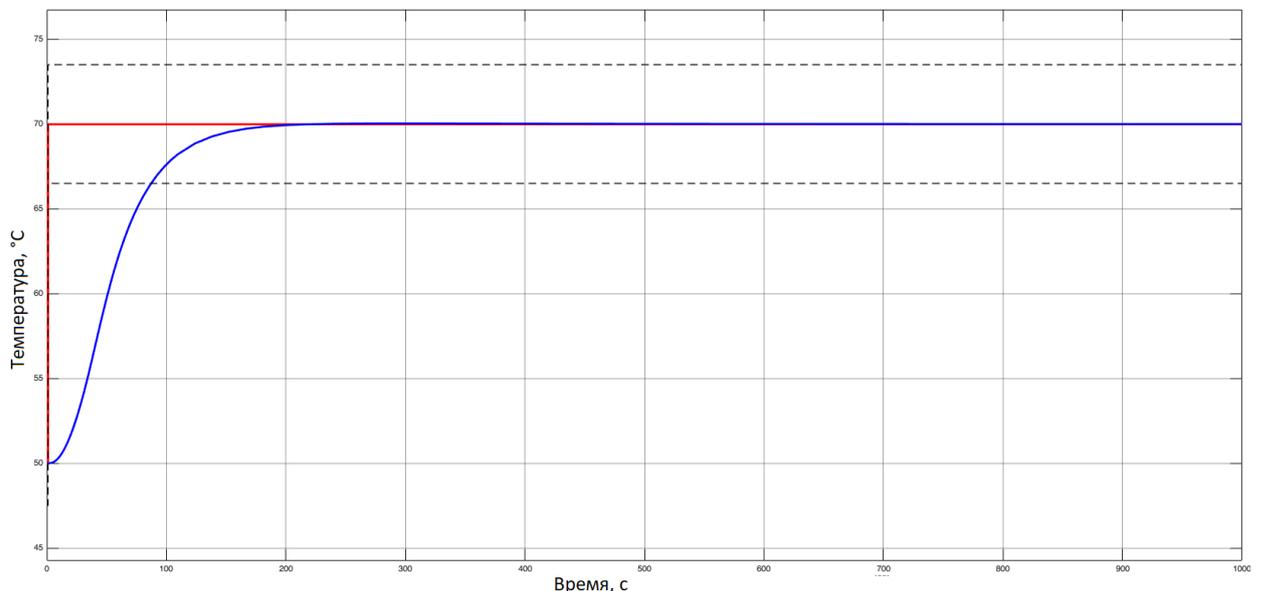


Рисунок 34 – Переходный процесс в системе

Исходя из рисунка 34 можно сделать вывод, что в системе происходит плавное нарастание температуры до уставки без перерегулирования.

Таблица 8 – Коэффициенты ПИД-регулятора с двумя степенями свободы

| | Коэффициенты регулятора | | |
|-----------------------|-------------------------|----------------------|---------------|
| | K_P | K_I | K_D |
| Значение коэффициента | 0,04 | $6,56 \cdot 10^{-6}$ | 1,44 |
| | Показатели качества | | |
| | t_{III}, c | $\sigma, \%$ | $e, ^\circ C$ |
| Значение показателя | 89.369 | 0 | 0 |

Произведем оценку грубости полученной системы. Сначала уменьшим параметры системы на 20%, а затем увеличим. На рисунке 35 представлены переходные характеристики в системе при уменьшении и при увеличении параметров системы.

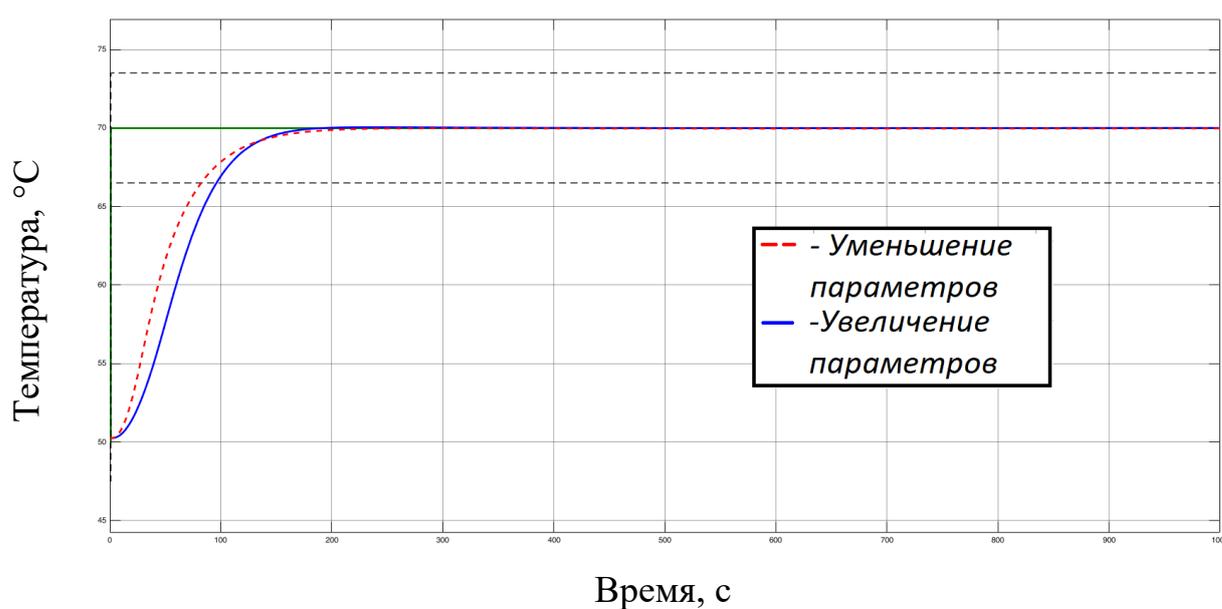


Рисунок 35 – Переходный процесс в системе при уменьшении параметров

В таблице 9 приведены показатели качества переходного процесса. Исходя из полученных значений, можно сделать вывод, что синтезированная система является грубой, т.к. варьирование параметров в диапазоне $\pm 20\%$ существенно не повлияло на качества переходного процесса.

Таблица 9 – Проверка грубости системы

| | Показатели качества при полученных коэффициентах | | |
|------------------------------|--|--------------|---------------|
| | t_{III}, c | $\sigma, \%$ | $e, ^\circ C$ |
| Уменьшение параметров на 20% | 80.376 | 0 | 0 |
| Увеличение параметров на 20% | 96,409 | 0,229 | 0 |

1.8. Анализ результатов синтеза регулятора

В ходе синтеза ПИД-регулятора для системы было использовано 4 метода:

- Синтез ПИД-регулятора по методу Циглера-Никольса с выведением объекта на границу устойчивости;
- Синтез ПИД-регулятора методом CHR;
 - Автоматизированный синтез ПИД-регулятора с помощью инструментов *MATLAB&Simulink*;
- Синтез ПИД-регулятора с двумя степенями свободы.

В каждом из случаев был произведен анализ грубости систем, если это было возможно.

Были получены показатели качества переходных процессов в системе с каждым из рассчитанных регуляторов.

Перед синтезом регулятора были предъявлены требования к качествам переходных процессов. Требования заключаются в том, чтобы в системе отсутствовало перерегулирование и время переходного процесса было минимальным.

В таблице 10 представлены обобщенные результаты синтеза регулятора.

Таблица 10 – Обобщенная информация о качествах переходных процессов при разных регуляторах

| Название метода | Способ синтеза | Показатели качества | | |
|-------------------------------------|----------------|---------------------|-------------------|---------------|
| | | Время ПП | Перерегулирование | Ошибка |
| | | $t_{ПП}, c$ | $\sigma, \%$ | $e, ^\circ C$ |
| Метод Циглера-Никольса | По уставке | 10578,16 | 44,57 | 0 |
| Метод CHR | По уставке | 14596,436 | 43 | 0 |
| | По возмущению | 4387,160 | 7,914 | 0 |
| Автонастройка | По уставке | 256,120 | 1,439 | 0 |
| | По возмущению | 227,557 | 6,4 | 0 |
| Регулятор с двумя степенями свободы | — | 89.369 | 0 | 0 |

В ходе анализа переходных процессов, которые происходят в системе с ПИД-регулятором синтезированным по методу Циглера-Никольса, можно сделать вывод, что данный метод не подходит для системы химического реактора. Из полученных графиков по указанному методу видим, что в системе возникают большое перерегулирование и автоколебания, что недопустимо.

Метод CHR дал результат лучше, чем метод Циглера-Никольса при синтезе системы по возмущению, но полученные качества переходного процесса по-прежнему не являются удовлетворительными.

Автоматизированный синтез ПИД-регулятора также не дал результата, в котором отсутствовало бы перерегулирование. Из графиков переходных процессов видим, что перерегулирование с ПИД-регулятором, настроенным в *MATLAB&Simulink* варьируется от 1 до 9%. Потому, можно сделать вывод, что данный метод также не является подходящим для настройки ПИД-регулятора для системы с химическим реактором.

Также был синтезирован ПИД-регулятор с двумя степенями свободы. Данный метод позволяет объединить в себе достоинства прямого регулирования и регулирования с обратной связью. Из графиков переходных процессов видим, что с помощью данного метода были достигнуты наилучшие показатели качества, а также были соблюдены требования, предъявленные к качествам переходных характеристик. Этот метод из всех заявленных дает наименьшее время переходного процесса (89 секунд). При этом в системе отсутствует перерегулирование. Для данного метода оценка грубости системы показала, что система с данным регулятором сохраняет свои показатели качества, а значит является грубой.

Таким образом, можно сделать вывод, что ПИД-регулятор с двумя степенями свободы наилучшим образом подходит для системы химического реактора, т.к. не допускает перерегулирования и дает хорошие показатели по времени переходного процесса структурная схема системы с данным регулятором приведена в приложении В.

1.9.Отработка внешних возмущений

Для того, чтобы окончательно убедиться в обоснованности выбора в пользу регулятора с двумя степенями свободы, необходимо проверить как происходит отработка внешних возмущений в системе.

Для этого подадим на систему с синтезированным ПИД-регулятором с комбинированным управлением возмущающий сигнал в виде резкого падения температуры окружающей среды с 20°C до 10°C. Подавать возмущение будем после того, как процесс установится.

На рисунке 36 приведен вид графика переходного процесса с возмущением. Из рисунка видим, что система не реагирует на возмущение. Температура внутри рабочей камеры становится равной 69,96°C. Это допустимое значение температуры, т.к. внутри реактора температура может варьироваться в пределах $\pm 2^\circ\text{C}$.

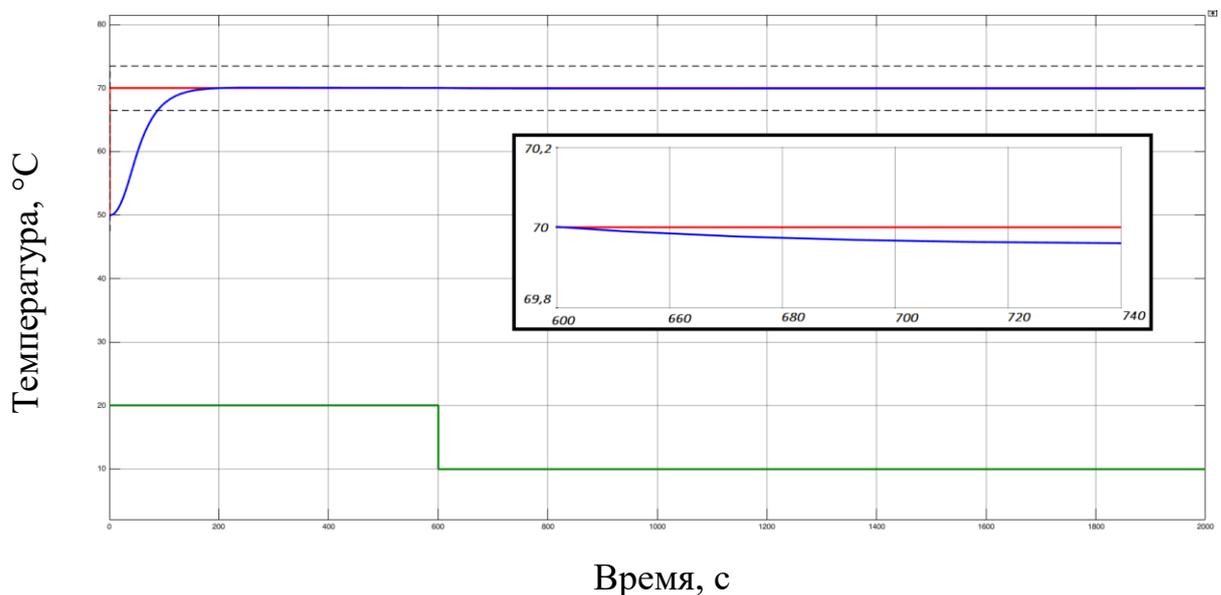


Рисунок 36 – Переходный процесс в системе при действии возмущения

Представим более экстремальную ситуацию и смоделируем в системе падение температуры окружающей среды с 20° до 0°C. Результат на рисунке 37. Видим, что система по-прежнему остается в пределах $\pm 2^\circ\text{C}$.

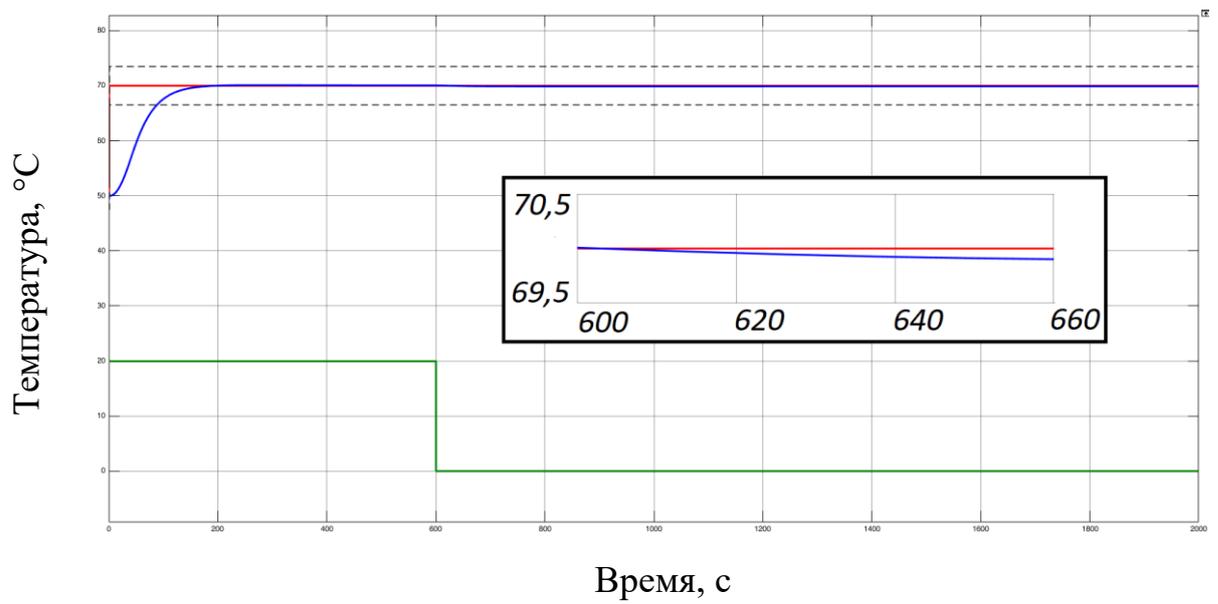


Рисунок 37 – Действие более резкого возмущения

Таким образом, применимость регулятора с двумя степенями свободы считается обоснованной.

2. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Данный раздел определяет оценки коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, а также планирование и формирование бюджета научных исследований, определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

Научно-исследовательская работа направлена на разработку системы управления температурой в рабочей камере макета химического реактора с использованием программируемого логического контроллера.

2.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

2.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальными потребителями результатов исследований являются широкий круг предприятий химической промышленности. Для данных предприятий разрабатывается система автоматического регулирования (САР) температуры в химическом реакторе с водяной рубашкой.

В таблице 11 приведены основные сегменты рынка по следующим критериям: размер компании-заказчика и направление деятельности. Анализ рынка выполнялся на основе компаний ПАО "Нижнекамскнефтехим", ОАО "Тольяттиазот", ОАО "Саянскхимпласт".

Таблица 11 – Карта сегментирования рынка

| | | Направление деятельности | | | |
|-----------------|---------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | | Подбор средств реализации | Создание алгоритмов управления | Проектирование АСУ ТП | Разработка экранных форм |
| Размер компании | Крупные | - | - | + | + |
| | Средние | - | - | - | + |
| | Мелкие | + | + | - | - |

Согласно карте сегментирования, можно выбрать следующие сегменты рынка: подбор средств реализации и создание алгоритмов управления для крупных и средних компаний.

2.1.2. Анализ конкурентных технических решений

Данный анализ проводится с помощью оценочной карты для сравнения конкурентных технических решений, приведенной в таблице 12. В качестве конкурентов выбраны ПАО "Нижнекамскнефтехим" и ОАО "Тольяттиазот".

Таблица 12 – Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

| Критерии оценки | Вес критерия | Баллы | | | Конкурентоспособность | | |
|--|--------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------------|--------------------|
| | | Разрабатываемая САР | 1 Конкурентная система управления | 2 Конкурентная САР | Разрабатываемая САР | 1 Конкурентная система управления | 2 Конкурентная САР |
| Техническое критерии оценки ресурсоэффективности | | | | | | | |
| Повышение производительности | 0,1 | 5 | 3 | 4 | 0,50 | 0,3 | 0,4 |
| Удобство в эксплуатации | 0,08 | 4 | 3 | 4 | 0,32 | 0,24 | 0,32 |
| Устойчивость | 0,08 | 4 | 4 | 3 | 0,32 | 0,32 | 0,24 |
| Энергоэкономичность | 0,05 | 4 | 5 | 4 | 0,2 | 0,25 | 0,2 |
| Надежность | 0,1 | 5 | 3 | 5 | 0,5 | 0,3 | 0,5 |
| Безопасность | 0,05 | 4 | 3 | 5 | 0,2 | 0,15 | 0,25 |
| Простота в эксплуатации | 0,08 | 4 | 4 | 4 | 0,32 | 0,32 | 0,32 |
| Экономические критерии оценки эффективности | | | | | | | |
| Конкурентоспособность | 0,1 | 4 | 3 | 3 | 0,2 | 0,15 | 0,15 |
| Уровень проникновения на рынок | 0,04 | 4 | 3 | 3 | 0,2 | 0,15 | 0,15 |
| Цена | 0,04 | 5 | 2 | 1 | 1 | 0,4 | 0,2 |
| Предполагаемый срок эксплуатации | 0,04 | 5 | 2 | 4 | 0,5 | 0,2 | 0,4 |
| Условия проникновения на рынок | 0,05 | 4 | 3 | 5 | 0,24 | 0,18 | 0,3 |
| Итого | 1 | 52 | 38 | 39 | 4,5 | 2,96 | 4,05 |

Опираясь на полученные результаты, можно сделать вывод, что разрабатываемая система автоматического регулирования температуры в химическом реакторе является наиболее эффективной. Уязвимость

конкурентов объясняется наличием таких причин, как высокая стоимость, более низкая производительность и низкий срок эксплуатации.

2.2.SWOT – анализ

SWOT-анализ – это метод стратегического планирования, заключающийся в выявлении факторов внутренней и внешней среды организации и разделении их на четыре категории: Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) [15]. Матрица SWOT-анализа представлена в таблице 13.

Таблица 13. SWOT-анализ

| | Сильные стороны: С1. Низкая стоимость. С2. Научная новизна. С3. Современные технологии. С4. Высокий спрос. | Слабые стороны: Сл1. Высокие начальные затраты. Сл2. Отсутствие клиентской базы. Сл3. Узкая направленность |
|---|---|---|
| Возможности: В1. Увеличение спроса. В2. Выход на иностранный рынок. В3. Расширение диапазона предоставляемых услуг. | Увеличение объема производства, прибыли и расширение границ сбыта и клиентской базы. Продажи как в розницу, так и в опт на разных площадках и территориях сбыта. | Высокие начальные затраты уменьшат и не позволят воспользоваться высоким спросом в полной мере. Узкая направленность затруднит увеличение спроса. Расширение диапазона позволит нарастить клиентскую базу и сгладит минусы узкой направленности. |
| Угрозы: У1. Отсутствие потребности на новые технологии. У2. Увеличение конкуренции. У3. Нестабильность экономической ситуации в стране. | Низкая стоимость и научная новизна с применение современных технологий улучшит конкурентную позицию, потребительскую способность и сгладит экономический кризис. | Высокие начальные затраты, увеличение конкуренции и нестабильная экономическая ситуация может ослабить интерес покупателей. |

Выявим соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Данные соответствия или несоответствия помогут выявить потребность в проведении стратегических изменений. Для этого построим интерактивные матрицы проекта (таблицы 14-17).

Таблица 14. Интерактивная матрица для сильных сторон и возможностей

| Сильные стороны проекта | | | | | |
|-------------------------|----|----|----|----|----|
| Возможности проекта | | С1 | С2 | С3 | С4 |
| | В1 | + | - | + | 0 |
| | В2 | + | 0 | - | - |
| | В3 | + | + | - | + |

Таблица 15. Интерактивная матрица для слабых сторон и возможностей

| Слабые стороны проекта | | | | |
|------------------------|----|-----|-----|-----|
| Возможности проекта | | Сл1 | Сл2 | Сл3 |
| | В1 | + | - | + |
| | В2 | - | 0 | - |
| | В3 | 0 | + | + |

Таблица 16. Интерактивная матрица для сильных сторон и угроз

| Сильные стороны проекта | | | | | |
|-------------------------|----|----|----|----|----|
| Возможности проекта | | С1 | С2 | С3 | С4 |
| | У1 | + | + | + | - |
| | У2 | + | + | + | - |
| | У3 | + | + | + | - |

Таблица 17. Интерактивная матрица для слабых сторон и угроз

| Слабые стороны проекта | | | | |
|------------------------|----|-----|-----|-----|
| Возможности проекта | | Сл1 | Сл2 | Сл3 |
| | У1 | + | + | + |
| | У2 | + | - | + |
| | У3 | + | 0 | + |

2.3. Структура работ в рамках научного исследования

Перечень работ и этапов научного исследования представлен в таблице 18.

Таблица 18 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

| Основные этапы | Содержание работы | Исполнитель |
|--|--|---------------------------|
| Разработка технического задания | Составление и утверждение технического задания | Руководитель, Инженер |
| | Календарное планирование | Руководитель, Инженер |
| Выбор направления исследования | Выбор материалов по теме и их изучение | Руководитель, Инженер |
| | Поиск похожих решений | Инженер |
| Теоретическое и экспериментальное исследование | Теоретические расчеты и их обоснование | Инженер |
| | Построение моделей и проведение экспериментов | Инженер |
| | Анализ и сопоставление теоретических и экспериментальных данных | Инженер |
| Обобщение и оценка результатов | Оценка эффективности полученных результатов | Руководитель, Инженер |
| | Оценка целесообразности проведения дальнейших исследований по теме | Руководитель, Исполнитель |
| Разработка технической документации и проектирование | Разработка функциональной схемы автоматизации | Инженер |
| | Составление перечня вход/выходных сигналов | Инженер |
| | Составление схемы информационных потоков | Инженер |
| | Разработка схемы внешних проводок | Инженер |
| | Разработка алгоритмов сбора данных | Инженер |
| | Разработка алгоритмов управления АС | Инженер |
| | Разработка структурной схемы автоматического регулирования | Инженер |
| Оформление отчета | Оформление расчетно-пояснительной записки | Инженер |

2.3.1. Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов [16]. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож i}$ используется следующая формула:

$$t_{ож i} = \frac{3t_{min i} + 2t_{max i}}{5},$$

где $t_{ож i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{p i} = \frac{t_{ож i}}{Ч_i},$$

где $T_{p i}$ – продолжительность работы, раб. дн;

$t_{ож i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел/дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

2.3.2. Разработка графика проведения научного исследования

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} * k_{\text{кал}},$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году (365 дней);

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году ($T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}} = 118$).

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 118} \approx 1,48$$

График проведения научного исследования представлен рисунке 38.

Таблица 19. Расчет трудозатрат

| Название работы | Трудоемкость работ | | | Исполнители | Длительность работ в рабочих днях | Длительность работ в календарных днях |
|---|--------------------|------------|-----------------|-------------|--------------------------------------|--|
| | t_{\min} | t_{\max} | $t_{\text{ож}}$ | | | |
| Составление и утверждение технического задания | 1 | 2 | 1,4 | 1 | 1,4 | 2 |
| Календарное планирование | 2 | 5 | 3,2 | 1 | 3,2 | 5 |
| Выбор материалов по теме и их изучение | 2 | 5 | 3,2 | 1 | 3,2 | 5 |
| Поиск похожих решений | 0,5 | 1 | 0,7 | 2 | 0,35 | 1 |
| Теоретические расчеты и их обоснование | 1 | 3 | 1,8 | 1 | 1,8 | 3 |
| Построение моделей и проведение экспериментов | 2 | 4 | 2,8 | 1 | 2,8 | 4 |
| Анализ и сопоставление теоретических и экспериментальных данных | 0,5 | 1 | 0,7 | 1 | 0,7 | 1 |
| Оценка эффективности результатов | 0,5 | 1 | 0,7 | 2 | 0,35 | 1 |
| Определение целесообразности проведения ОКР | 0,5 | 1 | 0,7 | 2 | 0,35 | 1 |
| Разработка функциональной схемы автоматизации | 1 | 2 | 1,4 | 1 | 1,4 | 2 |
| Составление перечня вход/выходных сигналов | 0,5 | 1 | 0,7 | 1 | 0,7 | 1 |
| Составление схемы информационных потоков | 0,5 | 1 | 0,7 | 1 | 0,7 | 1 |
| Разработка схемы внешних проводок | 1 | 3 | 1,8 | 1 | 1,8 | 3 |
| Разработка алгоритмов сбора данных | 1 | 3 | 1,8 | 1 | 1,8 | 3 |
| Разработка алгоритмов управления АС | 0,5 | 1 | 0,7 | 1 | 0,7 | 1 |
| Разработка структурной схемы автоматического регулирования | 2 | 4 | 2,8 | 1 | 2,8 | 4 |
| Проектирование SCADA-системы | 2 | 5 | 3,2 | 1 | 3,2 | 5 |
| Оформление расчетно-пояснительной записки | 1 | 3 | 1,8 | 1 | 1,8 | 3 |
| ИТОГО: руководитель | | | | | 1,05 | 3 |
| ИТОГО: инженер | | | | | 29,05 | 46 |

| Название работы | Исполнитель | Продолжительность работ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|-------------------------|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|---|
| | | Апрель | | | | | Май | | | | | | | | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | | | | | | |
| Составление и утверждение технического задания | Инженер | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Календарное планирование | Инженер | | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Выбор материалов по теме и их изучение | Инженер | | | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Поиск похожих решений | Инженер, Руководитель | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Теоретические расчеты и их обоснование | Инженер | | | | | 3 | | | | | | | | | | | | | | |
| Построение моделей и проведение экспериментов | Инженер | | | | | | 4 | | | | | | | | | | | | | |
| Анализ и сопоставление теоретических и экспериментальных данных | Инженер | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Оценка эффективности результатов | Инженер, Руководитель | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | |
| Определение целесообразности проведения ОКР | Инженер, Руководитель | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | |
| Разработка функциональной схемы автоматизации | Инженер | | | | | | | | | | 2 | | | | | | | | | |
| Составление перечня вход/выходных сигналов | Инженер | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | |
| Составление схемы информационных потоков | Инженер | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | |
| Разработка схемы внешних проводов | Инженер | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | |
| Разработка алгоритмов сбора данных | Инженер | | | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | |
| Разработка алгоритмов управления АС | Инженер | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | |
| Разработка структурной схемы автоматического регулирования | Инженер | | | | | | | | | | | | | | | | 4 | | | |
| Проектирование SCADA-системы | Инженер | | | | | | | | | | | | | | | | | 5 | | |
| Оформление расчетно-пояснительной записки | Инженер | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 |

Рисунок 38 – График научного исследования

2.4. Бюджет научно-технического исследования

2.4.1. Материальные затраты

Данная статья включает стоимость всех материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам и приведена в таблице 20.

Таблица 20. Материальные затраты

| Наименование | Цена за ед., руб. | Количество, шт | Затраты на Материалы |
|--------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|
| Датчик температуры ОВЕН ДТС094 | 3500 | 2 | 8400 |
| Датчик тока АМЕ-8821-5 | 1750 | 4 | 8400 |
| ОВЕН ПЛК160 | 31860 | 1 | 38233,2 |
| Нагреватель, 1538 Вт | 300 | 1 | 360 |
| Насос омывателя стекол, 12 В | 150 | 4 | 720 |
| Трубка ПВХ, 20 см | 20 | 5 | 120 |
| Э/м реле, 5 А | 250 | 5 | 1500 |
| DIN-рейка, 1 м | 120 | 1 | 144 |
| Итого: | | | 57877,2 |

2.4.2. Основная заработная плата исполнителей темы

Расчеты затрат на основную заработную плату приведены в таблице 21. При расчете учитывалось, что в 2018 году 299 рабочих дней. Основная заработная плата (ЗП) сотрудника от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} * T_p,$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная ЗП одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником (раб. дн.);

$Z_{дн}$ – среднедневная ЗП (руб.)

Среднедневная ЗП рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_M * M}{F_D},$$

где Z_M – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

1. при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;
2. при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_D – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (299 рабочих дней в 2018 году).

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{OK} * k_p,$$

где Z_{OK} – оклад (руб.); k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска). Расчет основной ЗП приведен в таблице 18.

Таблица 21. Расчёт основной ЗП

| Исполнители | Тарифная заработная плата, руб. | Премимальный коэффициент, % | Коэффициент доплат, % | Районный коэффициент, % | Месячный должностной оклад работника, руб. | Среднедневная заработная плата, руб. | Продолжительность работ, дней | Заработная плата основная, руб |
|--------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Руководитель | 31000 | 30 | 30 | 30 | 64480 | 2803,48 | 1,05 | 2943,654 |
| Инженер | 25000 | 30 | 30 | 30 | 58500 | 2543,48 | 29,05 | 73888,094 |
| Итого: | | | | | | | | 76831,748 |

2.4.3. Дополнительная заработная плата исполнительской

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за

отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} * З_{\text{осн}},$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (0,12-0,15);

$З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата.

Получим:

$$З_{\text{доп Р}} = 0,12 * 2943,654 = 1093,68 \text{ руб.};$$

$$З_{\text{доп И}} = 0,12 * 73888,094 = 8866,57 \text{ руб.}$$

2.4.4. Отчисление во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} * (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}),$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.) Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в табличной форме (таблица 22).

Таблица 22. Расчет отчислений во внебюджетного фонды

| Исполнитель | Основная ЗП, руб. | Дополнительная ЗП, руб. | Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды | З _{внеб} , руб. |
|--------------|-------------------|-------------------------|--|--------------------------|
| Руководитель | 2943,654 | 1093,68 | 30% | 1211,2 |
| Инженер | 73888,094 | 8866,57 | 30% | 24826,4 |
| Итого: | | | | 26037,6 |

Получили, что всего будет перечислено 26037,6 руб. во внебюджетные фонды.

2.4.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 23.

Таблица 23. Бюджет затрат НТИ

| Наименование статьи | Сумма, руб. |
|---|-------------|
| Материальные затраты НТИ и прочие расходы | 57 877,2 |
| Затраты по основной заработной плате исполнителей | 76 831,748 |
| Затраты по дополнительной заработной плате | 9 960,25 |
| Отчисления во внебюджетные фонды | 26 037,6 |
| Бюджет затрат НТИ | 170 706,798 |

2.5. Эффективность исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Таблица 24. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

| Критерии | Весовой коэффициент параметра | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 |
|-------------------------|-------------------------------|--------|--------|--------|
| Материалоёмкость | 0,05 | 3 | 4 | 5 |
| Надёжность | 0,1 | 4 | 3 | 2 |
| Производительность | 0,25 | 5 | 3 | 4 |
| Удобство в эксплуатации | 0,15 | 4 | 5 | 3 |
| Энергосбережение | 0,25 | 5 | 4 | 3 |
| Безопасность | 0,2 | 5 | 3 | 4 |
| Итого: | 1 | | | |

На основании полученных показателей выполним сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки (таблица 25).

Таблица 25. Сравнительная эффективность разработки

| № п/п | Показатели | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 |
|-------|---|--------|--------|--------|
| 1 | Интегральный финансовый показатель разработки | 0,58 | 0,75 | 0,97 |
| 2 | Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки | 4,65 | 3,60 | 3,45 |
| 3 | Интегральный показатель эффективности | 8,00 | 4,80 | 3,60 |
| 4 | Сравнительная эффективность вариантов исполнения | 1,67 | 2,22 | 1,33 |

3. Социальная ответственность

3.1. Аннотация

Представление о понятии «Социальная ответственность» будущий специалист может получить из международного стандарта ICCSR26000:2011 «Социальная ответственность организации». В настоящем стандарте используются термины и определения, такие как: Социальная ответственность (social responsibility) – ответственность организации за воздействие ее решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этичное поведение, которое:

- Содействует устойчивому развитию, включая здоровье и благосостояние общества;
- Учитывает ожидания заинтересованных сторон;
- Соответствует применяемому законодательству и согласуется с международными нормами поведения;
- Интегрировано в деятельность всей организации и применяется в ее взаимоотношениях.

3.2. Введение

В представленной работе разработана система управления стендом под названием «Программно-аппаратный комплекс стабилизации температуры в химическом реакторе с водяной рубашкой».

Основными целями создания учебного стенда являются:

- Изучение физических эффектов, возникающих в химическом реакторе;
- Апробирование различных методов управления, смоделированных в специализированных программных пакетах;
- Закрепление теоретических знаний у студентов.

3.3. Состав системы

На рисунке 39 представлена схема разработанной системы.

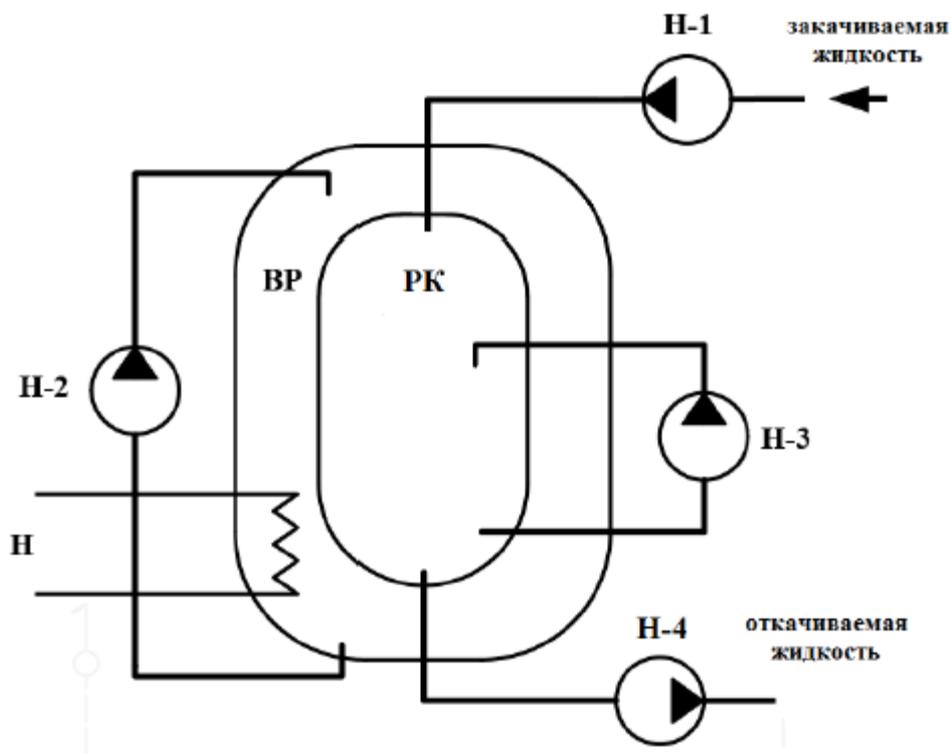


Рисунок 39 – Схема объекта управления

В качестве рабочей камеры химического реактора в физической модели используется стеклянная банка, наполненная водой. Она плотно закрыта крышкой, в которой проделано отверстие для датчика температуры, и помещена в пластиковый контейнер, также плотно закрытый крышкой и играющий роль водяной рубашки. По периметру в зазор между банкой и контейнером уложен нагреватель, а на поверхности закреплен датчик температуры.

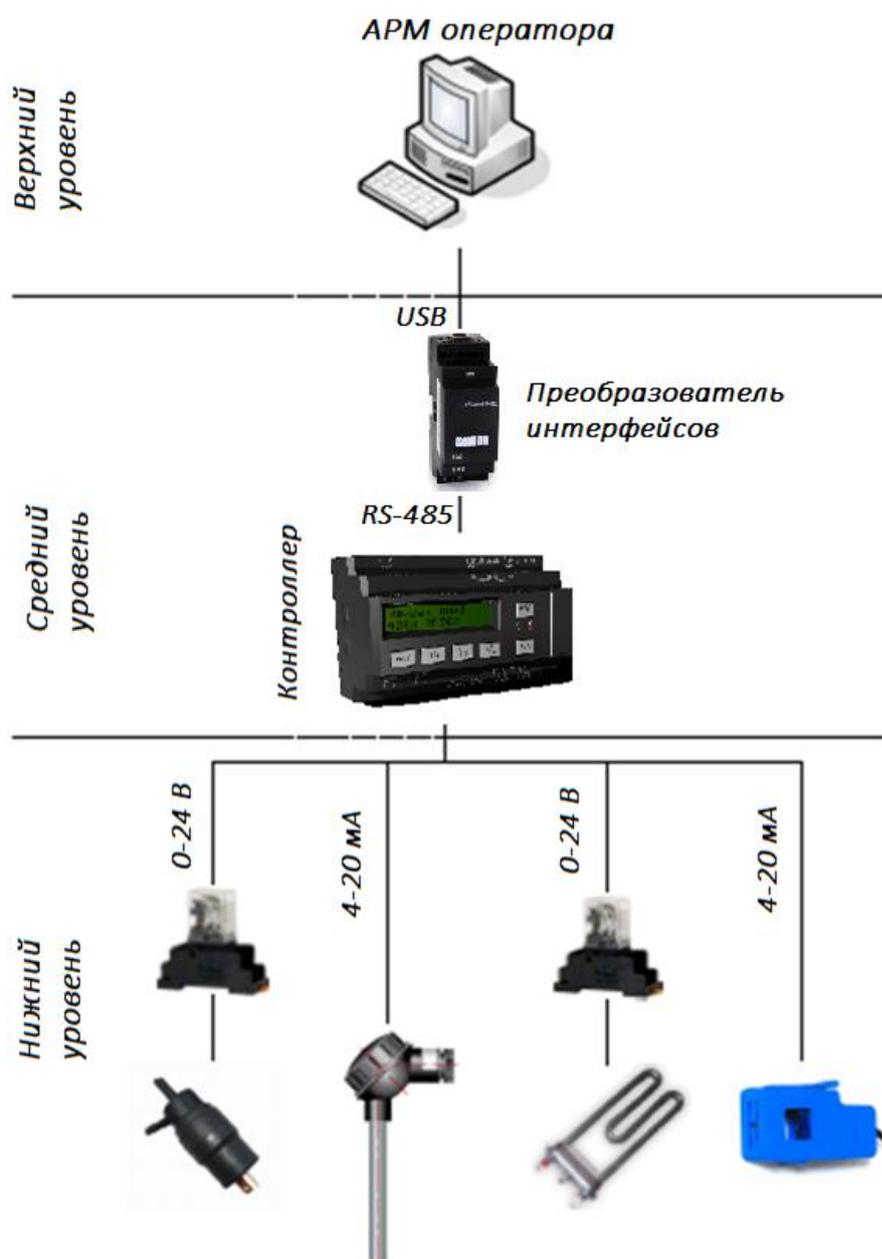


Рисунок 40 – Структурная схема АС

Для равномерного нагрева всего объема жидкости в рабочей камере реактора и водяной рубашке было принято решение использовать циркуляционные насосы.

Для имитации возмущающего воздействия используются два специальных насоса, с помощью которых можно быстро откачать и закачать жидкость в рабочую камеру химического реактора.

Для регистрации показаний с датчиков и формирования управляющего воздействия на электромагнитное реле, с подключенным к нему обогревателем, был выбран программируемый логический контроллер (ПЛК).

Таким образом в состав системы входит следующее оборудование:

- Физическая модель химического реактора;
- 2 датчика температуры;
- Нагревательный элемент;
- 2 циркуляционных насоса;
- 2 насоса для откачки и закачки жидкости в рабочую камеру;
- ПЛК.

Также для данной системы было разработана SCADA системы, которая позволяет получать информацию о течение технологического процесса на экране ПК.

3.4.Методы защиты SCADA

Для повышения надежности SCADA-системы используют следующие методы [22]:

- Разграничение доступа к системе между разными категориями пользователей;
- Защита информации (путем шифрования информации и обеспечения секретности протоколов связи);
- Обеспечение безопасности оператора благодаря отдалению от опасного управляемого процесса (дистанционное управления);
- Специализированные методы защиты от кибератак;
- Применение межсетевых экранов.

Разграничение доступа организуется в системе через различные учетные записи. У сменного оператора, технолога и программиста должны быть разные права доступа к информации и модификации настроек системы.

В АСУ ТП обычно используют криптографические методы защиты информации. Криптографическое преобразование – это преобразование информации, основанное на некотором алгоритме, зависящем от изменяемого параметра (обычно называемого секретным ключом), и обладающее свойством невозможности восстановления исходной информации по преобразованной, без знания действующего ключа, с трудоемкостью меньше заранее заданной.

Защита оператора обеспечивается через дистанционный контроль и дистанционное управление. Это типовые требования Ростехнадзора. Данные требования выполняются через проводные сети, радиоканалы, сеть Интернет и т.д.

Системы информационной безопасности должны максимально подробно выполнять анализ уязвимостей всех компонентов системы с помощью контроля сетевых соединений, используемых программ (антивирус), передаваемых через периметр файлов (шлюзовой антивирус с песочницей, DLP) и действий пользователей (контроль привилегированных пользователей).

3.5. Методы защиты OPC

Для обеспечения информационной безопасности в OPC используются стандартные Web сервисы безопасности, такие как WS-Security, WS-Trust или WS-SecureConversation [23]. Диапазон возможностей средств безопасности простирается от простой аутентификации с помощью пароля и обмена цифровыми подписями до полного шифрования передаваемых сообщений.

3.6. Методы обеспечения безопасности Ethernet

Данные между контроллерным оборудованием и рабочим местом оператора осуществляется по протоколу Ethernet.

Надежность промышленного Ethernet обеспечивается резервированием кабельных линий и сетевых карт, а также специальным программным обеспечением для резервирования.

Для повышения степени защиты системы управления от несанкционированного доступа магистральную сеть Industrial Ethernet отделяют от офисной и используют межсетевой экран.

3.7. Методы защиты программы ПЛК

Одним из уязвимых мест в АСУ является контроллер, а именно программа, написанная для осуществления сбора информации, контроля технологических параметров и автоматического управления оборудованием.

Для обеспечения безопасности возможность просмотра модификации проекта должна быть защищена паролем или аппаратным ключом. Посторонние люди не должны иметь возможность читать, распечатывать и модифицировать проект.

Также необходимо позаботиться о средствах восстановления проекта. При утери исходного кода проекта осуществлять контроль параметров, управление оборудованием будет невозможно. С точки зрения технологического процесса это может повлечь возникновение аварийных ситуаций и остановка производства, т.к. все процессы протекают в режиме реального времени.

Если не использовать различные способы архивации, то единственным способом восстановления исходного проекта будет являться декомпиляция кода. Это будет означать утерю всех комментариев. Помимо этого, исходный код будет трудночитаемым и работа с ним будет гораздо труднее, чем написание аналогичной программы с нуля.

Для обеспечения безопасности в данной ситуации необходимо организовать работу с файлами в правильном режиме. Одним из способов является сжатие всех файлов проекта и сохранение в памяти ПЛК.

Также возможно использование специальных утилит для периодической архивации проектов и сохранения на сервере, сменных носителях, в печатном виде и отправки по электронной почте. В архив помещаются исходные файлы, текстовое описание архива и любые другие нужные файлы. Промежуточные версии проекта не перезаписываются, а хранятся независимо, что позволяет осуществлять быстрый откат при выборе неудачного решения.

3.8. Влияние на человека

В разработанной системе необходимо внедрение рабочего места оператора. Для обеспечения безопасности для жизни и здоровья оператора, необходимо организовать ее расположение на достаточном расстоянии от технологического процесса. Это позволит избежать воздействия на оператора вредных факторов со стороны технологического оборудования.

На рабочем месте оператора необходим персональный компьютер. Персональный компьютер являются потенциальными источниками электромагнитного излучения. Электромагнитные излучения оказывают негативное влияние на здоровье человека.

Для того чтобы избежать негативного воздействия от электромагнитного излучения необходимо следовать основным нормам, описанным в СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Для снижения воздействия электромагнитного излучения применяют следующие меры:

- Расстояние от монитора до работника должно составлять не менее 50 см;
- Применение экранных защитных фильтров, а также средств индивидуальной защиты.

3.9. Удобство в использовании

При использовании разработанной системы возможно дистанционное управление оборудованием. Дистанционное управление обеспечивает

максимальное удобство для персонала, т.к. не требуется их непосредственное присутствие на технологическом объекте. Все необходимые данные о протекании технологического процесса отображаются в удобном для персонала виде на экране ПК.

Была разработана экранная форма SCADA системы. Она позволяет отобразить ключевые параметры системы (температура в водяной рубашке и температура в рабочей камере). Анализируя вид переходного процесса, можно делать выводы о качестве регулирования, а также регистрировать аварийные ситуации.

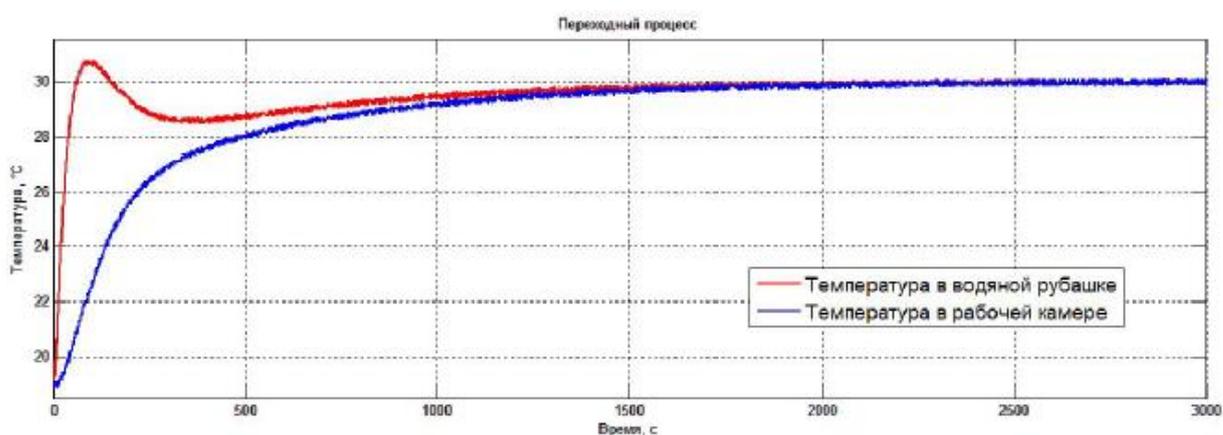


Рисунок 41 – Мнемосхема АСУ

Значения всех параметров системы сохраняются в архив, к которому можно получить доступ при составлении отчетности и анализе аварийных ситуаций.

3.10. Надежность системы

Внедрение автоматизированной системы управления химическим реактором обеспечивает высокую надежность управления. Данная система позволяет зафиксировать предаварийные состояния и избежать опасных ситуаций. При ликвидации аварийных ситуаций, предприятие не будет нести всевозможные издержки, связанные с заменой оборудования из-за поломками во время аварий и простоем технологического процесса из-за остонава.

Заключение

В результате выполненной работы был разработан метод управления учебным стендом «Программно-аппаратный комплекс стабилизации температуры в химическом реакторе с водяной рубашкой», который удовлетворяет требуемым качествам переходных процессов. Данный метод позволяет достичь в системе заданного значения температуры за минимальное время переходного процесса.

Также была получена математическая модель системы, в которой были оценены неизвестные параметры. Данная модель описывает процессы обмена энергией внутри физической модели химического реактора. С помощью данной модели возможно производить синтез различных регуляторов и применять к ней разнообразные методы управления.

Была произведена оценка ресурсоэффективности проекта. Из этой оценки можно сделать вывод, что проект является конкурентоспособным.

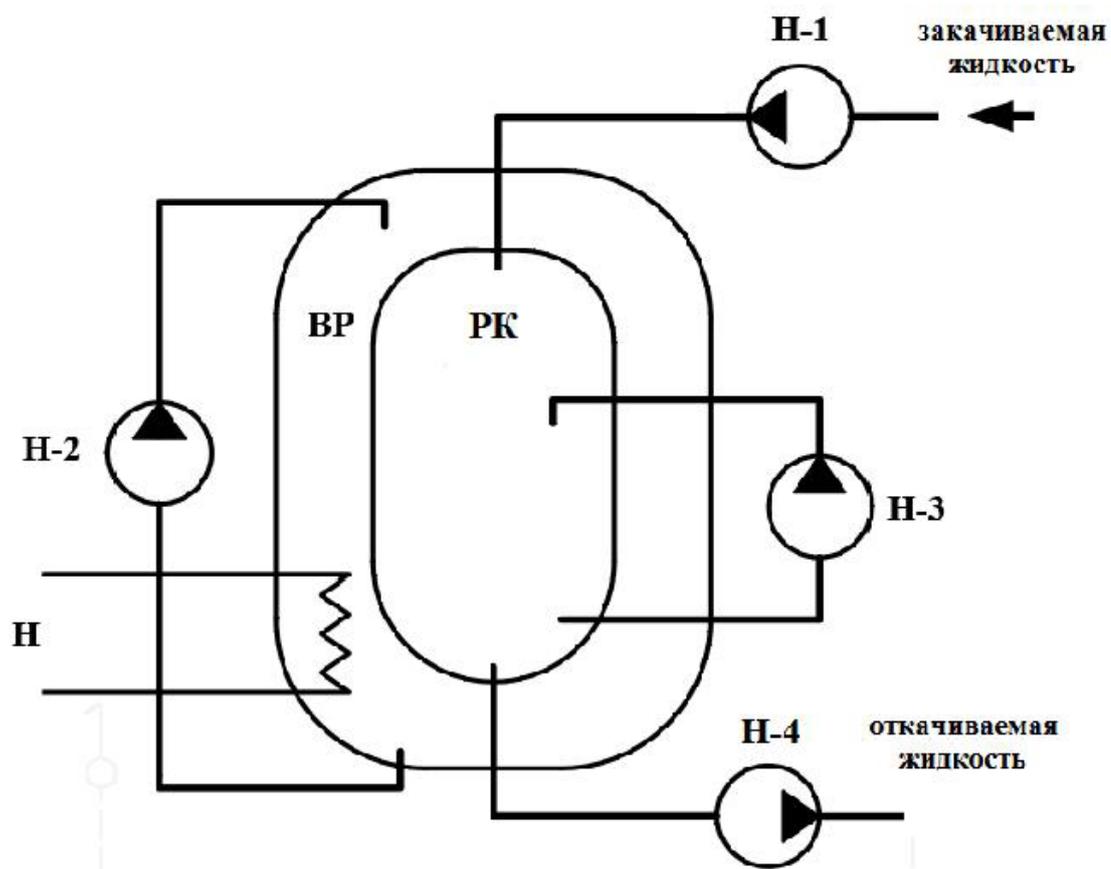
В разделе солильной ответственности был произведен анализ надежности системы и методы ее повышения. Были выявлены способы повышения надежности системы. По данному разделу можно сделать вывод, что внедрение синтезированного регулятора в систему повышает надежность системы и помогает избежать аварийных ситуаций.

Список используемых источников

1. Дерябкин И.В. Вариационный метод синтеза алгоритмов параметрической идентификации динамических систем с использованием регуляризации. // «Системный анализ, управление и обработка информации». Таганрог, 2013.
2. Соловьев П.А., Кочетыгов И.С, Тутов И.А. Разработка испытательного стенда нагревательной установки для отработки навыков синтеза и настройки цифровых регуляторов. // Научн.-практ.конф. «Молодежь и современные информационные технологии» (13-16 ноября 2013г, г. Томск). – Томск, 2013. – С.288-290.
3. Бутузов Д.В., Тутов И.А. Разработка испытательного стенда нагревательной установки с водяной рубашкой. // Научн.-практ.конф. «Молодежь и современные информационные технологии» (9-13 ноября 2015г, г. Томск). - Томск, 2016. - С.223-224.
4. Химический реактор. URRL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Химический_реактор
5. Программируемое реле с дисплеем ОВЕН ПР200 URRL: http://www.owen.ru/catalog/programmiruемое_rele_pr200/77396741
6. Спецификация датчика температуры ОВЕН ДТС015-И. URRL: http://www.owen.ru/catalog/termopreobrazovateli_soprotivleniya_dts_tipa_tsp_tsm/87380592
7. Спецификация датчика тока АМЕ-8821-5. URRL: http://www.aktakom.ru/kio/index.php?SECTION_ID=13700&ELEMENT_ID=6467389
8. Спецификация насоса. URRL: <http://www.gruppa-omega.ru/price-list/16-jelektronasos-omyvatelja-stekol.html>
9. Закон Ньютона-Рихмана. URRL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ньютон-Рихман>

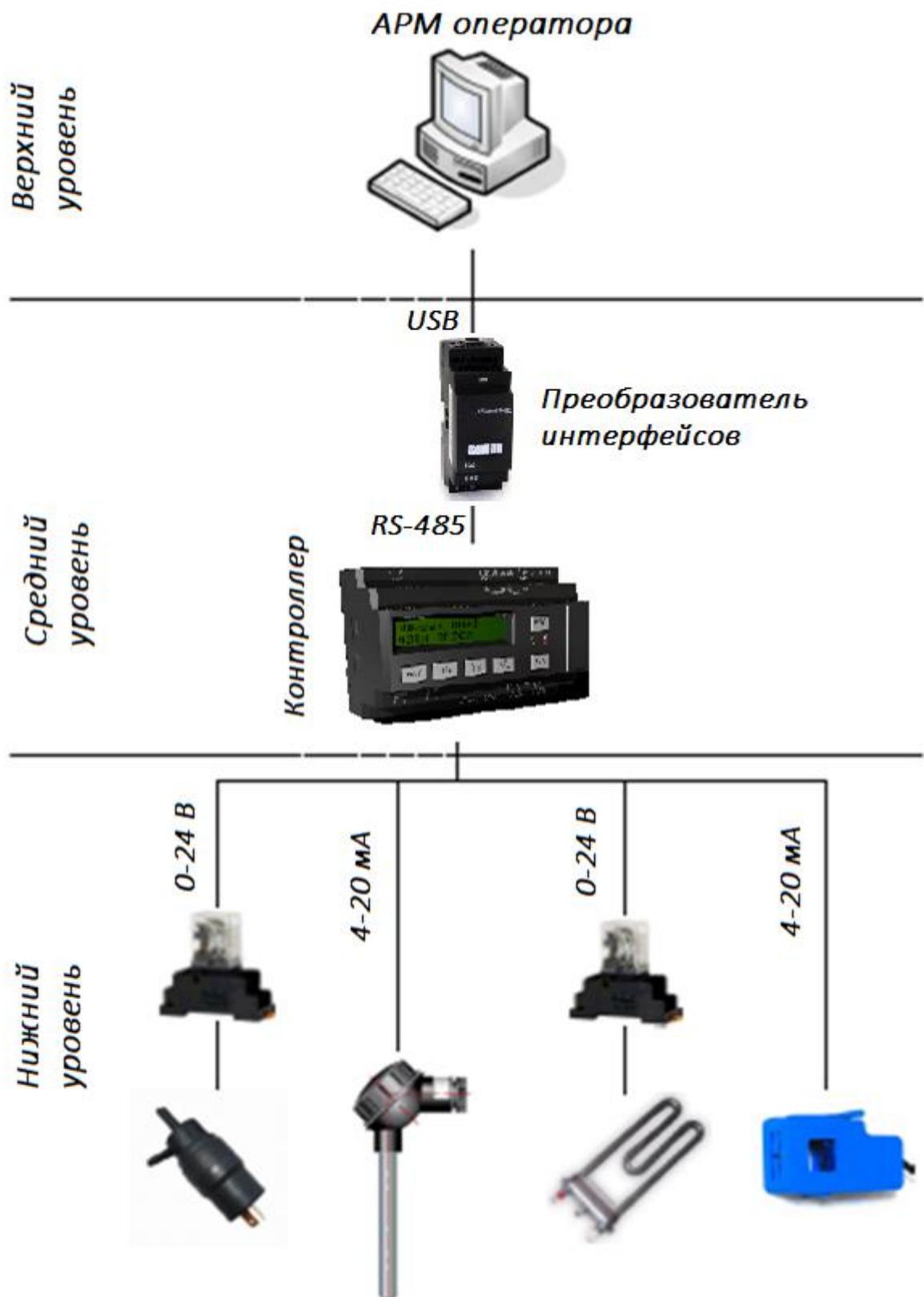
10. Линеаризация моделей Simulink URRL:
<https://matlab.ru/solutions/application/control-systems/linearization>
11. Методы настройки ПИД-регулятора. URRL:
http://www.bookasutp.ru/Chapter5_5.aspx
12. Модификации ПИД-регуляторов URRL:
http://www.bookasutp.ru/Chapter5_3.aspx
13. Особенности реальных регуляторов URRL:
http://www.bookasutp.ru/Chapter5_4.aspx
14. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.
15. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
16. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175с.
17. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.
18. Сущность методики FAST в области ФСА [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://humeur.ru/page/sushhnost-metodiki-fast-v-oblasti-fsa>.
19. Безопасность жизнедеятельности. Учебник. Под ред. Э.А. Арустамова / 10-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во «Дашков и К°», 2006. — 476 с.
20. Назаренко, Ольга Брониславовна. Безопасность жизнедеятельности : учебное пособие / О. Б. Назаренко, Ю. А. Амелькович; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 3-е изд., перераб. и доп. — Томск: Изд-во ТПУ, 2013. — 177 с
21. СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях»
22. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным
23. Системы автоматического контроля и сбора информации (SCADA)
 URRL:<https://bourabai.ru/dbt/scada.htm>
24. OPC-сервер URRL: http://www.bookasutp.ru/Chapter9_2.aspx

Приложение А Функциональная схема технологического процесса



| ПК | ВР | Н-1 | Н-2 | Н-3 | Н-4 | Н |
|----------------|-----------------|--------------------|-----------------------|-----|-------------------|-------------|
| Рабочая камера | Водяная рубашка | Насос для заправки | Циркуляционные насосы | | Насос для откачки | Нагреватель |

Приложение Б Иерархическая схема станда



Приложение В Структурная схема системы САР

