

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Модернизация системы управления ректификационной колонной на базе систем усовершенствованного управления технологическим процессом

УДК 681.51-048.35:66.048.37

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8TM71	Селивёрстов Павел Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н.		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Суханов Алексей Викторович	к.х.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Рыжакина Татьяна Гавриловна	к. экон. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШПИБ	Исаева Елизавета Сергеевна	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Суходоев Михаил Сергеевич	к.т.н		
Руководитель ОАР	Леонов Сергей Владимирович	к.т.н		

Томск – 2019 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код рез-та	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные</i>		
P1	применять глубокие естественно-научные, математические знания в области анализа, синтеза и проектирования для решения научных и инженерных задач производства и эксплуатации автоматизированных систем, включая подсистемы управления и их программное обеспечение.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-3, ОПК-1, ОПК-4, ОК-1, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	воспринимать, обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации автоматизированных систем, принимать участие в командах по разработке и эксплуатации таких устройств и подсистем.	Требования ФГОС (ПК-3, ПК-4, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОК-1, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-9), Критерий 5 АИОР (пп. 1.1, 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	применять и интегрировать полученные знания для решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных автоматизированных систем и подсистем (в том числе интеллектуальных) с использованием технологий машинного обучения, современных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-15, ПК-18, ОПК-3, ОПК-6, ОК-1, ОК-5, ОК-6, ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	определять, систематизировать и получать необходимую информацию в области проектирования, производства, исследований и эксплуатации автоматизированных систем, устройств и подсистем.	Требования ФГОС (ПК-7, ПК-10, ПК-11, ПК-12, ПК-18, ОПК-4, ОПК-6, ОК-1, ОК-4, ОК-6, ОК-8), Критерий 5 АИОР (п.1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования для целей проектирования, производства и эксплуатации систем управления технологическим процессом и подсистем (в том числе интеллектуальных) с использованием передового отечественного и зарубежного опыта, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-6, ПК-13, ПК-17, ПК-18, ОПК-2, ОПК-3, ОК-1, ОК-3, ОК-4, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	понимать используемые современные методы, алгоритмы, модели и технические решения в автоматизированных системах и знать области их применения, в том числе в составе безлюдного производства.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-9, ОК-10), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Код рез-та	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Универсальные</i>		
P7	эффективно работать в профессиональной деятельности индивидуально и в качестве члена команды.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2 ПК-7, ПК-8, ПК-16, ПК-17, ОК-1, ОК-2, ОК-4, ОК-6, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально- экономических различий	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-8, ПК-9, ПК-16, ОПК-4, ОК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	проявлять широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, демонстрировать понимание вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду	Требования ФГОС (ПК-5, ПК-8, ПК-15, ПК-16, ПК-18, ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОК-3, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	следовать кодексу профессиональной этики и ответственности и международным нормам инженерной деятельности	Требования ФГОС (ПК-8, ПК-11, ПК-16, ОПК-3, ОПК-6, ОК-4), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-8, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8), Критерий 5 АИОР (2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Уровень образования – магистратура
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники
 Период выполнения – весенний семестр 2018/2019 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
20.05.2019	Социальная ответственность	20
31.05.2019	Основная часть	60

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Суходоев Михаил Сергеевич	к.т.н		



«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники

Направление подготовки – 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и

Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

Суходоев М.С.

(Подпись) (Дата)

Суходоев М.С.

(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8TM71	Селивёрстову Павлу Андреевичу

Тема работы:

Модернизация системы управления ректификационной колонной на базе систем усовершенствованного управления технологическим процессом

Утверждена приказом директора (дата, номер)

12.02.2019 №1099/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объектом исследования является система управления ректификационной колонной установки деэтанзации и стабилизации конденсата (УДСК)

Цели работы: модернизация существующей системы автоматизированного управления на базе системы усовершенствованного управления.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1 Обзор литературы и постановка проблемы 2 Обоснование научной новизны и практической значимости 3 Описание технологического процесса 4 Разработка модели системы управления 5 Описание динамики САР при различных стратегиях управления 6 Описание системы автоматизированного управления технологическим процессом
---	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Рыжакина Татьяна Гавриловна, доцент отделения социально-гуманитарных наук ШБИП, к.экон.н.
Социальная ответственность	Исаева Елизавета Сергеевна, старший преподаватель ООД ШБИП
Раздел на иностранном языке	Пичугова Инна Леонидовна, старший преподаватель отделения иностранных языков ОИЯ ШБИП

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Введение;

1 Литературный обзор и постановка проблемы;

3.3 Описание технологической схемы;

5.3.2 МРС-управление процессами ММО-системы «буферная емкость – колонна ректификации».

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ71	Селивёрстов Павел Андреевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО		
8TM71	Селивёрстов Павел Андреевич		
Школа	Информационных технологий и робототехники	Отделение школы (НОЦ)	Автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.04. 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	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных источниках, стандартах, проведение моделирования работы с помощью ЭВМ и оценка эффективности исследуемой и разрабатываемой системы
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Проведение предпроектного анализа и определение возможных альтернатив проведения НТИ
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Запланировано управление научно-техническим проектом; выделены контрольные события проекта; рассчитан бюджет исследования
3. Разработка устава научно-технического проекта	Проект выполняется в рамках магистерской диссертации, устав не требуется
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Анализ финансовой эффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Сегментирование рынка
2. Оценка конкурентоспособности технических решений
3. Диаграмма FAST
4. Матрица SWOT
5. График проведения и бюджет НТИ
6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Рыжакина Татьяна Гавриловна	к. экон. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8TM71	Селивёрстов Павел Андреевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
8ТМ71		Селивёрстов Павел Андреевич	
Школа	Информационных технологий и робототехники	Отделение школы (НОЦ)	Автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Тема ВКР:

«Модернизация системы управления ректификационной колонной на базе систем усовершенствованного управления технологическим процессом»	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Целью выполнения работы является модернизация существующей автоматизированной системы управления ректификационной колонной. Разработка будет использоваться на установке деэтанзации и стабилизации конденсата.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: 1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства 1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	1. Трудовой кодекс РФ от 30.12.2001 № 197-ФЗ; 2. Закон о санитарно-эпидемиологическом благополучии от 30.03.1999 № 52-ФЗ; 3. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. 4. Типовая инструкция по охране труда при работе ТОИ Р-45-084-01
2. Профессиональная социальная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов	1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения: – Отклонение показателей микроклимата; – Превышение уровня шума; – Электромагнитные и электрические поля; – Возможность поражения электрическим током; – Отсутствие или недостаток естественного света.
3. Экологическая безопасность:	Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС на объекте: производственные аварии, пожары и возгорания.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Исаева Елизавета Сергеевна	—		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ71	Селивёрстов Павел Андреевич		

Реферат

Пояснительная записка содержит 164 страницы машинописного текста, 34 таблицы, 40 рисунков, 1 список использованных источников из 38 наименований, 4 приложения.

Ключевые слова: МРС-РЕГУЛЯТОР, АРС-УПРАВЛЕНИЕ, СУУТП, ANTI-WINDUP СТРАТЕГИЯ, УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ.

Объектом исследования является колонна ректификации.

Цель работы – модернизация автоматизированной системы управления.

В данной работе разработана и исследована система усовершенствованного управления ректификационной колонной. Были выполнены поставленные задачи:

- изучение основ процессов, протекающих при ректификации многокомпонентной смеси;
- создание модели системы управления ректификационной колонной на УДСК;
- применение усовершенствованной АРС-стратегии управления в созданной системе;
- применение классической стратегии ПИД-управления в созданной системе;
- проведение анализа эффективности АРС-управления и подведение итогов.

Область применения: нефтегазовая и нефтехимическая отрасли.

Фактором экономического эффекта, достигаемым в предложенной работе, является возможность получения оптимальных режимов работы системы управления, а также снижение потерь при смене режима работы системы, снижение экономических затрат, путем экономии энергетических ресурсов.

Содержание

Термины и определения	14
Обозначения и сокращения	16
Введение	17
1 Обзор литературы и постановка проблемы	19
2 Обоснование научной новизны и практической значимости	25
3 Описание технологического процесса	28
3.1 Сырьё и продукты установки деэтанализации и стабилизации конденсата и их схема движения	29
3.2 Основные сооружения	29
3.3 Описание технологической схемы установки деэтанализации и стабилизации конденсата	30
4 Разработка модели системы управления	39
4.1 Модель системы регулирования уровня среды в разделителе жидкости .	39
4.2 Модель системы регулирования для буферной емкости и колонны ректификации	46
5 Описание динамики САР при различных стратегиях управления	52
5.1 Классическое ПИД-регулирование	52
5.2 Управление с применением стратегии «Anti-windup control»	57
5.3 Управление с использованием управления с прогнозирующими моделями (MPC)	63
5.3.1 Сущность MPC-управления	63
5.3.2 MPC-управление процессами МИМО-системы «буферная емкость – колона ректификации»	71
5.3.3. Исследование влияния изменения режима работы системы	78

6 Описание системы автоматизированного управления технологическим процессом.....	82
6.1 Структура системы	82
6.2 Технические средства системы.....	83
6.2.1. Технические средства среднего уровня.....	83
6.2.2. Технические средства верхнего уровня.....	85
6.3 Перспективы развития, модернизации системы.....	87
6.4 Численность и квалификация персонала системы	87
6.5 Соблюдение требования безопасности.....	88
6.6 Обеспечение надежности системы.....	88
6.7 Защита КТС от внешних воздействий	89
7 Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	91
7.1 Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ.....	91
7.1.1 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	91
7.1.2 Потенциальные потребители результатов исследования	92
7.1.3 SWOT-анализ.....	93
7.1.4 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	95
7.1.5 FAST-анализ	97
7.2 Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок.....	101
7.2.1 Контрольные события проекта	101
7.2.2 План проекта.....	102
7.2.3. Определение трудоемкости выполнения работ	102

7.2.4. Разработка графика проведения научного исследования	103
7.3 Разработка устава научно-технического проекта	106
7.3.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты.....	106
7.3.2 Специальное оборудование для научных работ	107
7.3.3 Основная и дополнительная зарплата научно-производственного персонала.....	108
7.3.4 Отчисления во внебюджетные.....	110
7.3.5 Накладные расходы.....	111
7.4 Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности.....	112
7.4.1 Оценка сравнительной эффективности исследования	112
7.4.2 Оценка абсолютной эффективности исследования.....	114
7.4.2.1 Расчет чистой текущей стоимости	115
7.4.2.2 Дисконтированный срок окупаемости.....	116
7.4.2.3 Внутренняя ставка доходности (IRR)	117
7.4.2.4 Индекс доходности (рентабельности) инвестиций	119
7.5 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	120
8 Раздел «Социальная ответственность»	121
8.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	122
8.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	122
8.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	124
8.2 Профессиональная социальная безопасность	125
8.2.1 Отклонение показателей микроклимата.....	126
8.2.2 Превышение уровня шума	127
8.2.3 Электробезопасность	128

8.2.4 Отсутствие или недостаток естественного света.....	129
8.2.5 Электромагнитное и электростатическое излучения	130
8.3 Экологическая безопасность.....	131
8.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	133
8.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований	133
8.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	134
8.5 Вывод по разделу «Социальная ответственность».....	137
Заключение	138
Список используемых источников.....	139
Приложение А. Modernization of rectification column management system based on advanced process control systems.....	143
Приложение Б. Структурная схема технологического процесса УДСК.....	162
Приложение В. Модель системы управления процессами ректификации с классическим ПИД-управлением	163
Приложение Г. Модель системы управления процессами ректификации с усовершенствованным управлением.....	164

Термины и определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

SCADA (англ. Supervisory Control And Data Acquisition): Инструментальная программа для разработки программного обеспечения систем управления технологическими процессами в реальном времени и сбора данных.

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП): Автоматизированная система управления технологическим процессом – комплекс программных и технических средств, предназначенный для автоматизации управления технологическим оборудованием на предприятиях. Под АСУ ТП обычно понимается комплексное решение, обеспечивающее автоматизацию основных технологических операций на производстве в целом или каком-то его участке, выпускающем относительно заверченный продукт.

Автоматизированное рабочее место (АРМ): Программно-технический комплекс, предназначенный для автоматизации деятельности определенного вида. При разработке АРМ для управления технологическим оборудованием, как правило, используют SCADA-системы.

Математическая модель (ММ): Представление изучаемого в конкретно-научном знании явления или процесса на языке математических понятий. При этом ряд свойств исследуемого явления предполагается получить на пути исследования собственно математических характеристик модели.

Программируемый логический контроллер (ПЛК): 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.

Распределенная система управления (РСУ): Система управления технологическим процессом, характеризующаяся построением распределённой системы ввода вывода и децентрализацией обработки данных.

Технологический процесс (ТП): последовательность технологических операций, необходимых для выполнения определенного вида работ. Технологический процесс состоит из рабочих операций, которые в свою очередь складываются из рабочих движений (приемов).

Anti-windup control (управление с компенсацией интегрального насыщения): стратегия управления, позволяющая минимизировать влияние интегрального насыщения (эффект, наблюдающийся в ПИД-регуляторе с ненулевой интегральной составляющей, когда в течение длительного времени приходится компенсировать ошибку, лежащую за пределами диапазона управляемой переменной).

APC (Advanced Process Control (усовершенствованное управление процессами)): стратегия управления, основанная на различных технологиях и методах, позволяющих максимально оптимизировать технологический процесс.

MPC (Model Predictive Control (управление с прогнозирующими моделями)): один из современных методов анализа и синтеза систем управления, основанный на математических методах оптимизации, являющийся улучшенным вариантом управления с отрицательной обратной связью.

Обозначения и сокращения

В данной работе применены следующие сокращения с соответствующими обозначениями:

АРМ – Автоматизированное рабочее место;

АСУ – Автоматизированная система управления;

АСУ ТП – Автоматизированная система управления технологическим процессом;

БАК – Блок арматурный колонны;

БАП – Блок арматурный печи;

БЗ – Блок замера;

БКС ННГ – Блочная компрессорная станция низконапорных газов;

КИПиА – контрольно-измерительные приборы и автоматика;

ОУ – Объект управления;

ПИД-регулятор – Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор;

ПО – Программное обеспечение;

САР – система автоматического регулирования;

ТСП – Товарно-сырьевой парк;

УДСК – Установка деэтанзации и стабилизации конденсата;

УКПГиК – Установка комплексной подготовки газа и конденсата;

ФСА – функциональная схема автоматизации;

ЧП – частотный преобразователь;

ЭД – электродвигатель;

APC – Advanced Process Control (усовершенствованное управление процессами);

MIMO-system – multiple input multiple output system (система с множеством входов и выходов);

MPC – Model Predictive Control (управление с прогнозирующими моделями).

Введение

В настоящее время перед предприятиями первоочередными задачами стоят не только вопросы безопасности, надежности производства, улучшения качества продукции, но и такие задачи, которые позволяют повысить прибыльность предприятия, решить вопросы экономичности производства и сокращения экономических потерь. Системы усовершенствованного управления технологическим процессом (СУУТП) или, иностранный вариант, APC-управление («Advanced Process Control») направлены на подъем такого экономического показателя, как прибыльность предприятия за счет увеличения производительности технологических установок, сокращения энергетических затрат, вывода показателей качества продукции к стабильным значениям, значительного редуцирования потерь при смене режима работы, а также повышения как стабильности, так и безопасности работы установок. Помимо этого, следует выделить повышение управляемости установок. MPC-управление («Model Predictive Control») или управление с прогнозирующими моделями является основным направлением развития СУУТП. Использование такого управления открывает возможность увеличения прибыльности предприятия в ситуациях с жесткими ограничениями, наложенными на управляющие и регулируемые переменные, а также в случае управления сложными объектами, имеющими многопараметрическую структуру.

Нефтегазовая промышленность является ведущей отраслью промышленности Российской Федерации, а объекты нефтегазовой промышленности – сложные объекты, обладающие множеством параметров с ограничениями, наложенными на эти параметры. Добыча природных ископаемых плотно связана с их дальнейшей переработкой. При переработке нефти и газа получается побочный продукт – нестабильный газовый конденсат. Данный вид конденсата является сырьем для установок деэтанзации и стабилизации конденсата (УДСК). Стабильный газовый конденсат предназначен для использования в нефтехимической промышленности и получения топлива на его основе. Также следует отметить, что вопросы полноты использования

природных ресурсов всегда стояли достаточно остро и игнорировать побочные продукты, получаемые на различных этапах, нельзя. Отсюда следует, что необходимо уделить особое внимание вопросам управления и регулирования на предприятиях, где происходят процессы комплексной подготовки газа. А также вопросам увеличения экономической эффективности предприятий, снижению энергетических и материальных затрат, улучшению качества подготавливаемой нефти и нефтепродуктов, экономии ресурсов.

В рамках данной диссертации предлагается модернизировать имеющуюся систему АСУ ТП с применением СУУТП, получив в результате повышение качества и надежности управления процессами ректификации и снижение затрат производственного характера.

На данном этапе следует сформулировать цели и задачи модернизации:

- 1) Увеличение надежности автоматизированной системы управления;
- 2) Вывод управления технологическим процессом в оптимальные режимы;
- 3) Улучшение системы противоаварийных сигнализаций и защит (ПАСиЗ);
- 4) Усиление контроля над выбросами вредных веществ;
- 5) Увеличение прибыльности производства продукции.

1 Обзор литературы и постановка проблемы

Объектом исследования данной магистерской диссертации является система управления ректификационной колонной, которая выполнена по двух колонной схеме и располагается на установке деэтанзации и стабилизации конденсата. На данный момент можно выделить, что существующие на сегодняшний день системы автоматизированного управления, опираются на классические методы регулирования, но при этом соответствуют требованиям безопасности и выполняют предписываемые им задачи. Однако будет справедливым заметить, что данные системы не ориентированы на эффективность. Задачи современных компаний заключаются не только в получении безопасного автоматизированного процесса, но и в получении экономической эффективности от использования АСУ. Под экономической эффективностью следует понимать снижение экономических потерь, уменьшение затрат на эксплуатацию, а также увеличение качества продукции и прибыльности производства. Добиться этих целей можно путем вывода технологического процесса на оптимальный режим работы. Это становится возможным при использовании систем усовершенствованного управления технологическим процессом (СУУТП). Использование СУУТП на базе APC-управления позволяет улучшить технологический процесс, не за счет модернизации материальной части производства, а за счет рационализации и оптимизации управления процессом, что гораздо дешевле. Основное направление развития СУУТП – управление с использованием прогнозирующих моделей «Model Predictive Control» (MPC-управление).

В АСУ объектами нефтегазовой отрасли достаточно распространены регуляторы пропорционально-интегрально-дифференцирующего типа (ПИД-регуляторы). ПИД-регулятор имеет простую и компактную структуру, однако при этом позволяет, в большинстве случаев, достичь цели управления. Помимо этого, эффективность алгоритмов ПИД-управления повышается за счет новых разработок и идей: реализуются различные варианты дифференцирующей составляющей, развиваются новые структуры ПИД-регуляторов. Главный

вопрос использования ПИД-регулятора – настройка коэффициентов составляющих. В настоящее время настройка коэффициентов регулятора может осуществляться в автоматическом режиме, но не стоит забывать о такой проблеме, как дрейф параметров во времени у большинства технологических процессов нефтегазовой промышленности. Таким образом, ПИД-регулятор, настроенный один раз на старте ввода системы в эксплуатацию, не в состоянии обеспечить достижения цели управления на большей части времени эксплуатации объекта управления (ОУ). Соответственно, получаем ситуацию, когда необходима постоянная подстройка коэффициентов регулятора, для достижения оптимальных режимов работы, которые в свою очередь необходимы для получения наибольшей экономической выгоды. Для традиционных алгоритмов характерна работа не в самом оптимальном режиме, что ведет к потере эффективности управления технологическим процессом.

Объекты нефтегазовой отрасли следует отнести к группе сложных многопараметрических объектов, некоторые из которых имеют как множество входных, так и выходных переменных. Для производств нефтегазовой отрасли характерны сложные случаи управления технологическим процессом. Во время процесса стабилизации конденсата на двухколонной схеме ректификации контролируются порядка пятнадцати различных параметров. Также стоит отметить, что процесс корректируется по результатам анализа лаборатории нефти и газа, пробы для которой отбираются непосредственно с работающей установки. Еще более сложный характер имеют некоторые случаи управления производствами нефтехимической промышленности. В этих и подобных случаях требуются системы автоматизации с дополнительными или же, можно сказать, улучшенными свойствами и характеристиками. Решением подобных задач являются методы регулирования на базе прогнозирующих моделей.

Для реальных систем управления одной из проблем является эффект «windup», называемый также эффектом интегрального насыщения, который возникает из-за нелинейности некоторых элементов реальных систем. Данная нелинейность возникает ввиду различных ограничений реальной системы.

Например, ограничение по мощности двигателя, по выходной скорости вращения вала двигателя, угла поворота, площади поперечного сечения клапана и других ограничений. Данную нелинейность относят к нелинейностям типа «насыщение» («saturation»). Данный тип нелинейности принудительно разрывает контур регулирования, при достижении переменной граничного значения, или же можно сказать, что контур переходит в состояние насыщения. В данном состоянии изменения входной переменной не оказывает никакого влияния на выходную переменную звена. Касательно систем с ПИД-регулятором, может иметь место интегральное насыщение, при условии ненулевой интегрирующей составляющей. К последствиям интегрального насыщения относят значительное затягивание переходного процесса (ПП), а также рост перерегулирования. Для минимизации неблагоприятных последствий интегрального насыщения существует возможность применения стратегии управления типа «anti-windup control».

При выполнении магистерской диссертации работа подразделилась на следующие основные этапы:

- поиск, анализ и изучение литературы;
- разработка модели управления технологическим процессом;
- внедрение и анализ различных стратегий управления.

Литературный обзор осуществлялся по двум основным направлениям: поиск литературы с описанием принципов работы ректификационных колонн и их математических моделей; поиск литературы с описанием методов усовершенствованного управления (АРС-управления).

Перед тем, как приступить к формированию необходимых математических моделей, необходимо было изучить информацию о процессах, происходящих в ректификационной колонне двухколонного типа. Для изучения этой информации были использованы: учебные пособия Н.В. Ушевой «Технологические основы и моделирование процессов промышленной подготовки нефти и газа», Дытнерского Ю.И. «Процессы и аппараты химической технологии», работа Т.М. Бекирова, Г.А. Ланчакова «Технология обработки газа

и конденсата» [1,2,3]. В этих работах достаточно подробно описаны процесс ректификации и устройство ректификационных колонн.

При формировании математической модели ректификационной колонны использовалась работа Дытнерского Ю.И. «Основные процессы и аппараты химической технологии». [4], а также учебное пособие В.Ф. Комиссарчика «Автоматическое регулирование технологических процессов» [5]. Первая работа была полезна при формировании общей структуры системы, для формирования понимания особенностей преобразования сигнала при последовательном прохождении элементов технологического процесса. Учебное пособие В.Ф. Комиссарчика было использовано для установления зависимости между давлением, коэффициентом расхода задвижки и объемным расходом вещества через задвижку. Уравнения, представленные В.Ф. Комиссарчиком использовались для преобразования значения давления в значение расхода.

Изучение процессов, происходящих при ректификации многокомпонентной смеси, позволило сделать вывод о сложности исследуемого процесса, а также понять, что формирование математической модели нельзя отнести к легкой задаче. Для формирования математической модели ректификационной колонны были рассмотрены работы Азизова С. А., Али-заде Н. С., Искандер-заде З. А., Молчанова А.М. «Современное состояние математического моделирования ректификационных колонн» [6], Авазова Ю.Ш., Кадырова Ё.Б., Саттаров О.У. «Моделирование системы управления процессом ректификации» [7]. Данные работы позволили сформировать математическую модель на основе уравнений материального и энергетического баланса. В данной работе была рассмотрена математическая модель системы «буферная емкость – колонна ректификации». В данной модели имеются два входных управляющих сигнала, два выходных сигнала и пять переменных состояния. Эта модель была взята за основу при моделировании работы буферной емкости и колонны ректификации.

После завершения формирования математических моделей, главной целью стало изучение усовершенствованного управления технологическим

процессом и применения его к процессам ректификации. Тема СУУТП обсуждается как в отечественной, так и в зарубежной литературе. В статье В.М. Дозорцева, Э.Л. Ицковича и Д.В. Кнеллера «Усовершенствованное управление технологическими процессами (APC): 10 лет в России» [9] были рассмотрены основы и история развития усовершенствованного управления технологическими процессами в мире и в России. В другой работе В.М. Дозорцева и Д.В. Кнеллера «APC – усовершенствованное управление технологическими процессами» [10] разъясняется, что представляет собой APC-управление, что оно включает, и какова выгода его применения.

Центральным звеном систем усовершенствованного управления является управление с прогнозирующей моделью (MPC), для углубления понимания данной стратегии управления были изучены работы: «Model Predictive Control» Комачо Е.Ф. и Бордонса Ц. [11], «An Overview of Model Predictive Control» Холкара К.С. и Вагхмэр Л.М. [12], «Nonlinear Model Predictive Control of Gravity Separators» Длимы М.Ф. [13], «Системы управления нестационарным объектом на основе MPC-регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой» Надеждина И. С., Горюнова А. Г. и Маненти Ф.3 [15F]. При работе в MatLab для настройки MPC-регулятора помимо официального сайта поддержки пользователей MatLab и справок программы использовалось пособие Люпинга Ванга «Model Predictive Control System Design and Implementation using MatLab» [14].

При изучении стратегии управления «anti-windup control» или управления с компенсацией интегрального насыщения были изучены работы: «ПИД-регуляторы: вопросы реализации» В. Денисенко [16], «Anti-Windup Load Frequency Controller Design for Multi-Area Power System with Generation Rate Constraint» Хуанга Ч., Юи Д., Кси Кс. и Кси Дж. [17], «PI- и PID-регуляторы. Решение задачи об интегральном насыщении» Н.В. Клиначева и Е.А. Маргацкой [18]. Данные работы позволили разобраться в понятии «anti-windup control». Для реализации данной стратегии управления в пакете Simulink был применен метод представленный в работе «Anti-Windup Control Using a PID Controller» на сайте поддержки пользователей MatLab [19].

Рассмотренные книги, учебные пособия и статьи позволили сформировать понимание усовершенствованного управления технологическими процессами и внедрить такое управление в процесс ректификации многокомпонентной смеси. Целью данной магистерской диссертации является разработка АРС-системы управления ректификационной колонной и анализ качества АРС-управления, основанный на прямых и интегральных показателях качества управления.

2 Обоснование научной новизны и практической значимости

Колонны ректификации являются основным объектом установок деэтанзации и стабилизации конденсата, которые являются важным объектом нефтегазовой промышленности. Объекты УДСК имеют достаточно сложную динамику, особенно среди этих объектов стоит отметить колонну ректификации. Существующие сейчас системы управления технологическими процессами стабилизации конденсата соответствуют требованиям безопасности, а также нормам технологических регламентов, но, стоит заметить, что при этом данные системы не ориентированы на требования повышенной эффективности производства. Повышение эффективности производства подразумевает сокращение потерь различного рода (экономические, энергетические и тому подобные), при этом с увеличением прибыльности предприятия, а также повышение качества конечного продукта. Любая современная компания стремится занять лидерскую позиции на рынке, чего можно добиться только при условии улучшения качества продукции, сокращения издержек производства. СУУТП или же APC-управление является одним из ключевых систем управления, при котором возможно повышение эффективности и производительности производства, не за счет серьезной модернизации материальной базы производства, а за счет изменения стратегии управления. Центральное направление развития APC-управления – MPC-управление, также называемое управлением с прогнозирующими моделями.

Основной целью применения систем усовершенствованного управления является снижение потерь, эксплуатационных затрат и увеличение прибыли предприятия, которые достигаются за счет вывода технологических процессов на оптимальный режим работы. Одной из особенностей APC-систем является возможность работы в условиях ограничений, а также в условиях отсутствия возможности измерения всех переменных состояния объекта управления. СУУТП в отличие от ПИД-регулирования имеет возможность более быстрой стабилизации процесс. Перерегулирование в APC-системе при изменении уставки задающей переменной имеет менее выраженный характер, при этом

обладает меньшим временем регулирования. Что следует выделить, при этом не создаются негативные перегрузки на исполнительное оборудование. СУУТП позволяет поддерживать технологический процесс в допустимом технически и наиболее экономически выгодном режиме.

УДСК на выходе имеет конечный продукт – стабильный конденсат, который используется для использования в нефтехимической промышленности и получения топлива на его основе. Качество стабильного конденсата имеет большое значение, так как, качество стабильного конденсата на прямую коррелирует с качеством конечной продукции, полученной из предоставляемого конденсата. Важно поддерживать технологические процессы в экономически выгодном режиме, это позволит сократить затраты.

Наибольший вклад в увеличение экономической целесообразности от внедрения СУУТП вносится не только повышением качества управления, а, в основном, оптимизацией работы технологического объекта. Также стоит акцентировать внимание на том, что APC-система обладает способностью работать в режиме ограничений и при этом поддерживать максимально близкий к оптимальному режим работы. В случае, когда оператор осуществляет мониторинг за работой технологической установки и принимает необходимые решения, при изменении режима работы системы, имеет место быть ситуация задержки и излишнего простоя. СУУТП, в свою очередь, способна внести коррективы в технологический процесс при изменении параметров этого процесса за значительно меньшее время, чем необходимо оператору. Именно это и открывает возможность вывода режима работы установки близко к оптимальному [20]. На рисунке 1 продемонстрировано одно из основных достоинств APC-систем.

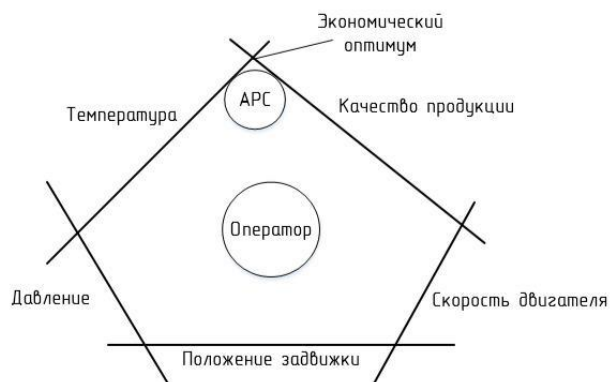


Рисунок 1 – Работа APC-системы вблизи ограничений

В связи с выше изложенным, можно заключить, что применение СУУТП позволяет достигнуть таких показателей как [20]:

- 1-5% увеличение производительности по сырью;
- увеличение до 5% выхода продуктов;
- 2-5% уменьшение операционных затрат.

3 Описание технологического процесса

Установка деэтанзации и стабилизации конденсата является объектом основного технологического назначения УКПГиК. Производительность УДСК по сырью составляет 235 тысяч тонн в год.

Основным процессом, протекающем на УДСК, является ректификация многокомпонентной смеси. Ректификационная колонна в рамках данного месторождения выполнена по двухколонной схеме. Необходимое тепло подводится к ректификационной колонне через трубчатые рибойлерные печи огневого нагрева.

Ректификация ведется под определенным давлением (точные значения будут оглашены далее) и с соблюдением температурных режимов, так как это необходимо для достижения оптимальных условий конденсации дистиллята и кубовой жидкости.

Описать процесс, протекающий в колонне ректификации, можно следующим образом: сырье перед подачей на вход колоны нагревается конечным продуктом ректификации. После этого подогретое сырье попадает на тарелку питания колонны. Для поддержания процесса ректификации на верх колонны поступает острое орошение. Оно предназначено для отделения более тяжелокипящих углеводороды от легкокипящих. Это происходит в процессе массового обмена с поднимающимися парами. Таким образом, появляется возможность получения на выходе необходимого дистиллята, который отводится с верха колонны.

Необходимо обратить внимание, что дополнительное тепло, которое необходимо для прохождения процессов ректификации, получают частичным испарением жидкости в кубовой части колонны. Для этого предусмотрена циркуляция кубовой жидкости через подогревающую печь.

3.1 Сырьё и продукты установки деэтанзации и стабилизации конденсата и их схема движения

Нестабильный газовый конденсат с модуля подготовки газа (МПГ), окончательным элементом для которого является разделитель жидкости, поступает по трубопроводу на площадку переключающей арматуры, на которой происходит распределение на УДСК.

На УДСК предусмотрена установка дегазации, в которую, в случае аварии на одной из ниток УДСК, поступает нестабильный газовый конденсат. На выходе установки дегазации получается дегазированный конденсат, который отправляется в один из стальных вертикальных резервуаров (РВС) сырьевого парка конденсата.

Стабильный конденсат, в свою очередь, по выходу из УДСК также отправляется в товарно-сырьевой парк в один из РВСов.

Также на выходе с УДСК получают газы – метан, этан, которые отводятся в блочную компрессорную станцию низконапорных газов (БКС ННГ) УКПГ.

Сбросы от предохранительных клапанов УДСК, а также освобождение аппаратов от давления при ремонтах и аварийных ситуациях ведутся на факел высокого давления установки комплексной подготовки газа и конденсата (УКПГиК) - через факельный сепаратор.

Полученная на УДСК пропан-бутановая фракция (ПБФ) или же широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ) направляется на склад ШФЛУ.

3.2 Основные сооружения

УДСК состоит из следующих основных сооружений:

1. Площадка переключающей арматуры;
2. Наружная технологическая установка:
 - 2.1. Емкости сырьевые БЕ-1/3, 4
 - 2.2. Емкости аварийно-дренажные Е-3/3, 4
 - 2.3. Дренажная емкость Е-4/2;
 - 2.4. Теплообменники Т-1/3, 4;

- 2.5. Воздушные холодильники ПБФ ВХ-1/2-1, ВХ-1/2-2, ВХ-1/3-1, ВХ-1/3-2;
- 2.6. Воздушные холодильники стабильного конденсата ВХ 2/2;
- 2.7. Колонна деэтанализации К-1/2;
- 2.8. Колонна стабилизации К-2/2;
- 2.9. Рефлюксная емкость Е-2/2;
- 2.10. Площадка печей П-1/2, П-2/2;
- 2.11. Площадка факельного сепаратора С-402 и дренажных емкостей Е-402/1,2;
- 3. Здание арматурных блоков;
- 4. Технологическая насосная;
- 5. Операторная;
- 6. Установка дегазации конденсата (Д-501, Т-501, Е-201);
- 7. КНС производственных стоков;
- 8. Товарно-сырьевой парк:
 - 8.1. Склад конденсата РВС-201/1,2,3;
 - 8.2. Здание переключающей арматуры;
 - 8.3. Насосная товарно-сырьевого парка;
- 9. Склад ШФЛУ.

3.3 Описание технологической схемы установки деэтанализации и стабилизации конденсата

Движение продуктов и связь между технологическими объектами наглядно предоставлены на рисунке 1.

ректификационных колонн. В итоге необходимо выделить, что в буферных емкостях происходит процесс сепарации исходного для ректификации сырья на три разнородные фазы: газовая фаза, которая содержит метан-этановую фракцию; жидкая фаза, представленная водой с содержанием метанола, и непосредственно нестабильный газовый конденсат, являющийся сырьем для УДСК.

Из буферных емкостей поступает нестабильный газовый конденсат. Этот конденсат подается через регулятор расхода. Непосредственно сам регулятор располагается в блоке замера (БЗ) нестабильного конденсата. Далее конденсат поступает в трубное пространство теплообменников. Также стоит отметить, что часть конденсата направляется, не заходя в теплообменники, на верх колонны в качестве острого орошения.

Нагретый в теплообменниках нестабильный конденсат подаётся в колонну деэтанзации, на одну из тарелок питания №10, №12 или №14. Выбор тарелки происходит в зависимости от содержания лёгких углеводородов в сырье. Другими словами, исходя из плотности конденсата: чем ниже плотность, тем выше тарелка питания.

Измерение температуры суммарного потока, входящего в колонну деэтанзации, осуществляется термометром сопротивления, значения которого выводятся в операторную.

В колонне деэтанзации происходит процесс ректификации, который осуществляется за счёт массо- и теплообмена, который протекает на ситчатых тарелках. Таким образом, происходит разделение высококипящих компонентов от легкокипящих. В результате имеем, что легкокипящие компоненты устремляются наверх по колонне, а высококипящие переливаются через сливные желоба в кубовую часть колонны.

Необходимым условием протекания процесса ректификации является поддержание температуры верха колонны в пределах от 24 до 30 °С путём подачи холодного орошения на 27 тарелку. Часть нестабильного конденсата с

температурой от 10 до 30 °С, поступающего из буферных емкостей используют в качестве холодного орошения.

Давление, необходимое для протекания процессов ректификации, в колонне деэтанзации поддерживается работой регулирующих клапанов, которые располагаются в клапанных сборках арматурного блока колонны. Там же установлены диафрагмы, необходимые для определения количества газов деэтанзации. После клапанных сборок газ, полученный в колонне деэтанзации, направляется в БКС ННГ УКПГ.

Колонна деэтанзации представляет собой вертикальный аппарат цилиндрической формы, обладающий диаметром 1200 мм и высотой 26550 мм. Данная колонна содержит 26 ситчатых тарелок и одну полуглухая тарелку, необходимую для отделения кубовой части колонны от части, где протекают массообменные процессы.

В арматурном блоке колонны деэтанзации и в колонне деэтанзации предусмотрены контроль и регулирование следующих параметров:

- дистанционное измерение и регистрация температуры газов деэтанзации на выходе из колонны деэтанзации;
- дистанционное измерение, регистрация и автоматическое регулирование температуры верха колонны;
- дистанционное измерение и регистрация давления газов деэтанзации на выходе из колонны;
- местное измерение давления манометром;
- дистанционное измерение и регистрация расхода газов деэтанзации, подаваемых на БКС ННГ;
- дистанционное измерение температуры на выходе деэтанизированного конденсата из камеры отбора колонны деэтанзации в колонну стабилизации;
- дистанционное измерение, регистрация, автоматическое регулирование уровня жидкости в камере отбора;

- дистанционное управление регулирующим клапаном и автоматическое регулирование температуры на первой тарелке колонны деэтанзации, подачей циркулирующего конденсата в куб колонны через печь;
- дистанционное измерение и регистрация температуры в зоне подачи питания в колонну деэтанзации;
- дистанционное измерение и предупредительная сигнализация перепада давления между кубом и верхом колонны деэтанзации;
- дистанционное измерение, регистрация и предупредительная сигнализация максимального уровня в приёмном кармане колонны деэтанзации;
- дистанционное измерение, регистрация, аварийная сигнализация минимального уровня в приёмной камере колонны деэтанзации и аварийная остановка насосов;
- дистанционное управление и сигнализация состояния запорных клапанов аварийного сброса жидкой фазы из колонны деэтанзации в аварийные ёмкости.

В качестве защиты от превышения максимального давления в колонне деэтанзации используются сдвоенные предохранительные клапаны.

Тепло, необходимое для протекания процесса ректификации, подводится кубовой жидкостью, которая циркулирует через трубчатую двухпоточную печь П-1.

Жидкость приёмной камеры, расположенной в кубе колонны, с температурой от 90 до 120 °С и давлением от 2,0 до 2,1 МПа поступает в трубчатую двухпоточную печь, где нагревается до 130 °С.

На выходе печи П-1 получается парожидкостная смесь, которая под давлением от 2,0 до 2,4 МПа подаётся в кубовую часть колонны деэтанзации. Легкокипящие углеводороды испаряются и поднимаются вверх через отверстия ситчатой первой тарелки, и обеспечивают необходимым теплом жидкую фазу, которая находится на тарелке. Всё это необходимо для поддержания процесса ректификации в деэтанизаторе. В тоже время, высококипящие углеводороды,

которые находятся на первой тарелке, по сливному коробу переливаются под слой жидкости, находящейся в приёмной камере, тем самым предоставляя дополнительное тепло в низ куба колонны.

Из приемного кармана колонны перетекает жидкая фаза через кромку в приёмную камеру куба колонны, тем самым подводя дополнительное тепло к кипящей жидкости. Следует заметить, что кромка переливного кармана располагается ниже, чем кромка камеры отбора конденсата, получаемого в колонне деэтанзации, чем обеспечивается постоянство уровня жидкости приёмной камеры, а также непрерывность подачи жидкости на приём насосов.

Из камеры отбора колонны деэтанизированный конденсат с температурой от 90 до 120 °С и давлением от 2,0 до 2,2 МПа при учете регулирования уровня через клапан направляется на 22, 20, 18 или 15 тарелку питания колонны стабилизации, в которой в последствии ректификационных процессов с верха колонны выводится широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ) с температурой 80 °С и давлением 1,5 Мпа. А из кубовой части колонны стабилизации по уровню, стабильный конденсат, обладающий температурой от 175 до 200 °С, направляется в межтрубное пространство теплообменников.

Расход деэтанизированного конденсата фиксируется в блоке замера кориолисовыми расходомерами «Micromotion». Также этот расход вводится в систему управления.

Колонна стабилизации представляет собой вертикальный аппарат цилиндрической формы, обладающий диаметром 2000 мм и высотой 25886 мм. Данная колонна содержит 24 ситчатые тарелки и одну полуглухую тарелку, необходимую для отделения кубовой части колонны от части, где протекают массообменные процессы.

В арматурном блоке колонны стабилизации и в колонне стабилизации предусмотрен контроль и регулирование следующих параметров:

- местное измерение и регистрация температуры деэтанизированного конденсата на входе в колонну стабилизации;

- дистанционное измерение, регистрация и автоматическое регулирование давления верха колонны;
- дистанционное измерение, регистрация и автоматическое регулирование температуры верха колонны;
- дистанционное измерение и регистрация температуры в зоне подачи питания в колонну стабилизации;
- дистанционное измерение, регистрация и регулирование расхода орошения;
- дистанционное измерение, регистрация и автоматическое регулирование температуры парожидкостной смеси на первой тарелке стабилизатора, подачей циркулирующего конденсата в куб колонны через печь;
- дистанционное измерение, регистрация и предупредительная сигнализация максимального перепада давления между кубом и верхом колонны стабилизации;
- местное измерение температуры жидкой фазы в кубе колонны стабилизации и давления в колонне;
- дистанционное измерение, регистрация автоматическое регулирование уровня в камере отбора колонны стабилизации;
- дистанционное измерение, регистрация и предупредительная сигнализация минимального уровня в камере отбора;
- дистанционное измерение, регистрация температуры на выходе стабильного конденсата из колонны стабилизации в теплообменники;
- дистанционное измерение, регистрация, предупредительная сигнализация максимального уровня в приёмном кармане стабилизатора;
- дистанционное измерение, регистрация, предупредительная сигнализация минимального уровня в приёмной камере колонны стабилизации и аварийная остановка насосов;

Для защиты от превышения давления в колонне стабилизации предусмотрены сдвоенные предохранительные клапаны.

Тепло, необходимое для протекания процесса ректификации, подводится кубовой жидкостью, которая циркулирует через трубчатую двухпоточную печь П-2.

Жидкость приёмной камеры, расположенной в кубе колонны, с температурой от 170 до 195 °С и давлением от 1,4 до 1,6 МПа поступает в трубчатую двухпоточную печь П-2, где нагревается до 215 °С.

На выходе печи П-2 получается парожидкостная смесь, которая под давлением 1,5 МПа подаётся в кубовую часть колонны стабилизации. Легкокипящие углеводороды испаряются и поднимаются вверх через отверстия ситчатой первой тарелки, и обеспечивают необходимым теплом жидкую фазу, которая находится на тарелке. Всё это необходимо для поддержания процесса ректификации в стабилизаторе. В тоже время, высококипящие углеводороды, которые находятся на первой тарелке, по сливному коробу переливаются под слой жидкости, находящейся в приёмной камере, тем самым предоставляя дополнительное тепло в низ куба колонны.

Из приемного кармана колонны перетекает жидкая фаза через кромку в приёмную камеру куба колонны, тем самым подводя дополнительное тепло к кипящей жидкости. Следует заметить, что кромка переливного кармана располагается ниже, чем кромка камеры отбора конденсата, получаемого в колонне стабилизации, чем обеспечивается постоянство уровня жидкости приёмной камеры, а также непрерывность подачи жидкости на приём насосов.

Из камеры отбора колонны стабилизации стабильный газовый конденсат при температуре от 170 до 195 °С и давлении 1,5 МПа направляется в межтрубное пространство теплообменников, где охлаждается до 80 °С.

После прохождения теплообменников стабильный газовый конденсат направляется в блок замера расхода стабильного конденсата, а далее на охлаждение к воздушному холодильнику ВХ-2, в радиаторах которого происходит охлаждение конденсата до 40 °С. После чего конденсат направляется в товарный парк стабильного конденсата.

Паровая фаза ШФЛУ, полученная с верха колонны стабилизации, под собственным давлением в 1,5 МПа и температурой от 70 до 80 °С отводится в воздушные холодильники ВХ-1, где происходит конденсация ШФЛУ путем охлаждения до 40 °С.

После холодильника ВХ-1 получившаяся парожидкостная фаза направляется в рефлюксную ёмкость, где происходит ее конденсация и получение пропан-бутановой фракции (ПБФ).

В период вывода колонны стабилизации на режим, с целью поддержания давления, существует способ подачи паровой фазы с верха колонны в рефлюксную ёмкость, без подачи в ВХ-1.

Получившаяся жидкая фаза широкой фракции легких углеводородов после рефлюксной ёмкости отправляется, путем перекачки насосами, по двум направлениям: один поток поступает на блок замера ШФЛУ, а другой используется как острое орошение, необходимое для поддержания необходимой температуры верха колонны стабилизации.

4 Разработка модели системы управления

4.1 Модель системы регулирования уровня среды в разделителе жидкости

Моделирование системы управления ректификационной колонной двухколонного типа было выполнено в модуле Simulink пакета прикладных программ MatLab. Смоделированная система состоит из таких объектов как: САР уровня жидкости в разделителе жидкости, располагаемом в модуле подготовки газа (МПП), система автоматического регулирования уровня раздела сред в буферной емкости и системы регулирования значения коэффициента перепада давления в колонне. Также данный коэффициент обозначается как PDR (Pressure drop ratio). Структурная схема САР уровня жидкости в разделителе жидкости представлена на рисунке 2.

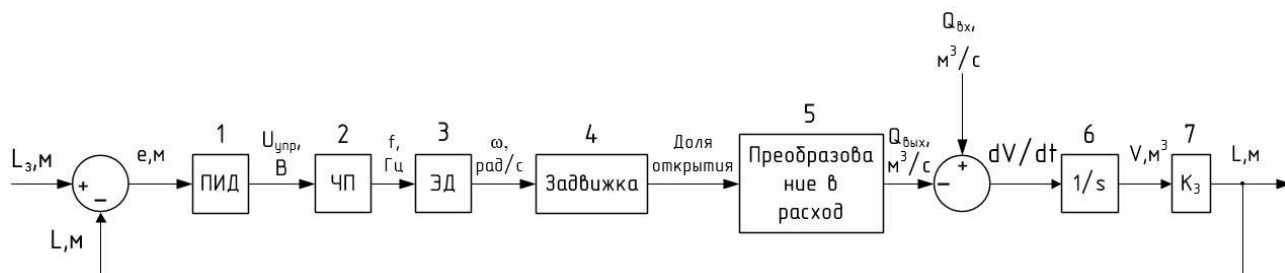


Рисунок 2 – Структурная схема САР уровня жидкости в разделителе жидкости

Данная схема включает в себя такие блоки как:

- 1) Блок 1 – ПИД-регулятор;
- 2) Блок 2 – частотный преобразователь (ЧП), который можно описать передаточной функцией апериодического звена первого порядка. Коэффициент передачи для ЧП имеет вид:

$$k_{\text{ЧП}} = \frac{(f_{\text{max}} - f_{\text{min}})}{(U_{\text{max}} - U_{\text{min}})} \frac{\text{Гц}}{\text{В}} = \frac{50 \text{ Гц}}{10 \text{ В}} = 5 \frac{\text{Гц}}{\text{В}}, \quad (1)$$

где f_{max} – максимальное значение частоты на выходе ЧП (50 Гц);

f_{min} – минимальное значение частоты на выходе ЧП (0 Гц);

U_{max} – максимальное значение управляющего сигнала (10 В);

U_{min} – минимальное значение управляющего сигнала (0 В).

Постоянная времени частотного преобразователя определяется постоянной времени фильтра частоты и была принята равной 0,1 сек.

3) Блок 3 – передаточная функция электродвигателя, представляющая собой апериодическое звено первого порядка. Пусть номинальная скорость вращения при частоте питающего напряжения 50 Гц составляет 200 рад/с, тогда коэффициент передачи определяется, как:

$$k_{эд} = \frac{(V_{max} - V_{min}) \text{ рад/с}}{(f_{max} - f_{min}) \text{ Гц}} = 4 \frac{\text{рад/с}}{\text{Гц}}, \quad (2)$$

где V_{max} – максимальное значение скорости вращения двигателя (200 рад/с);

V_{min} – минимальное значение скорости вращения двигателя (0 рад/с);

f_{max} – максимальное значение частоты на выходе ЧП (50 Гц);

f_{min} – минимальное значение частоты на выходе ЧП (0 Гц);

Постоянная времени принята равной $T_{эд} = 0,5 \text{ с}$.

4) Блок 4 – задвижка, модель которой представляет собой комбинацию блоков, представленную на рисунке 3:

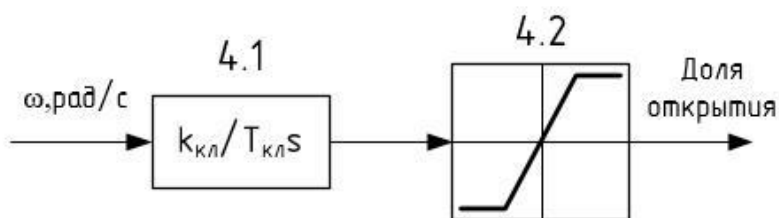


Рисунок 3 – Структурная схема задвижки (клапана)

5.1) Блок 4.1 – передаточная функция задвижки, где $k_{кл}/T_{кл} = 0,00005 \text{ с}^{-1}$, такая величина обеспечивает полное открытие клапана за 4 секунды, расходная характеристика клапана принята линейной.

5.2) Блок 4.2 – ограничительное звено, которое применяется в модели, так как доля открытия клапана является числом из диапазона $[0;1]$;

5) Блок 5 – блок преобразования доли открытия задвижки в значение расхода на выходе задвижки (соответствующий значению расхода на выходе

сепаратора). Расход на выходе сепаратора можно рассчитать по следующей формуле:

$$Q_{\text{вых}}(t) = S \cdot \sqrt{2g \cdot h(t)}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения;

$h(t)$ – уровень жидкости в разделителе жидкости;

$S = k \cdot a$ – площадь сечения оттока;

a – коэффициент открытия клапана в долях;

k – коэффициент пересчета доли открытия клапана в площадь сечения оттока, равный $0,04 \text{ м}^2$, так как при диаметре проходного сечения спускного клапана $0,2 \text{ м}$ (200 мм) в открытом состоянии, площадь полного сечения соответствует $0,04 \text{ м}^2$;

Такая формула позволяет учитывать влияние давления жидкости в разделителе жидкости на расход на выходе сепаратора, отток жидкости из разделителя жидкости происходит под действием силы давления.

6) Блок 6 – интегратор.

Изменение объема среды в разделителе жидкости равняется алгебраической сумме всех входящих и выходящих из него потоков. Для рассматриваемой системы этот процесс описывается уравнением:

$$\frac{d}{dt}V(t) = Q_{\text{вх}}(t) - Q_{\text{вых}}(t) - Q_{\text{выхг}}(t), \quad (4)$$

$$V(t) = \int (Q_{\text{вх}}(t) - Q_{\text{вых}}(t) - Q_{\text{выхг}}(t))dt, \quad (4.1)$$

где $V(t)$ – объем среды в сепараторе, м^3 ;

$Q_{\text{вх}}(t)$ – приток среды в разделитель жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$Q_{\text{вых}}(t)$ – отток жидкости из разделителя жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$Q_{\text{выхг}}(t)$ – отток газа из разделителя жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$;

7) Блок 7 – коэффициент преобразования объема в уровень. Процесс получения зависимости уровня жидкости в разделителе жидкости от объема представлен ниже.

С целью упрощения задачи получения зависимости уровня жидкости от объема было принято, что разделитель жидкости имеет форму цилиндра, лежащего на боковой поверхности (рисунок 4).

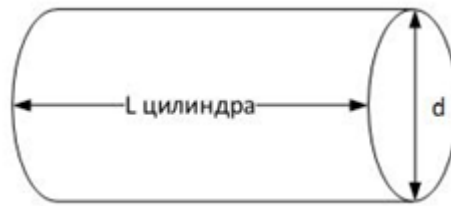


Рисунок 4 – Упрощенный вид

Формула объема всего цилиндра – площадь основания, помноженная на высоту:

$$V = S_{\text{осн}} H = \pi R^2 H. \quad (5)$$

На рисунке 5 представлена боковая сторона сепаратора, закрашенная область – это жидкость в разделителе жидкости.

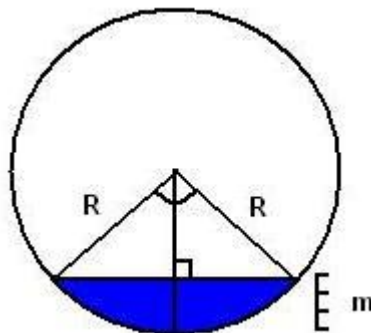


Рисунок 5 – Боковая сторона сепаратора при заполнении

Нужно найти площадь фигуры, заполненной жидкостью, и помножить на высоту цилиндра. Так можно будет найти объем, занимаемый жидкостью в цилиндре. Площадь фигуры будет равна разности площади сектора и верхнего треугольника:

$$S_x = S_{\text{сектора}} - S_{\text{треугольника}}. \quad (6)$$

Площадь сектора находится, как

$$S_{\text{сектора}} = \frac{\alpha R^2}{2}, \quad (7)$$

где α – угол дуги в радианах.

Угол дуги неизвестен. Для его нахождения можно применить следующий метод. Линия, опущенная вертикально вниз делит верхний треугольник на два прямоугольных треугольника. Гипотенуза этих треугольников равна R , а катет, прилежащий к верхнему углу, равен $(R-m)$, таким образом:

$$\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{R-m}{R}, \quad (8)$$

$$\alpha = 2 \arccos\left(\frac{R-m}{R}\right). \quad (8.1)$$

Верхний треугольник равнобедренный, бедра равны R , а основание неизвестно. Оно равно удвоенному противолежащему катету одного из прямоугольных треугольников, составляющих равнобедренный. Катет, согласно теореме Пифагора, равен:

$$\sqrt{R^2 - (R-m)^2}. \quad (9)$$

Зная все стороны треугольника, можно найти его площадь по формуле Герона:

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}, \quad (10)$$

$$p = \frac{a+b+c}{2}. \quad (11)$$

Таким образом, получены площади сектора и треугольника, после вычитания площади треугольника из площади сектора, домножения на длину цилиндра, можно получить результат – объем жидкости в цилиндре по известному уровню.

Параметры моделируемого сепаратора приняты следующими: длина = 4 м, диаметр = 3,048 м. Такой сепаратор будет иметь объем равный 29,172 м³. В программе MS Excel была использована полученная формула и построена зависимость уровня жидкости от объема жидкости. Эта зависимость является нелинейной и представлена на рисунке 6.

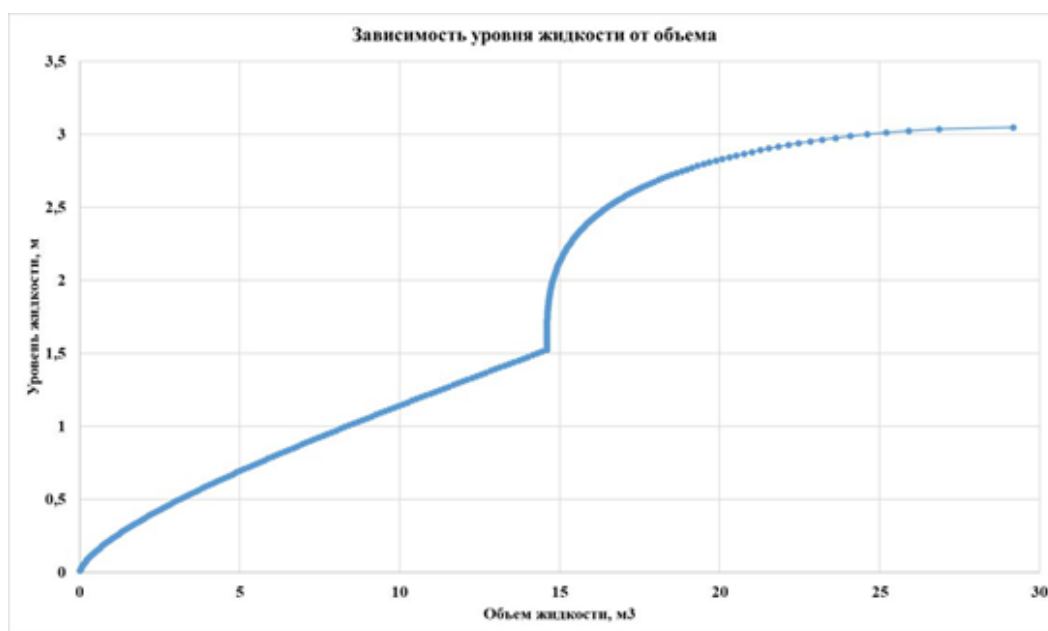


Рисунок 6 – Зависимость уровня жидкости от объема

Данная зависимость может быть аппроксимирована для получения линейной зависимости. Аппроксимация может быть произведена средствами MS Excel или же по достаточно простой формуле нахождения тангенса угла наклона прямой к оси ОХ. Линейно аппроксимированная зависимость представлена на рисунке 7.

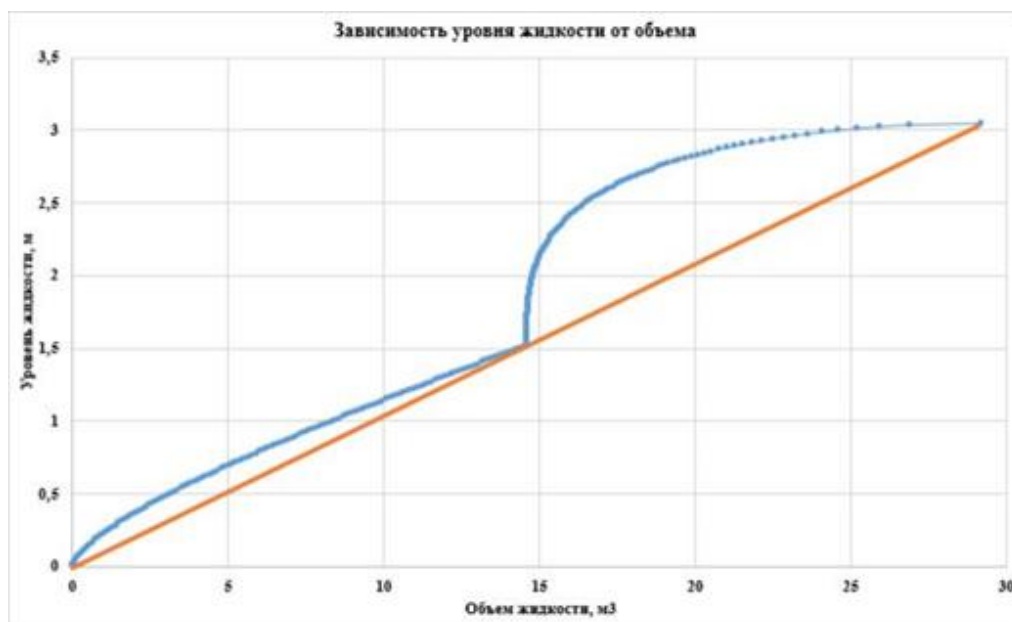


Рисунок 7 – Аппроксимированная линейная зависимость

Тангенс угла наклона прямой к оси ОХ находится по формуле:

$$tg\gamma = \frac{3,048}{29,172} = 0.104. \quad (12)$$

Тогда линейная зависимость будет иметь вид:

$$L(V) = 0.104V. \quad (13)$$

Аппроксимация получилась достаточно грубой, но соблюдены предельные границы разделителя, что является важным фактором.

Разработанная система регулирования позволяет регулировать уровень жидкости в разделителе жидкости путем управления задвижкой на выходе разделителя. Система представлена в Приложении В (верхний контур регулирования). С помощью датчика уровня измеряется текущий уровень жидкости в сепараторе и сравнивается с заданием L_3 . Заданное значение уровня, в соответствии с источником [1] рекомендуется принять равным 50% от высоты сепаратора, что обеспечивает максимальную площадь поверхности раздела фаз, поэтому $L_3 = 1,524$ м.

В модели учитывается отвод газа. Для упрощения задачи считается, что отвод газа – величина постоянная. На «плюс» сумматора потоков подается $Q_{\text{вх}}$ (значение расхода входного потока), на «минус» подается величина расхода газа на выходе. Эти величины приняты постоянными и равными $100 \text{ м}^3/\text{час}$ и $20 \text{ м}^3/\text{час}$ соответственно.

Таким образом, в данном пункте работы были описаны все блоки, входящие в структурную схему системы регулирования уровня жидкости в разделителе жидкости.

4.2 Модель системы регулирования для буферной емкости и колонны ректификации

Колонна ректификации является элементом с достаточно сложным математическим описанием, так как процессы, протекающие при ректификации многокомпонентной смеси, носят сложный характер. Для получения математической модели было решено использовать МИМО-модель системы «буферная ёмкость – колонна ректификации» [8].

Жидкость из разделителя жидкости поступает в буферную емкость, а с неё в колонну ректификации нестабильный газовый конденсат. В представленной схеме предполагается регулирование при помощи двух ПИД-регуляторов, один из которых будет регулировать уровень раздела сред газовый конденсат –метанольная вода в трехфазной буферной емкости, а второй будет регулировать значение коэффициента перепада давления (PDR) в колонне ректификации. Коэффициент перепада давления в колонне ректификации может быть найден по формуле:

$$PDR = \frac{P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХГ}}}{P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХСК}}}, \quad (14)$$

где $P_{\text{ВХ}}$ – давление нестабильного конденсата на входе колонны ректификации;

$P_{\text{ВЫХГ}}$ – давление газа на выходе колонны;

$P_{\text{ВЫХСК}}$ – давление стабильного конденсата на выходе.

Исполнительным механизмом для регулирования уровня раздела сред в буферной емкости будет служить задвижка на выходе стабильного конденсата из колонны ректификации $V_{\text{ВЫХСК}}$, а для регулирования значения PDR будет использоваться задвижка на выходе газа из колонны $V_{\text{ВЫХГ}}$. Площадь проходного сечения задвижки на выходе стабильного конденсата из колонны больше, чем площадь проходного сечения задвижки на выходе газа из колонны.

Колонна ректификации работает с наибольшей производительностью, если значение PDR поддерживается на уровне 1,5 – 3,0 [28]. В качестве

установленного значения (задания) PDR было принято значение 1,8. МИМО-модель системы описывается следующими матричными уравнениями в пространстве состояний:

$$\begin{bmatrix} i(t) \\ \ddot{x}_{V_u}(t) \\ \dot{x}_{V_u}(t) \\ \ddot{x}_{V_0}(t) \\ \dot{x}_{V_0}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l(t) \\ \dot{x}_{V_u}(t) \\ x_{V_u}(t) \\ \dot{x}_{V_0}(t) \\ x_{V_0}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ b_{21} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{42} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_u(t) \\ V_0(t) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} y_l(t) \\ y_{PDR}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{23} & 0 & c_{25} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l(t) \\ x_{V_u}(t) \\ \dot{x}_{V_u}(t) \\ x_{V_0}(t) \\ \dot{x}_{V_0}(t) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

В представленной системе уравнений управляющие величины: $V_u(t)$ – $V_{\text{выхск}}(t)$ процент открытия задвижки на стабильного конденсата; $V_0(t)$ – $V_{\text{выхг}}(t)$ процент открытия задвижки на выходе газа; переменные состояния: $l(t)$ – уровень раздела фаз в буферной ёмкости, $x_{V_u}(t)$, $x_{V_0}(t)$ – внутренние переменные системы, зависящие от степени открытия задвижек; выходные величины: $y_l(t)$, $y_{PDR}(t)$ – уровень раздела фаз и коэффициент перепада давления. В таблице 1 представлены численные значения матричных коэффициентов.

Таблица 1 – Численные значения матричных коэффициентов модели

А	В	С
$a_{11} = -1,23 \cdot 10^{-5}$	$b_{11} = -14 \cdot 10^{-4}$	$c_{11} = 1$
$a_{22} = -0,97$	$b_{21} = -1$	$c_{23} = 2,72$
$a_{23} = -0,76$	$b_{42} = 1$	$c_{25} = 1,69$
$a_{32} = 1$		
$a_{44} = -0,93$		
$a_{45} = -0,65$		
$a_{54} = 1$		

Для того, чтобы наглядно представить взаимосвязи элементов представленной модели и понять пути их взаимодействия по модели был

составлена автоматная модель системы, которая представлена на рисунке 8. Деграф системы (он же автоматная модель системы) – это ориентированный граф связей между входами, состояниями и выходами системы.

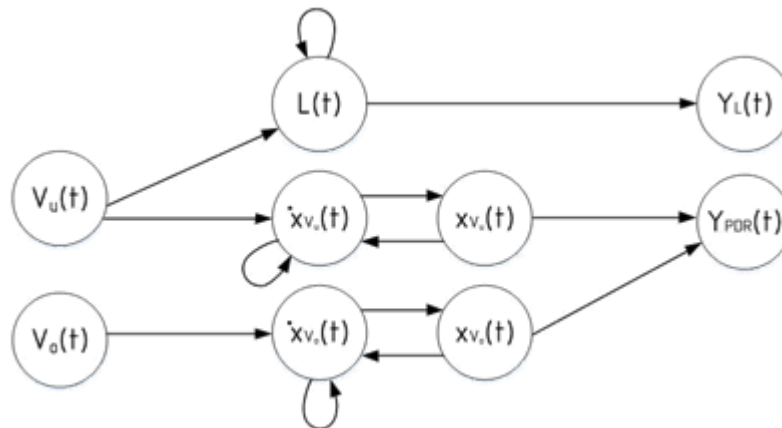


Рисунок 8 – Автоматная модель системы

Предложенная модель системы буферная емкость – колонна ректификации является многопараметрической системой, это МІМО-модель (Multiple Input Multiple Output). Управляющими воздействиями являются доли открытия клапанов на выходах колонны в процентах. Таким образом, для регулирования значения уровня раздела сред в буферной емкости и коэффициента перепада давления необходимо использовать задвижки на выходах стабильного конденсата и газа. Контурь регулирования имеют структуру, представленную на рисунке 9.

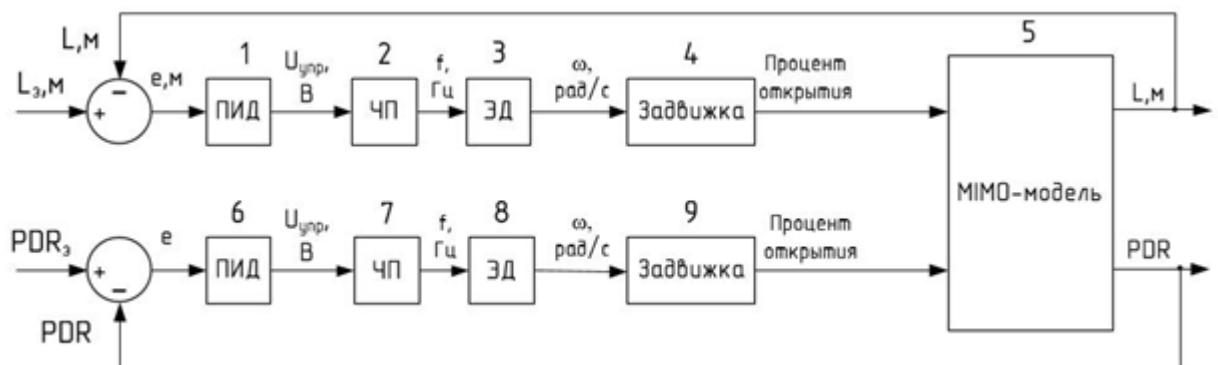


Рисунок 9 – Система регулирования уровня и PDR

В рамках магистерской диссертации предполагается разработка модели APC-системы управления ректификационной колонной, было решено использовать одну из стратегий APC-управления – MPC-регулирование – для регулирования значения уровня и значения PDR. Система регулирования с MPC-регулятором представлена на рисунке 10.

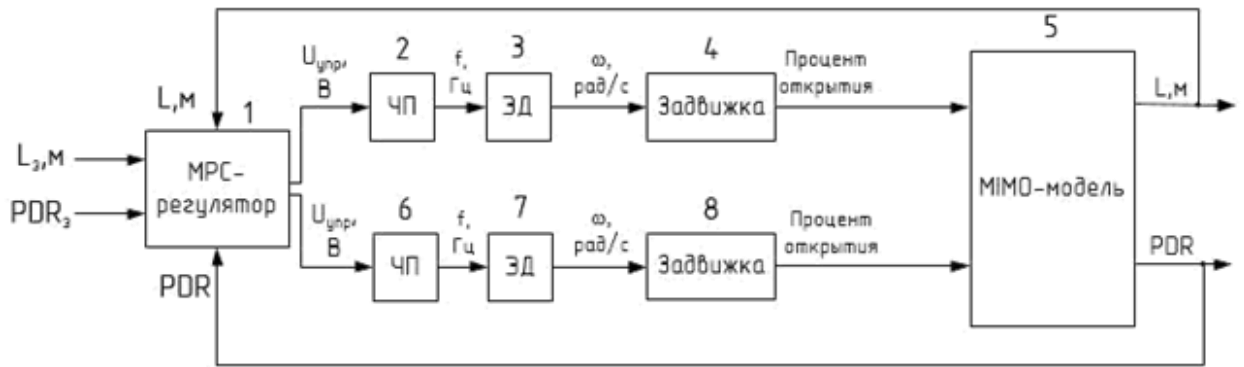


Рисунок 10 – APC-система регулирования уровня и PDR

В представленной системе регулирования присутствуют два контура: один – для регулирования значения уровня раздела сред нестабильный конденсат–метанольная вода, второй – для регулирования значения коэффициента перепада давления. Принимается, что буферная емкость имеет те же размеры, что и разделитель жидкости. Заданным значением уровня раздела сред нестабильный конденсат–метанольная вода (L_3) в буферной емкости, является величина 1,372 м. Заданным значением PDR является величина 1,8.

Блоки САР, представленной на рисунке 9, представляют собой:

- 1) Блок 1 – ПИД-регулятор;
- 2) Блок 2 – частотный преобразователь (ЧП), который можно описать передаточной функцией апериодического звена первого порядка. Коэффициент передачи для ЧП имеет вид:

$$k_{\text{ЧП}} = \frac{(f_{\text{max}} - f_{\text{min}})}{(U_{\text{max}} - U_{\text{min}})} \frac{\Gamma_{\text{ц}}}{\text{В}} = \frac{50 \text{ Гц}}{10 \text{ В}} = 5 \frac{\Gamma_{\text{ц}}}{\text{В}}, \quad (17)$$

где f_{max} – максимальное значение частоты на выходе ЧП (50 Гц);

f_{min} – минимальное значение частоты на выходе ЧП (0 Гц);

U_{max} – максимальное значение управляющего сигнала (10 В);

U_{min} – минимальное значение управляющего сигнала (0 В).

Постоянная времени частотного преобразователя определяется постоянной времени фильтра частоты и была принята равной 0,1 сек.

3) Блок 3 – передаточная функция электродвигателя, представляющая собой аperiодическое звено первого порядка. Пусть номинальная скорость вращения при частоте питающего напряжения 50 Гц составляет 200 рад/с, тогда коэффициент передачи определяется, как:

$$k_{эд} = \frac{(V_{max} - V_{min}) \text{ рад/с}}{(f_{max} - f_{min}) \text{ Гц}} = 4 \frac{\text{рад/с}}{\text{Гц}}, \quad (18)$$

где V_{max} – максимальное значение скорости вращения двигателя (200 рад/с);

V_{min} – минимальное значение скорости вращения двигателя (0 рад/с);

f_{max} – максимальное значение частоты на выходе ЧП (50 Гц);

f_{min} – минимальное значение частоты на выходе ЧП (0 Гц);

Постоянная времени принята равной $T_{эд} = 0,5$ с.

4) Блок 4 – задвижка, модель которой представляет собой комбинацию блоков, представленную на рисунке 11:

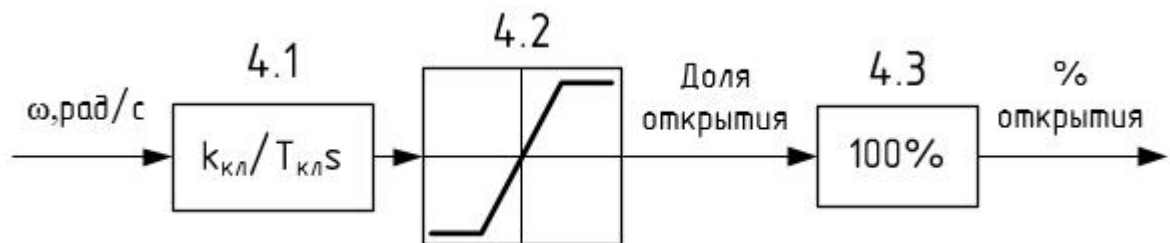


Рисунок 11 – Структурная схема задвижки (клапана)

5.1) Блок 4.1 – передаточная функция задвижки, где $k_{кл}/T_{кл} = 0,00005 \text{ с}^{-1}$, такая величина обеспечивает полное открытие клапана за 4 секунды.

5.2) Блок 4.2 – ограничительное звено, которое применяется в модели, так как доля открытия клапана является числом из диапазона $[0; 1]$;

5.3) Блок 4.3 – преобразование доли открытия в процент открытия;

5) Блок 5 – МИМО-система, представленная моделью в пространстве состояний, описанной выше в системе уравнений (15, 16).

- 6) Блок 6 – ПИД-регулятор;
- 7) Блок 7 – передаточная функция ЧП, блок аналогичен блоку 2.
- 8) Блок 8 – передаточная функция электродвигателя, блок аналогичен блоку 3.
- 9) Блок 9 – задвижка. Блок аналогичен блоку 4.

Блок-схема, представленная на рисунке 10 отличается лишь тем, что вместо двух ПИД-регуляторов использован один МРС-регулятор (блок 1). Таким образом, были получены модели разделителя жидкости, буферной емкости и колонны ректификации для дальнейшего исследования. Полученные модели позволят создать модель системы управления ректификационной колонной.

5 Описание динамики САР при различных стратегиях управления

5.1 Классическое ПИД-регулирование

На основании приведенных в предыдущем разделе блок-схем были разработаны модели системы регулирования в пакете Simulink среды MatLab. Для того, чтобы было возможным сделать вывод о качестве усовершенствованного управления необходимо было сравнить систему усовершенствованного управления с системой классического управления. Под классическим управлением подразумевается применение ПИД-регулирования в контурах регулирования уровней и PDR. Разработанная система управления ректификационной колонной с классическим регулированием представлена в приложении В. Представленная схема включает три контура регулирования:

- 1) первый контур (сверху) – контур регулирования уровня жидкости в разделителе жидкости;
- 2) второй – контур регулирования уровня раздела сред в буферной емкости;
- 3) третий – контур регулирования PDR в колонне.

В представленной в приложении В схеме во всех контурах регулирования был применен классический ПИД-регулятор, настройка которого производилась методом CHR, или модифицированным методом Циглера-Никольса, после настройки коэффициенты корректировались экспериментальным путем. Примечательно то, что пришлось использовать достаточно большое значение дифференцирующей составляющей регулятора в верхнем контуре (первый контур регулирования) регулирования уровня в разделителе жидкости, график с переходными процессами при различных вариантах настройки ПИД-регулятора приведен на рисунке 12. В таблице 2 представлены коэффициенты различно настроенных ПИД-регуляторов.

Таблица 2 – Коэффициенты при разных вариантах настройки ПИД-регулятора

Коэф-т регулятора \ Вариант настройки	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
K_P	0,5	0,5	0,5	0,1	0,067
K_I	0	1	0	0	0
K_D	0	0	50	50	100

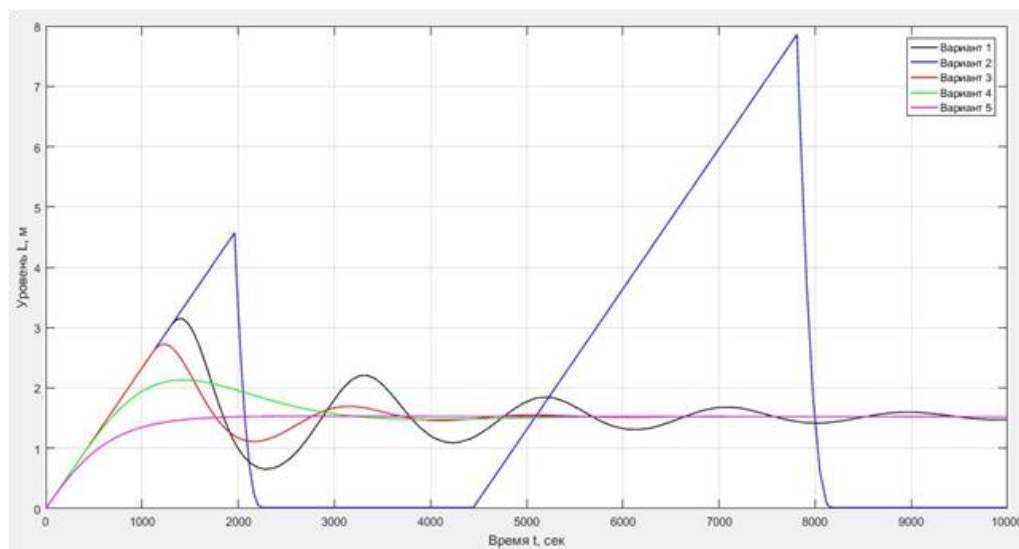


Рисунок 12 – Переходные характеристики при различных вариантах настройки ПИД-регулятора верхнего контура регулирования

Графики анализировались по прямым показателям качества переходного процесса, которые можно вычислить непосредственно по переходной характеристике. В качестве времени регулирования было взято время, через которое процесс вошел в зону пятипроцентного отклонения от установившейся величины.

Перерегулирование рассчитывается по формуле (19):

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{уст}}} \cdot 100\%, \quad (19)$$

где $y_{\max}$ – значение, соответствующее максимальному отклонению переходной характеристики от установившегося значения;

$y_{\text{уст}}$ – установившееся значение величины.

Проанализировав графики, можно сделать вывод, что при использовании ПИД-регулятора с вариантом настройки 5 стало возможным улучшение прямых показателей качества переходного процесса: устранение перерегулирования и сокращение времени переходного процесса. Однако это работоспособность в рамках модели, при работе с реальным объектом такой коэффициент дифференциальной составляющей будет значительно усиливать сигналы помех, и система будет вести себя непредсказуемым образом. В контурах регулирования уровня раздела сред в буферной емкости и PDR в колонне ректификации наилучший результат (переходную характеристику) позволило получить применение П-регулятора. Полученные коэффициенты регуляторов системы сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Коэффициенты регуляторов контуров регулирования системы,

Контур Коэф-т регулятора	Контур 1	Контур 2	Контур 3
K_P	0,067	20	20
K_I	0	0	0
K_D	100	0	0

На рисунках 13 – 15 продемонстрированы графики получившихся переходных процессов регулируемых величин (уровня жидкости, уровня раздела сред, PDR). Время (Time) эксперимента измеряется в секундах.

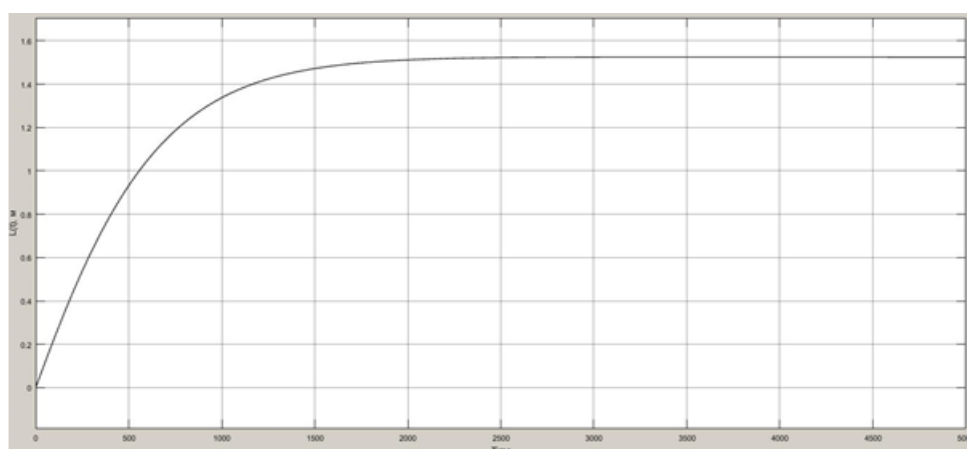


Рисунок 13 – Переходная характеристика. Уровень жидкости в разделителе
жидкости

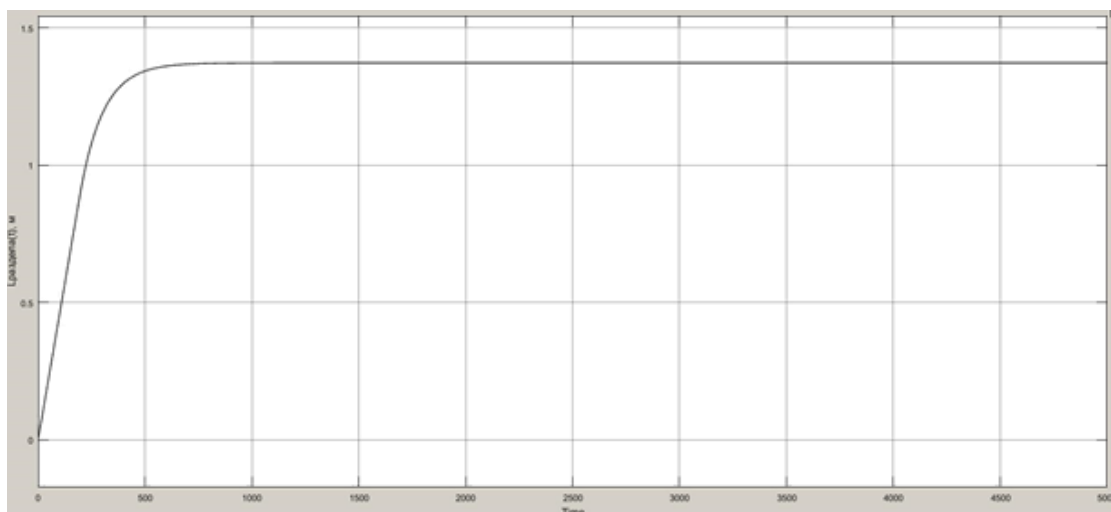


Рисунок 14 – Переходная характеристика. Уровень раздела сред в буферной емкости

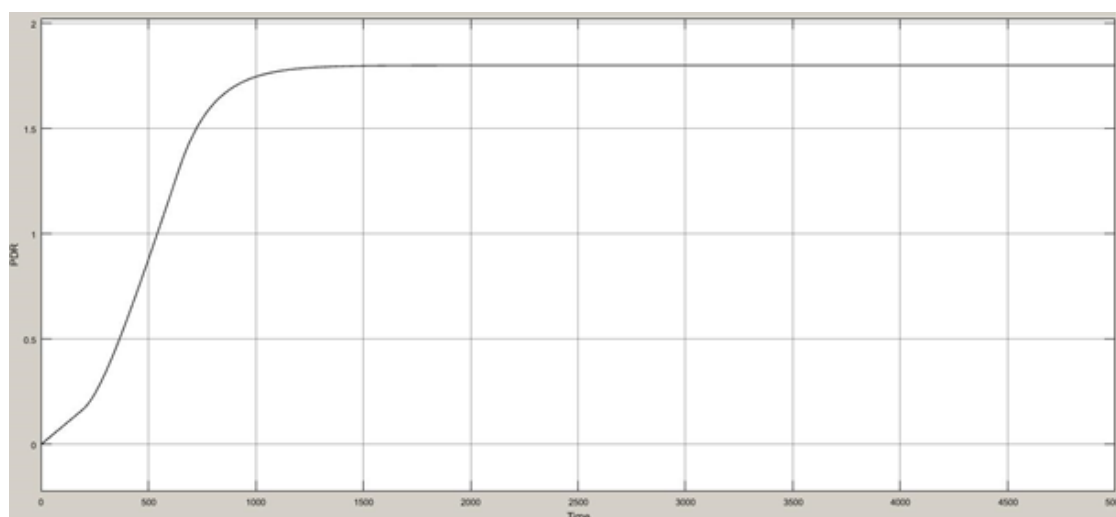


Рисунок 15 - Переходная характеристика. PDR в колонне

Проанализировать переходные процессы в системе можно на основании прямых показателей качества переходного процесса: времени регулирования переходного процесса t_p и перерегулирования σ , которые были упомянуты выше. Прямые показатели качества переходного процесса были внесены в таблицу 4. В пакете Simulink MatLab есть возможность поиска перерегулирования (overshoot) с помощью специального инструмента «Bilevel Measurements». С помощью инструмента «Cursor measurement» можно отследить момент вхождения переходного процесса в пятипроцентную зону отклонения от установившегося значения.

Таблица 4 – Прямые показатели качества переходных процессов

Показатель Переходный процесс	t_p, c	$\sigma, \%$
Уровень жидкости в разделителе жидкости	1358,619	0,000
Уровень жидкости в буферной емкости	408,927	0,000
PDR в колонне	918,447	0,000

График расхода жидкости на выходе разделителя жидкости представлен на рисунке 16.

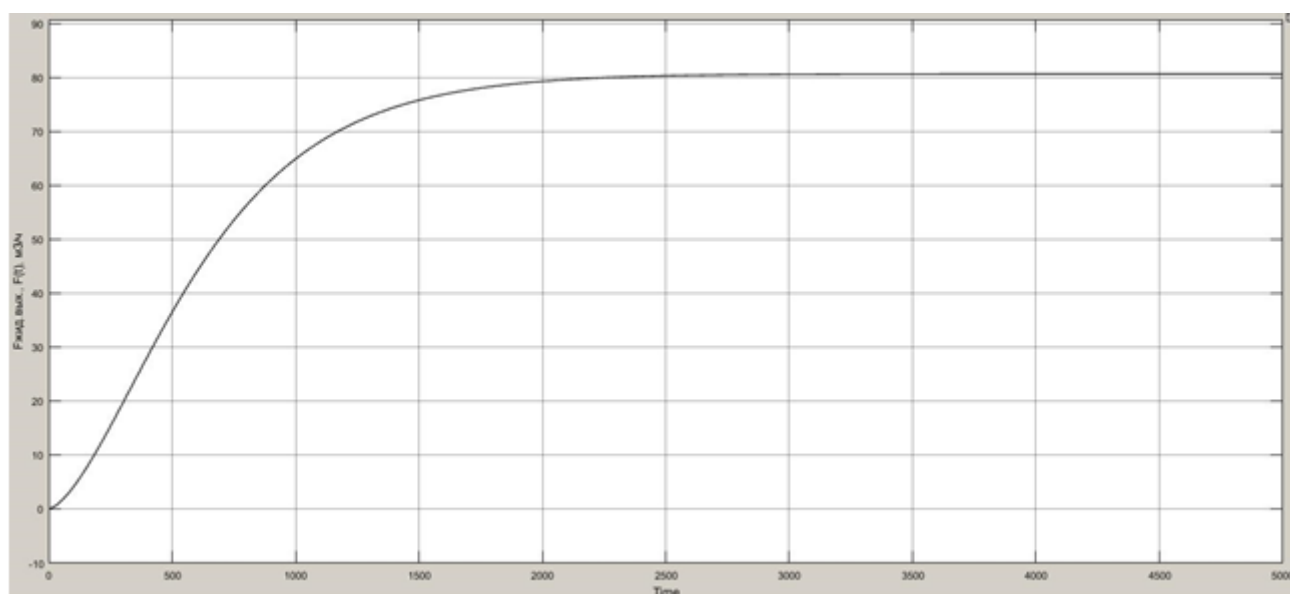


Рисунок 16 – Расход жидкости на выходе разделителя жидкости

По переходному процессу расхода жидкости на выходе разделителя жидкости можно сказать, что расход на выходе колонны медленно нарастает, затем становится постоянным, так как расход на входе разделителя жидкости является постоянной величиной и составляет $0,028 \text{ м}^3/\text{с}$ или $100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Если смоделировать ситуацию переменного расхода на входе в разделитель жидкости (рисунок 17), который будет варьироваться от $0,024 \text{ м}^3/\text{с}$ ($86,4 \text{ м}^3/\text{ч}$) до $0,032 \text{ м}^3/\text{с}$ ($115,2 \text{ м}^3/\text{ч}$), то расход на выходе разделителя будет иметь переходный процесс, представленный на рисунке 18.

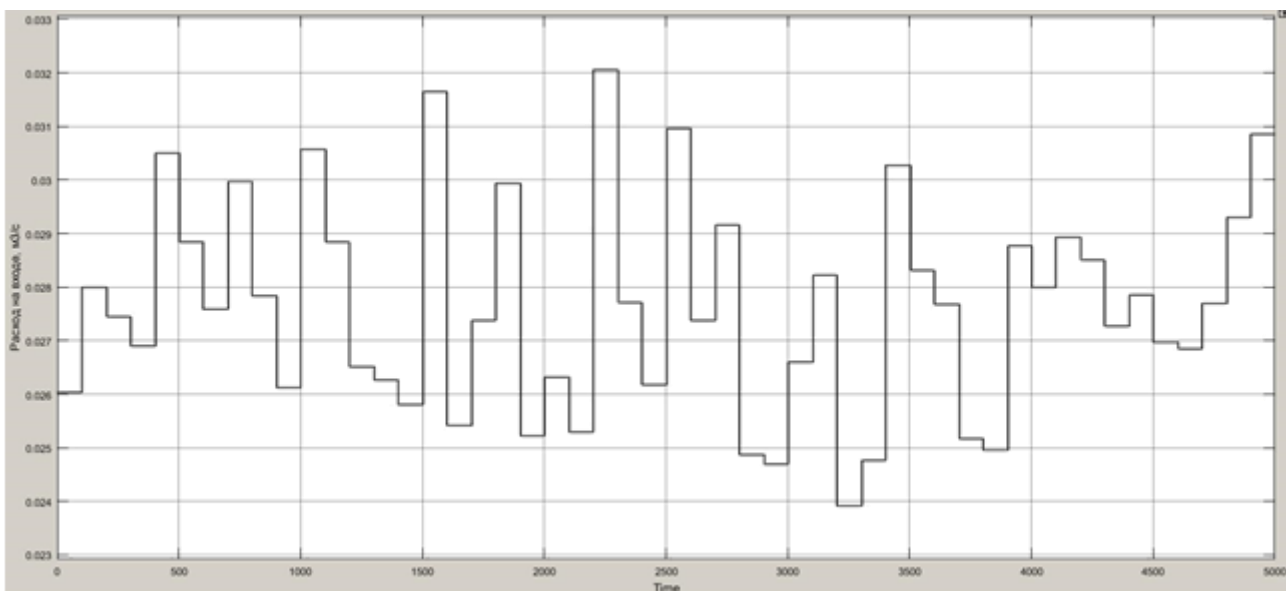


Рисунок 17 – Варьирование расхода на входе разделителя жидкости

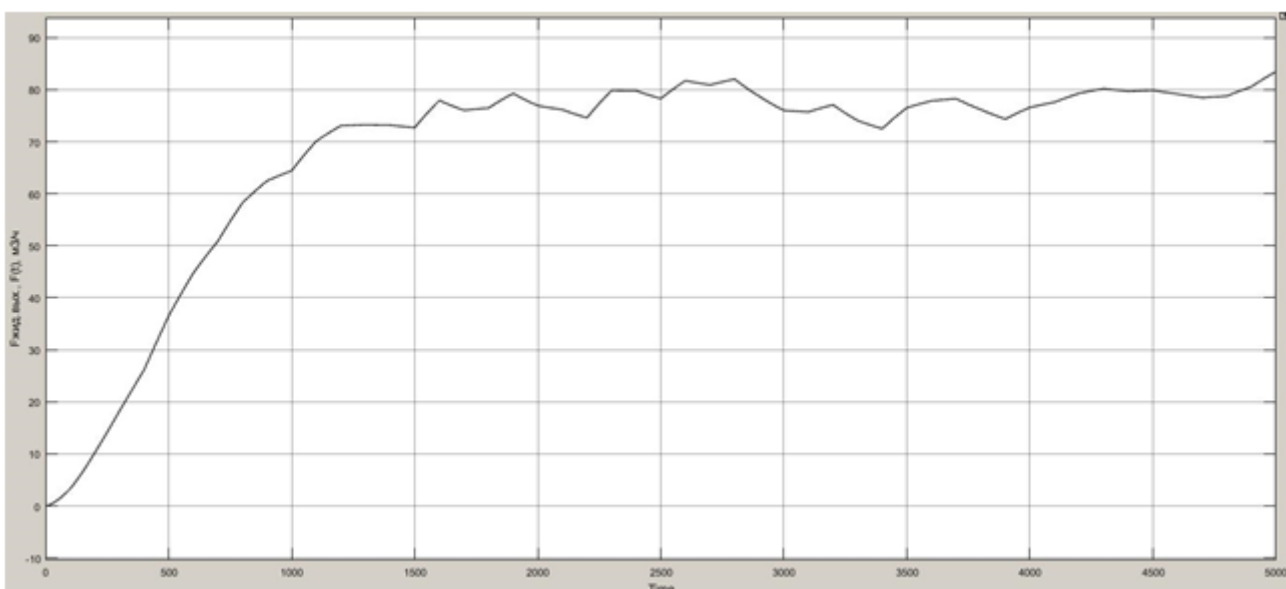


Рисунок 18 – Переходный процесс. Расход на выходе разделителя жидкости

5.2 Управление с применением стратегии «Anti-windup control»

При применении классического ПИД-регулятора в первом контуре регулирования возникало явление перехода ПИД-регулятора в режим «насыщения». Данное явление возможно только при условии неравенства интегральной составляющей нулю. Это явление носит название «эффект интегрального насыщения» («windup»), и возникает из-за нелинейности некоторых элементов реальных систем. Данная нелинейность возникает ввиду

различных ограничений реальной системы. Например, ограничение по мощности двигателя, по выходной скорости вращения вала двигателя, угла поворота, площади поперечного сечения клапана и других ограничений.

В первом контуре регулирования имеется ограничение на долю открытия клапана, доля открытия клапана варьируется от 0 до 1, при этом 0 соответствует полному закрытию клапана, 1 – полному открытию. Нелинейность типа «насыщение» в системах регулирования может приводить к тому, что регулирующий контур при достижении переменной граничного значения находится в насыщении и оказывается разомкнутым, так как изменение переменной на входе нелинейного звена не вызывает изменений переменной на выходе этого звена. Контур размыкается, так как когда сигнал регулятора превышает предел, обратная связь перестает влиять на управляющее воздействие. Но интегрирующий канал регулятора при этом продолжает вычисление площади под кривой ошибки, что неадекватно, поскольку контур незамкнут. В результате последующий возврат в зону линейного регулирования будет затянут. Этот эффект и называется эффектом интегрального насыщения («windup»). Стоит отметить, что эффект интегрального насыщения может иметь место в системе только тогда, когда ПИД-регулятор имеет ненулевую интегральную составляющую, интегральное насыщение приводит к затягиванию переходного процесса, а также может привести к большому перерегулированию [16, 17]. Предотвратить эффект интегрального насыщения можно используя стратегию усовершенствованного управления «anti-windup control». В рамках данного раздела магистерской диссертации была поставлена задача исследования данного типа усовершенствованного управления.

Контур регулирования уровня жидкости в разделителе жидкости был дополнен структурой для реализации стратегии управления «anti-windup control» [18, 19]. Для ослабления эффекта интегрального насыщения предполагается ввести дополнительную обратную связь, что позволит отслеживать состояние исполнительного механизма с нелинейным звеном типа «насыщение»

(состояние задвижки) и компенсировать сигнал, который подается на вход интегратора (рисунок 19).

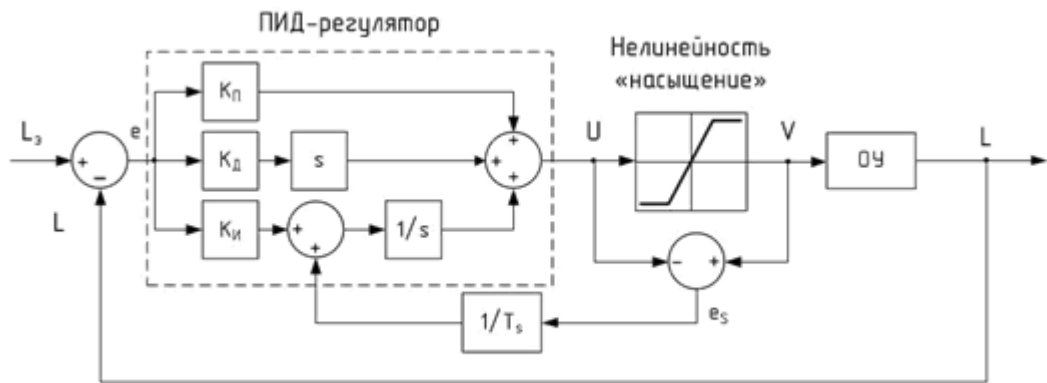


Рисунок 19 – Компенсация интегрального насыщения введением обратной связи

Принцип работы структуры с компенсацией интегрального насыщения, приведенной на рисунке 19, является следующим: сигнал на входе и сигнал на выходе исполнительного механизма сравниваются, вырабатывается сигнал рассогласования e_s , в случае, если $e_s=0$, регулятор функционирует как обычный ПИД-регулятор, если исполнительный механизм входит в насыщение, то есть U больше V , а e_s меньше нуля, то сигнал, являющийся входным для интегратора, уменьшается на величину равную величине рассогласования. Это приводит к торможению роста выходного сигнала интегратора, сигнал рассогласования уменьшается, величина перерегулирования уменьшается. Настроить компенсирующий контур обратной связи можно путем подбора постоянной времени T_s . От этой постоянной зависит степень компенсации ошибки e_s .

Пусть И-составляющая ПИД-регулятора с 5 вариантом настройки будет равна 0,1. Тогда переходный процесс принимает следующий вид (рисунок 20):

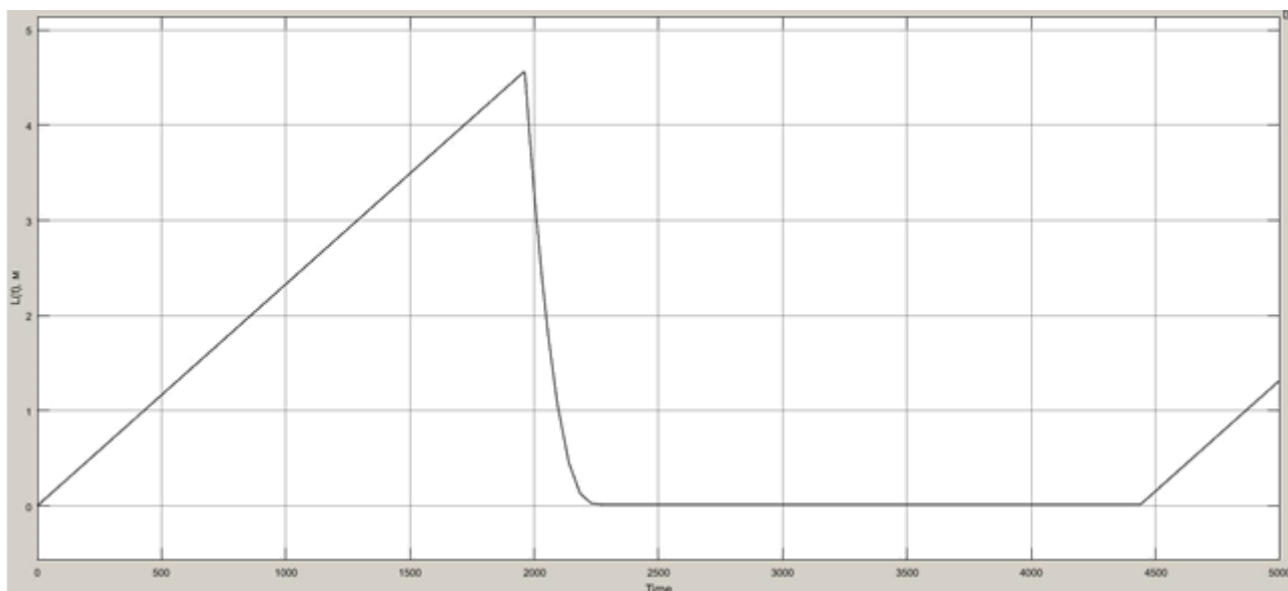


Рисунок 20 – Переходный процесс при интегральном насыщении ПИД-регулятора

На рисунке 20 представлен процесс без введения контура компенсации интегрального насыщения. В модель был введен контур компенсации интегрального насыщения. Модель контура регулирования уровня в разделителе жидкости с компенсацией интегрального насыщения представлена на рисунке 21.

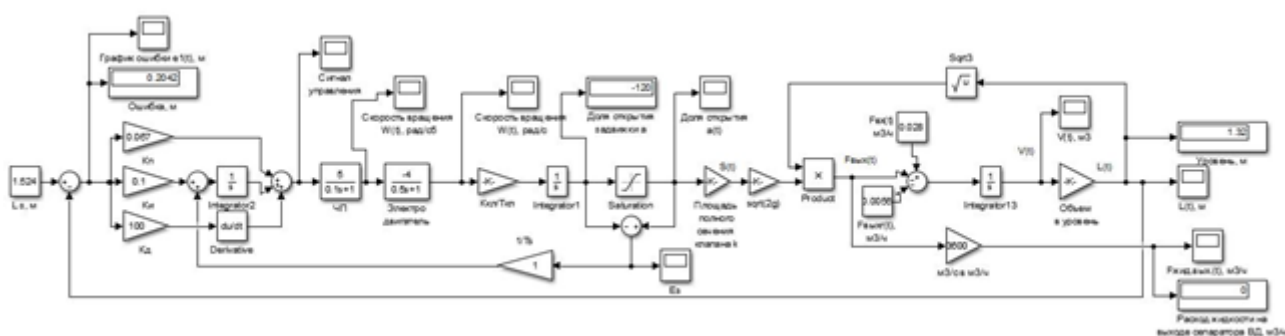


Рисунок 21 – Система регулирования уровня в разделителе жидкости с компенсацией интегрального насыщения

График ошибки рассогласования e_s без введения контура компенсации представлен на рисунке 22.

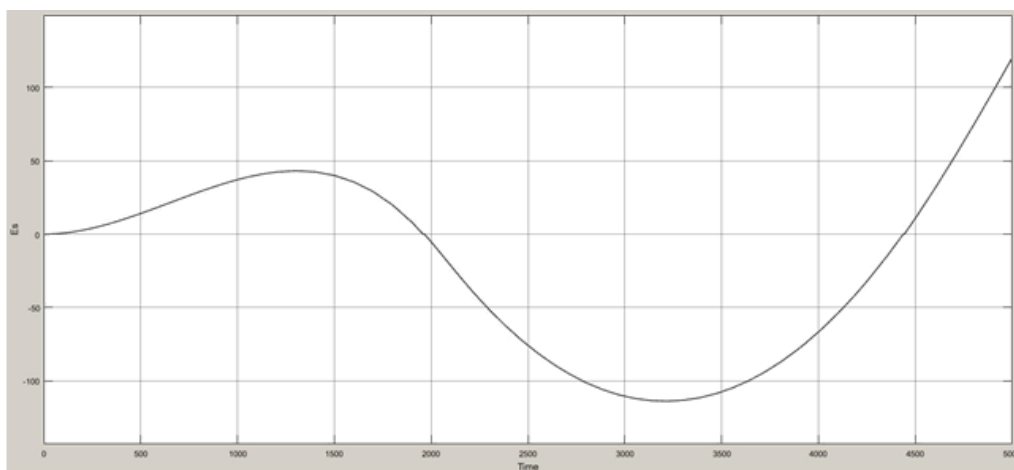


Рисунок 22 – График ошибки e_s

График переходного процесса, полученный при компенсации интегрального насыщения представлен на рисунке 23. График ошибки e_s представлен на рисунке 24.

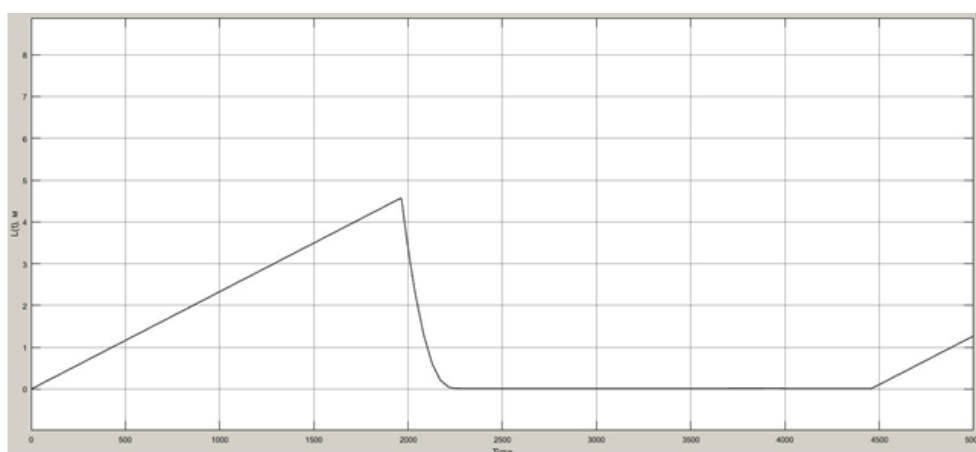


Рисунок 23 – График переходного процесса при компенсации интегрального насыщения

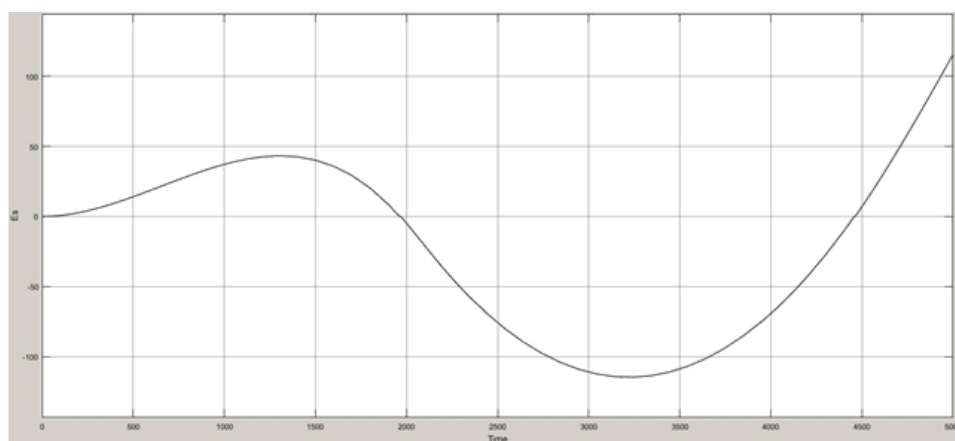


Рисунок 24 – Сигнал рассогласования e_s

Как можно видеть по полученным графикам, путем введения контура компенсации интегрального насыщения улучшить переходный процесс не удалось. Путем увеличения значения пропорциональной составляющей был получен график, представленный на рисунке 25.

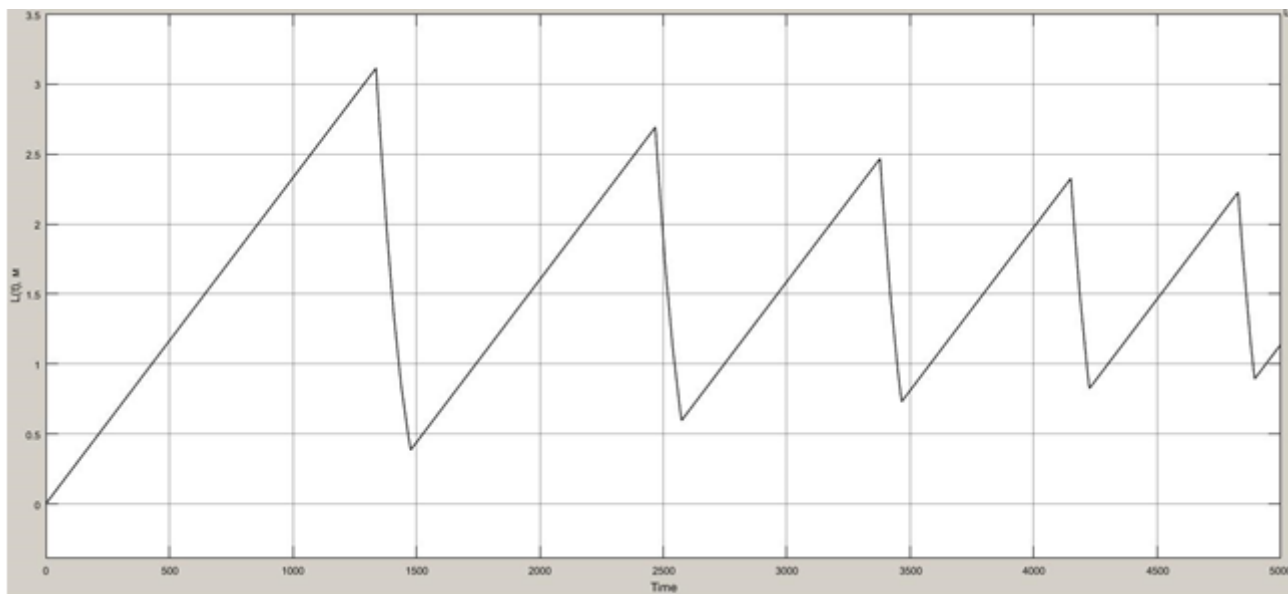


Рисунок 25 – Переходный процесс. Уровень в разделителе жидкости

Анализ полученных графиков позволяет сделать вывод, что при регулировании уровня в разделителе жидкости следует применять ПД-регулятор. Интегральная составляющая, даже небольшая, приводит к получению некачественных переходных процессов из-за возникновения эффекта интегрального насыщения, устранить который путем введения контура компенсации не удалось. Поэтому для регулирования уровня в верхнем контуре будет использоваться ПД-регулятор.

5.3 Управление с использованием управления с прогнозирующими моделями (MPC)

Целью работы является разработка APC-системы управления колонной ректификации. В разработанной модели системы управления технологическими процессами ректификации имеет место МИМО-модель системы «буферная емкость – колонна». В классической системе для регулирования уровня раздела фаз в буферной емкости и коэффициента перепада давления в колонне ректификации используются два разных ПИД-регулятора. При применении MPC-стратегии управления два этих контура могут регулироваться посредством одного регулятора с прогнозирующей МИМО-моделью вместо двух ПИД-регуляторов. Разработанная модель с MPC-регулятором, представлена в приложении Г. Прежде, чем перейти к настройке MPC-регулятора следует разобраться в понятии MPC-управления.

5.3.1 Сущность MPC-управления

MPC-управление или же управление с прогнозирующими моделями является современным методом теории управления и применяется в основном при управлении технологическими процессами на химических и нефтеперерабатывающих предприятиях. Данный метод базируется на математических методах оптимизации [29]. Суть MPC-подхода к управлению заключается в следующей последовательности операций [29, 30]:

- 1) В начальный момент времени берется относительно простая математическая модель ОУ, для которого начальными условиями для модели системы служит состояние объекта в текущий момент. Далее берутся уравнения этой модели и производится интегрирование этих уравнений. По итогу формируют прогноз возможного движения объекта в рамках горизонта прогноза. Стоит отметить, что горизонтом прогноза является некоторый конечный отрезок времени.

- 2) Второй этап производится оптимизация программного управления, целью которого является приближение переменных прогнозирующей модели,

которые регулируются системой, к необходимым задающим сигналам на горизонте прогноза. Важной особенностью является то, что все ограничения, предъявленные к управляющим и регулируемым переменным, учитываются на этапе оптимизации.

3) Далее берется полученное оптимальное управление и реализуется на шаге вычислений. Данный шаг составляет определенную малую часть от горизонта прогноза. После осуществляется измерение текущего объективного состояния ОУ на момент времени, соответствующий концу шага.

4) На данном этапе происходит сдвиг горизонт прогноза на следующий шаг, а первые три пункта данной последовательности зацикливаются.

Приведенная схема может быть объединена с предварительным проведением идентификации уравнений модели, используемой для выполнения прогноза. Математическая модель объекта управления или процесса является основным элементом МРС-регулятора, на основании данной модели и измеренных предыдущих переменных состояния объекта производится прогнозирование дальнейшего его поведения. Обычно математическая модель объекта выбирается линейной. Теперь можно перейти к пояснению схемы осуществления прогноза. Пусть математической моделью объекта управления (ОУ) является система дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), u(t)), \quad (20)$$

$$x(0) = x_0, \quad (21)$$

где $x \in E^n$ – вектор состояния;

$u \in E^m$ – вектор управления, $t \in [0, \infty)$.

Пусть имеются допустимое множество управлений $U \in E^m$ и допустимое множество состояний $X \subseteq E^n$. В любой момент времени $t \in [0, \infty)$ должны выполняться условия: $x(t) \in X, u(t) \in U$. Пусть функция $f(t, x(t), u(t))$ удовлетворяет условиям существования и единственности решения задачи Коши для системы (20, 21) для любых кусочно-непрерывных функций $u(t)$ со значениями из множества U . Пусть система (20, 21) обладает нулевым положением равновесия $f(t, 0, 0) \equiv 0$.

Пусть допустимые множества U и X заданы соотношениями:

$$U = \{u \in E^m: u_{i \min} \leq u_i \leq u_{i \max}, i = \overline{1, m}\}, \quad (22)$$

$$X = \{x \in E^n: x_{j \min} \leq x_j \leq x_{j \max}, j = \overline{1, n}\}, \quad (23)$$

где $u_{i \min}, u_{i \max}, x_{j \min}, x_{j \max}$ – заданные вещественные числа.

Пусть цель управления ОУ (20, 21) заключается в обеспечении соблюдения равенств:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t) - r_x(t)\| = 0, \quad (24)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|u(t) - r_u(t)\| = 0, \quad (25)$$

где $r_x(t)$ и $r_u(t)$ – заданные векторные функции, которые определяют желаемое движение объекта. Допустим, что функционал качества управления на управляемых движениях объекта управления имеет вид:

$$J_0 = J_0(x(t), u(t)). \quad (26)$$

К задаче оптимального управления отнесем поиск такого управляющего воздействия, входящего в допустимое множество управлений U , при котором будет достигнута цель управления (24, 25), будут учтены ограничения $x(t) \in X \forall t \in [0, \infty)$, а функционал (26) достигнет минимума.

Для аналитического и численного решения задач оптимального управления были разработаны различные подходы, но эти подходы очень сложно реализовать на практике. Основной проблемой реализации оптимального управления для сложного объекта является невозможность получения максимально точной математической модели объекта, исчерпывающе описывающей поведение объекта. Как раз для разрешения данной проблемы и было разработано МРС-управление. Принцип обратной связи лежит в основе данного метода управления системами. В соответствии с принципом обратной связи при формировании управляющего сигнала учитывается получаемая информация об ОУ. Далее рассмотрим систему, которая имеет вид:

$$\dot{\bar{x}}(\tau) = \bar{f}(\tau, \bar{x}(\tau), \bar{u}(\tau)), \quad (27)$$

$$\bar{x}|_{\tau=t}(0) = x(t), \quad (28)$$

где $\bar{x} \in E^n$ – вектор состояния;

$\bar{u} \in E^m$ – вектор управления, $\tau \in [t, \infty)$.

«Пусть $\bar{f}$ имеет те же свойства, что и f , а векторы $\bar{x}$ и $\bar{u}$ принимают значения из допустимых множеств X и U соответственно. Также пусть $\bar{f}$ задана таким образом, что для любого допустимого управления $\bar{u}(\tau) \equiv u(\tau)$ векторные функции $x(\tau)$ и $\bar{x}(\tau)$, удовлетворяющие системам (32) и (38) близки между собой по норме для любого $\tau \in [t, \infty)$ »[11].

Полученная система (27, 28) является прогнозирующей моделью для математической модели исследуемого объекта управления. Целесообразность введения прогнозирующей модели объясняется тем, что любая фиксированная математическая модель вида (20, 21) представляет реальный объект лишь приближенно, так как некоторые факторы не могут быть учтены при ее создании, они делают движение реального объекта и решение системы (20, 21) отличными. Неучтенными могут быть некоторые нелинейности объекта, внешние возмущения, изменение параметров, дополнительная неучтенная динамика и т.д. Пусть модель (20, 21) достаточно точно отображает ОУ, но может изменяться в процессе его функционирования, эти изменения заранее не известны и не заданы. Модель же, описываемая уравнениями (27, 28) инициализируется в момент времени $\tau = t$ текущим состоянием реального объекта, так как модель близка к ОУ при любых вариациях неучтенных факторов, данная модель позволяет получить приближенный прогноз поведения ОУ. Прогноз можно сделать, получив частное решение системы (27, 28) при заданном управлении на отрезке времени $\tau \in [t, t + T]$. Полученный прогноз будет тем точнее, чем меньше величина T ($T > 0$). Обычно выбирают достаточно простую прогнозирующую модель для того, чтобы эту модель было легко интегрировать в реальном масштабе времени и использовать в контуре управления. Схема осуществления прогноза представлена на рисунке 26 [29].



Рисунок 26 – Схема осуществления прогноза

На оси абсцисс представленной на рисунке 26 прямоугольной системы координат откладываются моменты времени τ . Начальным моментом времени является момент $\tau = t$. До этого момента движение ОУ с неизвестной в точности моделью вида (20, 21) происходило под воздействием заданного управления $u(\tau)$, реализуемого системой управления с обратной связью. В момент времени $\tau = t$ ОУ оказался в состоянии $x(t)$.

Пусть управление $\bar{u} = \bar{u}(\tau)$ задано как функция времени на отрезке $\tau \in [t, t + T_p]$. Необходимо проинтегрировать систему (27, 28) на данном отрезке времени с начальным условием $\bar{x}|_{\tau=t} = x(t)$, в результате чего будет получено частное решение $\bar{x} = \bar{x}(\tau, x(t), \bar{u}(\tau))$, которое будет трактоваться как спрогнозированное поведение ОУ с горизонтом предсказания T_p .

Необходимо отметить, что динамика реального объекта и динамика прогнозирующей модели естественно отличны, поэтому движения их будут в целом отличаться на рассмотренном отрезке, совпадение гарантируется лишь в начальной точке.

На данном этапе необходимо сформулировать математическую задачу о выборе оптимального управления на основе прогноза. Пусть целью управления является обеспечение некоторого заданного поведения модели (27, 28).

Поведение модели определяется векторными функциями: $r_x(t)$ и $r_U(t)$, $r_x(t) \in E^n, r_U(t) \in E^m$.

Функционал для оценки качества управления с прогнозирующей моделью имеет вид:

$$J(x(t), \bar{u}(\cdot), T_p, T_c) = \int_t^{t+T_p} F(\bar{x}(\tau, x(t), \bar{u}(\tau)), \bar{u}(\tau), r_x(\tau), r_u(\tau)) d\tau, \quad (29)$$

Данный функционал задан на движениях системы (27, 28). В данном функционале символом T_c , который меньше либо равен T_p , обозначается горизонт управления. Горизонт управления – это такой момент времени, что:

$$\bar{u}(\tau) = \bar{u}(t + T_c) \forall \tau \in [t + T_c; t + T_p], \quad (30)$$

На практике широко используется сумма двух квадратичных форм в качестве подынтегральной функции функционала, она имеет вид:

$$F = (\bar{x} - r_x)' R (\bar{x} - r_x) + (\bar{u} - r_u)' Q (\bar{u} - r_u), \quad (31)$$

где R и Q - положительно определенные симметрические весовые матрицы.

Задача о поиске оптимального управления для прогнозирующей модели ставится следующим образом:

$$J(x(t), \bar{u}(\cdot), T_p, T_c) \rightarrow \min_{\bar{u}(\cdot) \in \Omega_u}, \quad (32)$$

где $\Omega_u = \{\bar{u}(\cdot) \in K_n^0[t, t + T_p]: \bar{u}(\tau) \in U, \bar{x}(\tau, x(t), \bar{u}(\tau)) \in X, \forall \tau \in [t, t + T_p]\}$ – допустимое множество управлений, здесь $K_n^0[t, t + T_p]$ – множество векторных кусочно-непрерывных функций на отрезке $[t, t + T_p]$, которые удовлетворяют условию постоянства управления на отрезке $[t + T_c, t + T_p]$.

Результатом решения задачи (35) служит векторная функция:

$$\bar{u}^*(\tau) = \bar{u}^*(\tau, x(t), T_p, T_c) = \arg \min_{\bar{u}(\cdot) \in \Omega_u} J(x(t), \bar{u}(\cdot), T_p, T_c). \quad (33)$$

Эта функция определяет оптимальное программное управление для прогнозирующей модели (27, 28) по отношению к (32), так как она обеспечивает минимальное значение функционала.

$$V(x, T_p, T_c) = \min_{\bar{u}(\cdot) \in \Omega_u} J(x(t), \bar{u}(\cdot), T_p, T_c) = J(x(t), (\cdot), T_p, T_c). \quad (34)$$

Полагая, что $T_p = T_c \rightarrow \infty$, и осуществляя прогноз от точки $t = 0$ на бесконечном интервале времени $t \in [0, \infty)$, можно найти управление вида (33), после чего реализовать его в виде $u(t) \equiv \bar{u}^*(\tau)$ для исходного ОУ с моделью (20, 21). При условии $f(\cdot) \equiv \bar{f}(\cdot)$ такое управление является решением задачи оптимального управления реальным объектом по отношению к функционалу:

$$J_0(x(t), u(t)) = \int_0^\infty F(x(t, x(0), u(t)), u(t), r_x(t), r_u(t)) dt. \quad (35)$$

Так как между моделями (20, 21) и (27, 28) имеются расхождения, выполнение условия $f(\cdot) \equiv \bar{f}(\cdot)$ невозможно, поэтому реализовать программное управление, основанное на однократном прогнозе приводит к значительным отклонениям от оптимального программного движения. В связи с чем, для улучшения ситуации, предлагается использовать многократный прогноз с периодом T_p . В таком случае оптимальное управление, найденное для прогнозирующей модели на отрезке $[t, t + T_p]$, подается непосредственно на реальный ОУ: $u(t) \equiv \bar{u}^*(\tau)$. После чего осуществляется поиск оптимального управления на отрезке $[t + T_p, t + 2T_p]$ и т.д. Но при таком подходе становятся явными два серьезных недостатка применения:

- 1) Во-первых, управление осуществляется по разомкнутой схеме для каждого отрезка времени, что является существенным недостатком;
- 2) Во-вторых, ввиду различий в динамике прогнозируемого движения объекта управления и его реальной реакции, возможна ситуация, что на всем временном промежутке полученное управление будет разительно отличаться от желаемого оптимального управления.

С учетом этого необходимо реализовать найденное оптимальное управление иначе: управление воздействует на ОУ не на всем горизонте прогнозирования $[t, t + T_p]$, а на малой его части, тогда управление на ОУ:

$$\bar{u}^*(\tau) \equiv \bar{u}^*(\tau, x(t), T_p, T_c), \tau \in [t, t + \delta], \quad (36)$$

где δ больше нуля, но существенно меньше, чем T_p .

Таким образом, после реализации управления (33) в момент времени $t + \delta$, происходит вычисление нового прогноза поведения ОУ с горизонтом предсказания T_p , решается оптимизационная задача, но решение задачи оптимизации происходит на отрезке времени $\tau \in [t + \delta, t + 2\delta]$, а начальным условием для прогнозирующей модели является $\bar{x}|_{\tau=t+\delta} = x(t + \delta)$. Полученный результат задачи оптимизации применяется к ОУ на отрезке времени $\tau \in [t + \delta, t + 2\delta]$, далее процесс повторяется.

Такой способ оптимизации управления с предсказанием основан на прогнозе с удаляющимся (подвижным) горизонтом. Такой способ исключает существенные недостатки вышеописанного способа, так как управление осуществляется по принципу обратной связи, причем информация о текущем состоянии ОУ поступает дискретно, в моменты времени $0, \delta, 2\delta$ и т.д. Переменные состояния объекта могут быть измерены непосредственно, либо могут быть вычислены с использованием наблюдающих устройств по результатам измерений доступных к измерению переменных. Тогда, общая схема управления с прогнозированием представляет собой следующую последовательность операций:

- 1) Проведение оценки переменных вектора состояния $x(t)$ реального объекта управления;
- 2) Получения решения задачи оптимизации (32) для прогнозирующей модели (27, 28) при начальном условии $\bar{x}|_{\tau=t} = x(t)$
- 3) После получения оптимального программного управления $\bar{u}^*(\tau, x(t), T_p, T_c)$, воспроизведение его на отрезке времени $\tau \in [t, t + \delta]$.
- 4) Передвижение момента времени t на момент $t + \delta$, закликивание первых трех операций данной последовательности.

5.3.2 MPC-управление процессами МИМО-системы «буферная емкость – колонна ректификации»

В рамках данной магистерской диссертации была разработана система с применением MPC-регулирования. MPC-регулятор был применен для МИМО-системы «буферная емкость – колонна ректификации». Работа с MPC-регулятором осуществлялась при помощи пакета инструментов MatLab – Model Predictive Control Toolbox. Разработанная система с контурами MPC-регулирования представлена в приложении Г.

MPC-регулятор пакета Model Predictive Control Toolbox основывается на LQR-оптимизации (линейной интегральной квадратичной оптимизации).

Особенность LQR-оптимизации связана с тем, что интегральные квадратичные функционалы играют особую роль среди множества характеристик систем управления и процессов. Они имеют достаточную для применения на практике адекватность и характеризуют точность управления и энергетические затраты управляющих устройств [30].

Функционал для оценки качества управления в MPC-регуляторе среды MatLab является стандартным функционалом вида [31]:

$$J(z_k) = J_y(z_k) + J_u(z_k) + J_{\Delta u}(z_k) + J_c(z_k), \quad (37)$$

где z_k – это решение задачи квадратичного программирования (quadratic problem decision);

J_y – показатель качества, характеризующий соответствие выходного сигнала заданному;

J_u – показатель качества, применяющийся тогда, когда управляемых переменных больше, чем выходов ОУ, и нужно поддерживать выбранные управляемые переменные на заданном уровне, характеризующем соответствие управляемых переменных заданным уставкам;

$J_{\Delta u}$ – показатель качества, используемый при подавлении движения управляемых переменных, использующийся тогда, когда предпочтительны небольшие корректировки управляемых переменных;

J_c – показатель качества, направленный на решение оптимизационной задачи в условиях ограничений.

Данные показатели подробнее рассмотрены на сайте Mathworks [31].

В системе регулирования были рассмотрены МРС-регуляторы с разными вариантами настройки, с разными значениями горизонтов управления и прогноза, разными весовыми коэффициентами. Сначала были проанализированы различные варианты значений горизонтов. Значения сведены в таблицу 5. На рисунках 27– 28 представлены графики переходных процессов при различных вариантах настройки регулятора.

Таблица 5 – Настройка горизонтов МРС-регулятора

Вариант настройки	Горизонт управления (T_c)	Горизонт предсказания (T_p)
1	2	10
2	2	20
3	2	50
4	25	50
5	50	100

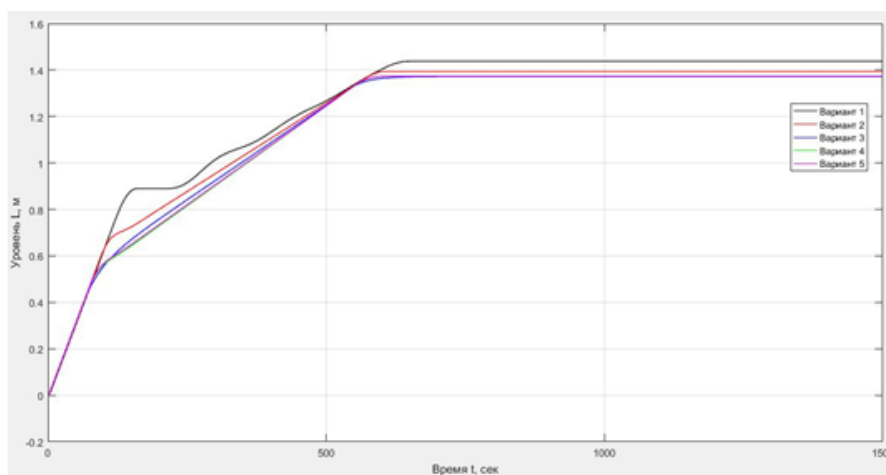


Рисунок 27 – Переходная характеристика при различных вариантах настройки МРС-регулятора. Уровень раздела сред

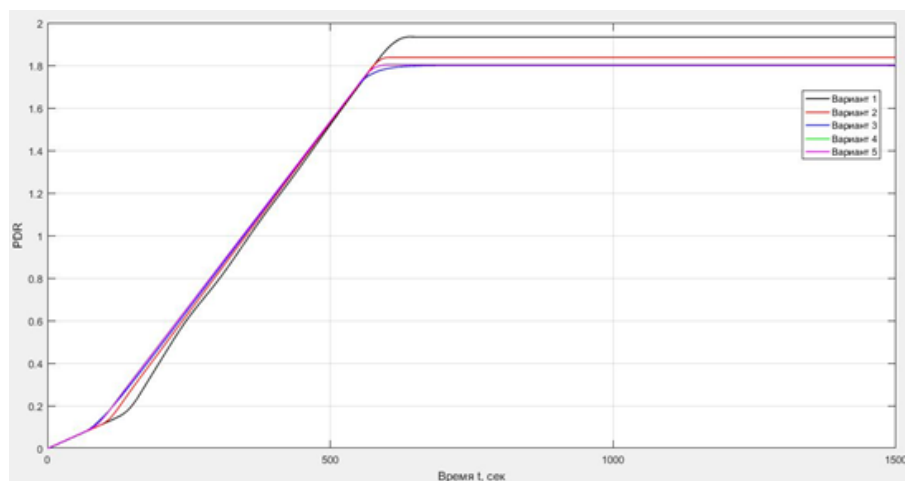


Рисунок 28 – Переходная характеристика при различных вариантах настройки MPC-регулятора. PDR

При анализе графиков удастся выяснить, что наилучшие прямые показатели качества при регулировании уровня и PDR дают варианты настройки 4 и 5, варианты настройки практически не отличаются по качеству переходного процесса. При данных вариантах настройки регулируемая величина выходит на заданное значение, в то время, как первый и второй варианты настройки не позволяют в принципе достичь заданного уровня регулируемой переменной. Было решено использовать 4 вариант настройки. Быстродействие регулятора с данным вариантом настройки было улучшено (рисунок 29, 30), с помощью внутренней функции инструмента «MPC designer» MatLab – «Performance tuning», а также настройки весов.

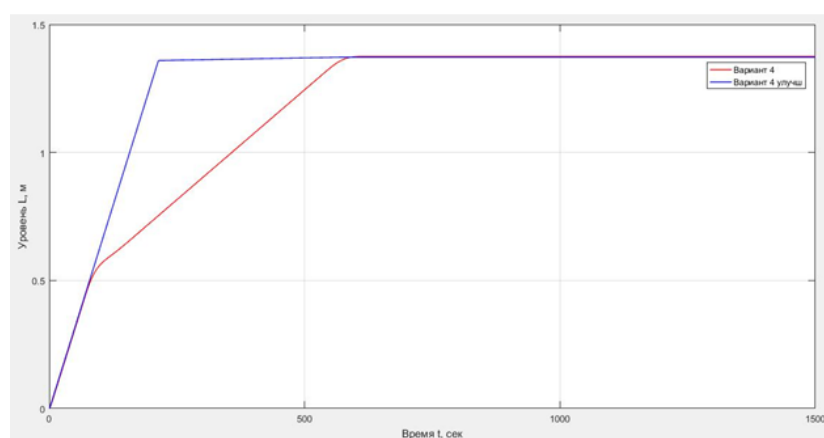


Рисунок 29 – Улучшение регулятора. График уровня раздела сред

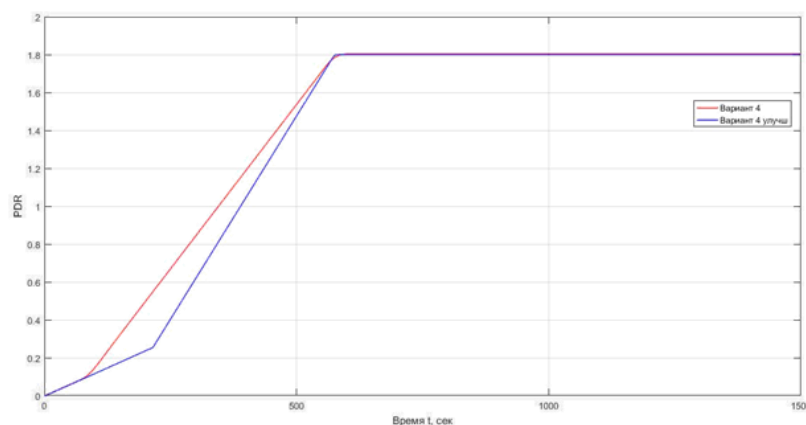


Рисунок 30 – Улучшение регулятора. PDR

По графикам можно наблюдать, что наименьшее время переходного процесса (при регулировании уровня) удалось получить при четвертом варианте, который улучшен при помощи инструмента «Performance tuning» и настройки весов варианте МРС-регулятора. Время переходного процесса PDR при этом уменьшилось незначительно. Таким образом была произведена настройка МРС-регулятора.

После завершения настройки МРС-регулятора необходимо произвести анализ качества усовершенствованной стратегии управления. Для анализа качества управления необходимо произвести сравнение данного типа управления с другим, в качестве которого было выбрано ПИД-регулирование. МРС-регуляторы рекомендуются для использования их в условиях ограничений, выходным сигналом регулятора является сигнал 0 – 10 В. Управляющее воздействие не может выходить за пределы данного диапазона. В системе с ПИД-регуляторами выходные сигналы регуляторов тоже были ограничены данным диапазоном. Качество управления оценивалось по прямым показателям качества (быстродействию и перерегулированию) и по интегральным показателям: по энергетической интегральной оценке, характеризующей энергетические затраты на управление (позволяющая получить показатель, пропорциональный энергозатратам на управление), и по энергетической интегральной оценке, характеризующей энергетические затраты исполнительных устройств на регулирование уровня (позволяющая получить

показатель, пропорциональный энергозатратам на регулирование уровня). Квадратичная интегральная оценка особенно тем, что может быть применена с целью оценки монотонных и колебательных переходных процессов. Вариант, при котором значение интегральной оценки меньше, считается лучшим. Переходные процессы при регулировании уровня и PDR представлены на рисунках 31 – 32.

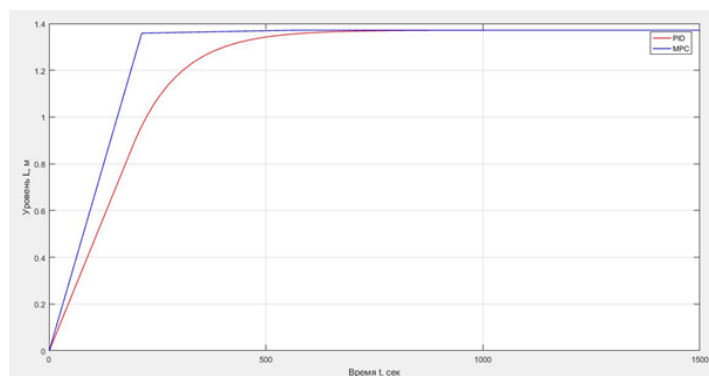


Рисунок 31 – Переходный процесс при различных типах регулирования.

Уровень раздела сред

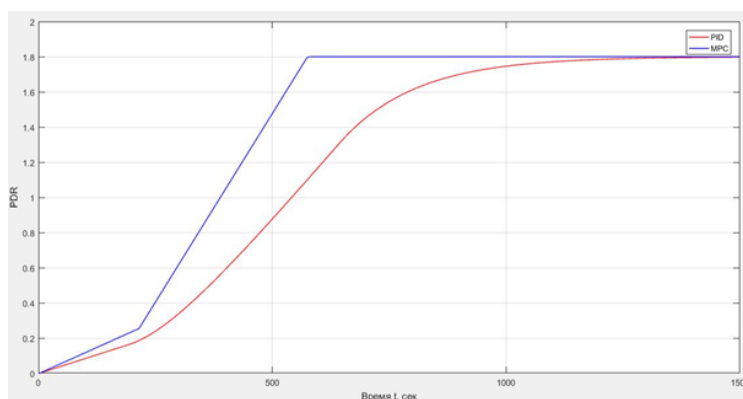


Рисунок 32 – Переходный процесс при различных типах регулирования. PDR

Рассчитанные прямые и интегральные показатели качества сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Сравнение качества разных типов управления

Показатель качества управления	Уровень раздела сред		PDR	
	PID	MPC	PID	MPC
t_p , с	408,94	205,09	918,32	554,48
σ , %	0,00	0,00	0,00	0,00
Показатель, характеризующий энергозатраты на управление, $B^2 \cdot c$	24695,21	21306,71	72218,84	57184,35
Показатель, характеризующий энергозатраты процесса регулирования уровня, $M^2 \cdot c$	2374,31	2551,38		

После анализа данных таблицы 6 был сделан вывод, что стратегия MPC-управления позволяет: получить более высокое быстродействие (на 203,85 секунд быстрее при регулировании уровня, на 363,84 секунд – при регулировании PDR), при этом с меньшими энергозатратами на управление. Помимо этого, энергия, затрачиваемая при регулировании уровня, имеет немного большее значение, чем энергия на регулирования перепада давления PDR. Однако при соответствующей настройке MPC-регулятора, переходный процесс регулирования уровня и PDR представлен на рисунке 33 и 34, можно получить меньшие энергозатраты и на управление, и на процессы регулирования уровня, а также уменьшить энергозатраты исполнительных устройств.

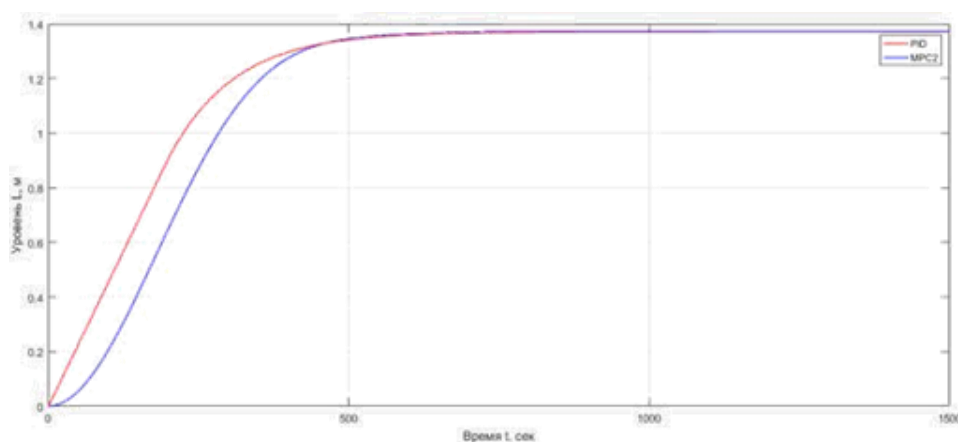


Рисунок 33 – Переходные процессы. Уровень раздела сред. Второй вариант настройки MPC

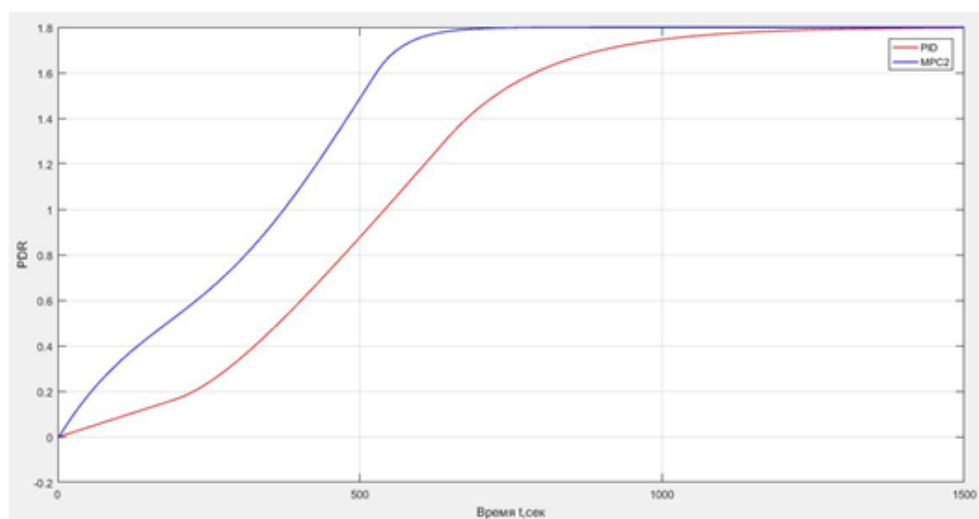


Рисунок 34 – Переходные процессы. PDR. Второй вариант настройки MPC

Показатели качества, полученные в предыдущем эксперименте, и показатели качества процесса с настроенным повторно MPC-регулятором сведены в таблицу 7. MPC1 – это регулятор, переходный процесс при использовании которого представлен на рисунках 31 и 32 выше, MPC2 – настроенный повторно MPC-регулятор (переходный процесс на рисунках 33 и 34).

Таблица 7 – Сравнение качества разных типов управления

Показатель качества управления	Уровень раздела сред			PDR		
	PID	MPC1	MPC2	PID	MPC1	MPC2
t_p , с	408,94	205,09	424,82	918,32	554,48	566,75
σ , %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Показатель, характеризующий энергозатраты на управление, $B^2 \cdot c$	24695,21	21306,71	11761,27	72218,84	57184,35	54964,57
Показатель, характеризующий энергозатраты процесса регулирования уровня, $m^2 \cdot c$	2374,31	2551,38	2347,74			

Проведя анализ полученных данных из таблицы 7, можно прийти к выводу, что MPC2-регулятор позволил несколько уменьшить энергетические затраты на регулирование значения уровня, уменьшить энергозатраты на управление, однако при этом снизилось быстродействие процесса. Таким образом, получается, что, снизив энергозатраты на процесс изменения уровня, получили ухудшение быстродействия. Основной задачей применения MPC-регулятора считается сокращение энергетических затрат. С этой задачей регулятор справился успешно.

Применение MPC-регулятора (MPC1) позволило уменьшить время переходного процесса и уменьшить энергозатраты на управление. Применение MPC-регулятора (MPC2) позволило уменьшить энергозатраты на управление, на процесс изменения уровня, однако быстродействие системы немного ухудшилось. Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод, что при выборе регулятора решается компромиссная сложная задача, и выбор регулятора зависит от того, какие показатели важно обеспечить. Снижение энергозатрат позволяет сократить экономические потери, поэтому, именно снижение энергозатрат было решено использовать как главный критерий определения эффективности регулятора. MPC-регулятор (MPC2) показал наименьшие значения энергозатрат, следовательно, MPC-регулятор (MPC2) наиболее выгодно использовать в разработанной системе управления.

5.3.3. Исследование влияния изменения режима работы системы

Предположим, что в процессе функционирования систем регулирования произошло изменения установленных значений уровня раздела сред и значения PDR, при этом функционирование систем не останавливалось. Изменение уставки уровня произошло в момент времени 500 сек., изменение уставки PDR – в момент времени 1000 сек., при этом время эксперимента равно 1500 сек. Изменение уставок было выполнено при помощи блоков «Step» (рисунок 35). При уменьшении значения уставки сигнал с блока «Step» будет подаваться на минус сумматора.

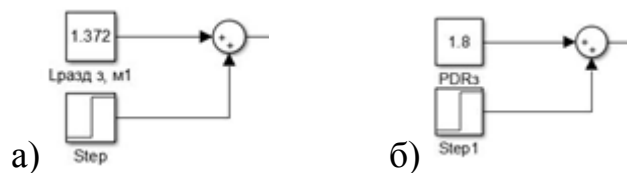


Рисунок 35 – а) изменение уставки L; б) изменение уставки PDR

Необходимо исследовать различные изменения уставок, влияние этих изменений на переходный процесс. Будут исследованы изменения уставок на 10% и 25% (таблица 8). Оцениваться процессы будут по величине энергетических затрат на управление при смене режима работы системы регулирования, а также по характеру переходных процессов. Сравнение происходило между ПИД- и MPC-регуляторами.

Таблица 8 – Исследуемые значения уставок

Исследуемое изменение	Значение уставки уровня, м	Значение уставки PDR
+10%	1,509	1,980
+25%	1,715	2,25

На рисунках 36, 37 представлены графики переходных процессов в контурах с ПИД- и MPC1-регулятором при различных изменениях уставок.

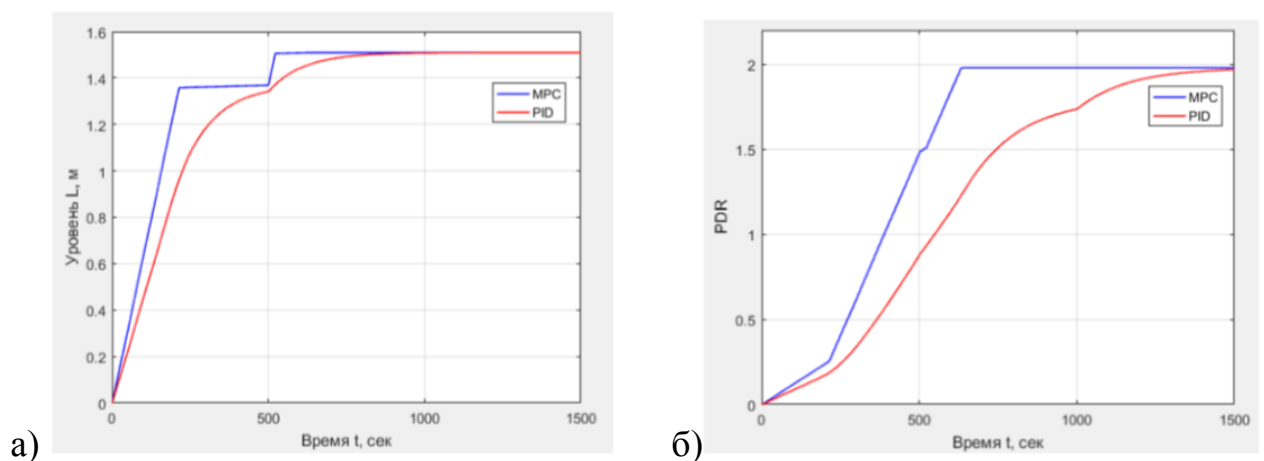


Рисунок 36 – Переходный процесс при: а) 10%-ном увеличении уставки уровня в момент времени 500 сек; б) 10%-ном увеличении уставки PDR в момент времени 1000 сек

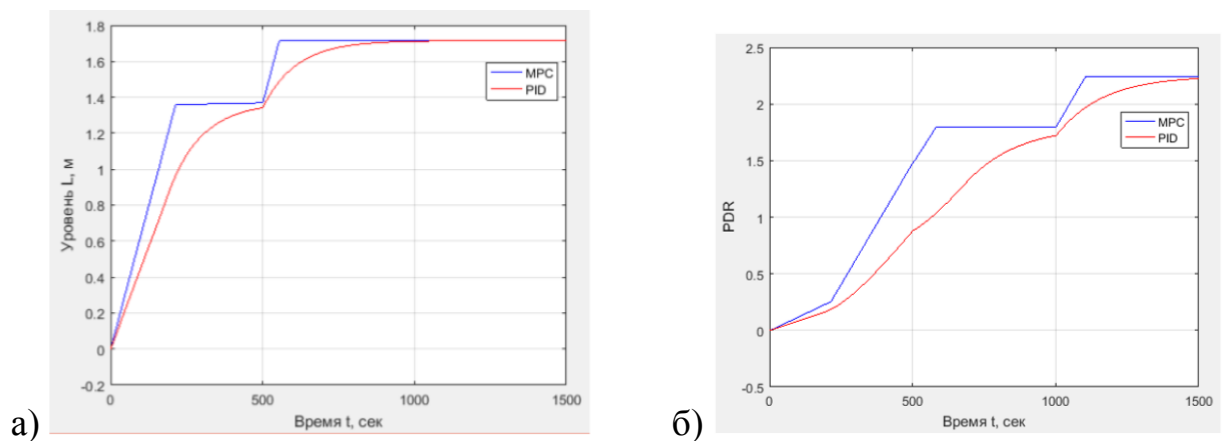


Рисунок 37 – Переходный процесс при: а) 25%-ном увеличении уставки уровня в момент времени 500 сек; б) 25%-ном увеличении уставки PDR в момент времени 1000 сек

Показатели энергетических затрат на смену режима работы и показатели быстродействия (время выхода на новый режим), перерегулирования системы сведены в таблицу 9.

Таблица 9 – Энергозатраты и быстродействие при смене режима работы

Режим	Смена уставки на 10%				Смена уставки на 25%			
	Уровень раздела сред		PDR		Уровень раздела сред		PDR	
Показатель качества переходного процесса t_p , с	PID	MPC1	PID	MPC1	PID	MPC1	PID	MPC1
	586,95	510,67	1147,08	1020,83	661,35	541,37	1251,81	1080,31
σ , %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Показатель, характеризующий энергозатраты на управление, $B^2 \cdot c$	25285,0	23442,9	76027,8	62756,3	27743,9	26694,9	86305,2	71361,6

Проанализировав графики и данные таблицы 9 становится очевидно, что при использовании МРС-регулятора удалось увеличить быстродействие системы, то есть сделать переход из одного режима работы системы на другой более быстрым, при этом энергозатраты на управление также меньше, чем при использовании ПИД-регулятора.

Таким образом, был проведен анализ эффективности усовершенствованного и классического регулирования в условиях изменения уставок в процессе работы объекта исследования.

6 Описание системы автоматизированного управления технологическим процессом

6.1 Структура системы

АСУТП организована в виде трехуровневой иерархической, территориально распределенной системы и включает в себя:

- нижний уровень;
- средний уровень;
- верхний уровень.

Нижний уровень – уровень полевого оборудования (датчики, преобразователи, исполнительные механизмы и т.д.).

Средний уровень – уровень автоматического управления технологическими объектами. Данный уровень предполагается построить на базе станций автоматизации SIMATIC PCS7 фирмы Siemens. Назначение среднего уровня заключается в сборе и обработке информации, которая аккумулируется от средств КИПиА объекта управления, а также в автоматическом и дистанционном с верхнего уровня управлении оборудованием.

Верхний уровень - уровень оперативно-производственной службы, реализованный на базе промышленных персональных компьютеров с организацией автоматизированных рабочих мест (АРМ) операторов. Верхний уровень используется для мониторинга и управления процессами как производственными, так и технологическими, а также управления противоаварийной защитой оборудования внутри объектов автоматизации.

6.2 Технические средства системы

6.2.1. Технические средства среднего уровня

Технические средства среднего уровня выполнены на базе контроллера S7-416, имеют модульную конструкцию и состоят из:

- программируемых логических контроллеров серии S7-416;
- станций распределённого ввода-вывода ET 200М с модулями ввода-вывода;
- источников питания;
- устройств сопряжения с полевым оборудованием.

Контроллеры S7-416 выполняют локальное управление и контролируют обмен данными между подсистемой ввода/вывода и сетью управления. Блок контроллера S7-416 включает в себя:

- плату центрального процессора;
- сетевые платы Industrial Ethernet;
- платы последовательного интерфейса;
- модуль питания.

Средний уровень подсистемы АСУТП построен на базе резервированных контроллеров. Контроллер АСУТП работает в режиме «горячего» резервирования. При замене процессорного модуля в схеме с резервированием загрузка конфигурации производится из работающего процессора без участия человека.

Для визуального контроля и диагностики работоспособности контроллера процессорные модули оснащены световыми индикаторами.

Процессорные модули имеют энергонезависимую память, позволяющую хранить прикладное программное обеспечение при отключении электропитания.

Загрузка прикладного программного обеспечения в контроллер осуществляется в режиме реального времени с инженерной станции без останова производства.

Контроллеры обеспечивает реализацию следующих функций:

- сбор, обработку, масштабирование информации, поступающей от аналоговых, дискретных датчиков объекта управления, а также по цифровым интерфейсным линиям связи, диагностику каналов ввода;
- реализацию алгоритмов логического управления и регулирования;
- выдачу управляющих воздействий на дискретные и пропорциональные исполнительные механизмы, диагностику выходных каналов, диагностику работоспособности линий связи, функционирование программ управления.

Контроллеры выполняют локальное управление и контролируют обмен данными между подсистемой ввода/вывода и сетью управления. Связь с подсистемой ввода/вывода ET200M реализуется по магистральному резервируемому каналу связи по протоколу Profibus-DP со скоростью обмена до 12 Мбит/с.

Станции распределённого ввода-вывода ET 200M с модулями ввода-вывода включает платы шины Profibus-DP, модули ввода/вывода и блоки питания.

ET200M комплектуются следующими модулями:

- SM 331 HART - 8 каналные модули аналогового ввода 4-20 мА HART;
- SM 332 HART - 8 каналные модули аналогового вывода 4-20 мА HART;
- SM 321 - 32 каналные модули дискретного ввода сигналов;
- SM 322 - 32 каналные модули дискретного вывода сигналов;
- CP341 - коммуникационный процессор для интерфейсных сигналов RS422/485.

Все модули ввода-вывода имеют гальваническое разделение с внутренней шиной станции.

Электропитание технических средств системы осуществляется от однофазной сети переменного тока 220 В с использованием источников бесперебойного питания.

Для питания комплекса технических средств (КТС) и полевого оборудования АСУТП используются блоки питания цепей постоянного тока 24 В серии SIPLUS (Siemens).

Дискретные входные и выходные сигналы подключаются к Системе через внешние реле (производство фирмы «Phoenix Contact») для обеспечения гальванической развязки оборудования нижнего и среднего уровней.

Взрывобезопасность объекта обеспечивается за счет применения искробезопасных барьеров (производство фирмы «Pepperl+Fuchs»)

6.2.2. Технические средства верхнего уровня

В состав технических средств верхнего уровня входят:

- операторские станции (ОС) – 8 шт.;
- инженерная станция (ИС) – 1 шт.;
- резервированные серверы долговременных архивов;
- принтеры.

ОС реализуют следующие основные функции:

- прием данных от контроллеров;
- контроль достоверности поступающей информации;
- выполнение архивирования данных на жестком диске: занесение в сводки аварий, событий, историю;
- наблюдение за состоянием системы с помощью различных графических форм: мнемосхем, трендов, таблиц и т.д.;
- управление системой с помощью различных графических форм: панелей: управления, кнопок и т.д.;
- подготовка отчетных документов и вывод их на печать;
- вывод оперативных оповещений оператору;
- реализацию цветовой и звуковой сигнализации.

ИС реализует следующие основные функции:

- создание конфигурации подсистемы;
- отладка конфигурации;

- хранение программного обеспечения и его загрузка в узлы системы;
- корректировка программного обеспечения и загрузка новой версии программного обеспечения в режиме ON LINE;
- прием данных от контроллеров;
- контроль достоверности поступающей информации;
- выполнение архивирования данных на жестком диске: занесение в сводки аварий, событий, историю (срок хранения данных не менее 3-х лет);
- наблюдение за состоянием системы с помощью различных графических форм: мнемосхем, трендов, таблиц и т.д.;
- управление системой с помощью различных графических форм: панелей управления, кнопок и т.д.;
- подготовка отчетных документов и вывод их на печать;
- вывод оперативных оповещений оператору;
- реализацию цветовой и звуковой сигнализации.

Резервированный сервер долговременных архивов реализует следующие основные функции:

- управление переменными процесса и сообщениями, экспортируемыми из архивов ОС;
- выполнение архивирования данных на жестком диске (срок хранения данных не менее 3-х лет);
- предоставление данных для отображения на операторских станциях.

6.3 Перспективы развития, модернизации системы

Для обеспечения возможности расширения всех подсистем предусмотрен 20% резерв для всех типов каналов ввода/вывода.

Предполагаемые шкафы АСУТП имеют свободные места для установки дополнительных корзин для модулей ввода/вывода, барьеров искрозащиты, реле.

В предполагаемой системе предусмотрен достаточный резерв по оперативной и дисковой памяти, а также по быстродействию микропроцессорных вычислителей и промышленных сетей, которые возможно потребуются для развития функций АСУТП в будущем.

С помощью инженерной станции АСУТП имеется возможность внесения изменений в систему силами обслуживающего персонала Заказчика для изменения или создания контуров управления, алгоритмов, отчетных форм и мнемосхем. Изменения производятся в режиме online.

6.4 Численность и квалификация персонала системы

Персонал предлагаемой АСУТП, в соответствии с ролью, выполняемой им в процессе функционирования, делится на 2 основные категории:

- оперативный (технологический) персонал;
- эксплуатационный (обслуживающий) персонал.

Пользователями автоматизированной системы управления являются:

- в первую очередь, операторы – технологи, управляющие участками производства;
- начальник (мастер) смены, отвечающий за работу установки в целом.

Весь персонал, допущенный к работе с АСУТП, проходит соответствующее обучение правилам работы с используемыми в системе управления программными и техническими средствами во время проведения пуско-наладочных работ в соответствии с утвержденной программой обучения.

Обслуживание АСУТП осуществляется инженерами по электронике и инженерами-программистами.

6.5 Соблюдение требования безопасности

Все внешние элементы технических средств системы, находящиеся под напряжением, имеют защиту от случайного прикосновения человека, а сами технические средства имеют шины защитного заземления.

Шкафы АСУТП имеют шины сигнального заземления, изолированные от шины защитного заземления.

Требования безопасности при монтаже, наладке, эксплуатации, обслуживании и ремонте технических средств АСУТП приведены в документации на технические средства. Общие требования по технике безопасности при эксплуатации Системы устанавливаются специальным разделом Инструкции по эксплуатации КТС.

6.6 Обеспечение надежности системы

Предлагаемая система является многофункциональной, восстанавливаемой, непрерывного действия и, в соответствии с ГОСТ 24.701-86, характеризуется показателями безотказности по основным выполняемым функциям.

Критерием отказа системы в целом является отказ любой из основных функций, который приводит к выдаче ложной информации или команд, приводящих к нарушению технологического процесса или к невозможности его контроля и управления по вине системы.

Оценка показателей надежности проведена путем анализа выбранных средств вычислительной техники фирмы Siemens (Германия), имеющей высокие надежность характеристики.

Для обеспечения надежности функционирования программно-технического комплекса (ПТК) системы предусмотрены следующие основные меры:

- комплекс программ находится в энергонезависимой памяти. Восстановление всех функций системы после сбоя питания (не более 72 часов) производится автоматически. Время восстановления не превышает 60 секунд;
- система подключена к электросети через источники бесперебойного питания (ИБП). Система бесперебойного электропитания обеспечивает функционирование ПТК системы при отключении электропитания на входе ИБП;
- КТС системы имеет самодиагностику, световую индикацию исправного состояния, сигнализацию нарушений в работе оборудования, а также обеспечивает взаимозаменяемость одноименных технических средств без изменений и регулировки остальных устройств;
- система допускает восстановление отдельных ее частей без прерывания функционирования всей системы.

6.7 Защита КТС от внешних воздействий

Защита технических средств АСУТП от механических воздействий обеспечивается размещением оборудования в специализированных конструктивах. Оборудование среднего уровня устанавливается в металлические шкафы, обеспечивающие защиту от случайных ударов.

Защита технических средств АСУТП от тепловых воздействий обеспечивается созданием микроклимата внутри шкафов. В шкафах, где располагается оборудование с повышенным тепловыделением, предусматриваются приточные вентиляторы для непрерывного обдува, обеспечивающие, в том числе, и циркуляцию воздуха внутри шкафа.

Для защиты технических средств системы от внешних электрических и магнитных полей, а также помех по цепям питания в системе применены специальные аппаратные (схемные) и программные решения:

- размещения технических средств в заземленных конструктивах с токопроводящей поверхностью;
- гальваническая развязка технических средств от технологического оборудования и между измерительными каналами;

- применение экранированных пар для передачи электрических сигналов;
- фильтрация помех по цепям питания.

Для защиты оборудования АСУТП от перебоев электроснабжения и стабилизации характеристик электроэнергии питание системы осуществляется от источников бесперебойного питания.

Для защиты данных АСУТП от повреждения (разрушения) применяются следующие методы:

- применение контроллеров с энергонезависимой памятью, либо с питанием от внутренней батареи;
- автоматизированное копирование базы данных Системы на отдельные носители типа CD, DVD, внешние дисковые накопители и т.п.

Применение данных методов защиты позволяет повысить надежность Системы в целом, обеспечить доступ к необходимой информации в любое время и снизить до минимума время восстановления системы после сбоя либо аварийного отключения питания.

Для защиты данных от несанкционированного доступа применяются следующие методы:

- авторизация оперативного и обслуживающего персонала в Системе по паролю;
- исключение доступа постороннего персонала к Системе путем размещения оборудования в шкафах под ключ

7 Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

7.1 Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ

В данном разделе магистерской диссертации проведена оценка коммерческого и инновационного потенциала научно-технического исследования по разработке проекта модернизации автоматизированной системы управления ректификационной колонной на основе систем усовершенствованного управления технологическим процессом (СУУТП).

7.1.1 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Одним из компонентов научно-технического исследования является его последующая коммерциализация. Исходя из того, какие цели преследует правообладатель объектов интеллектуальной собственности может быть выбран один из методов получения прибыли.

В данном проекте целью коммерциализации является получение денежных средств для финансирования текущих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также формирования постоянного потока финансовых средств.

В данном проекте наиболее подходящим методом коммерциализации будет являться продажа патентных лицензий, т.е. передача права пользования объектов интеллектуальной собственности третьим лицам на лицензионной основе, а именно разработанной автоматизированной системы управления. Этот метод был выбран исходя из возможности получения наибольшей экономической эффективности.

За продажу лицензий выплачивается вознаграждение (лицензионные платежи), а именно:

- периодические отчисления (роялти) от дохода покупателя в течение всего периода действия соглашения, позволяющие установить прямую

зависимость размера вознаграждения от экономического эффекта использования предмета лицензии;

- единовременные платежи, устанавливаемые заранее на основе экспертных оценок. Эти платежи не связаны во времени с фактическим использованием лицензии.

Уровень роялти варьирует в пределах от 2 до 10%, но наиболее часто встречаются ставки в 3—5%. Единовременные платежи осуществляются в форме паушальных платежей, а также посредством передачи части ценных бумаг и в других формах.

Паушальные платежи — это твердо зафиксированная в лицензионном соглашении сумма вознаграждения, которая выплачивается один раз и размер которой не зависит от объема производства или сбыта лицензионной продукции.

Исходя из текущей стадии проекта, данный метод коммерциализации будет являться наиболее подходящим, т.к. он, с одной стороны, позволяет получать паушальные платежи, позволяющие продолжать научные исследования и разработки и улучшать уже имеющиеся алгоритмы. С другой стороны, роялти позволяют получить приток финансовых средств, который в дальнейшем может позволить открыть собственную организацию.

7.1.2 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок — сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка — это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование — это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

Поскольку наша разрабатываемая система будет предназначена для коммерческих организаций, выделим основные однородные группы компаний (таблица 10).

Таблица 10 – Сегментирование компаний

		Специализация компании			
		Компании-подрядчики АСУ	Нефтегазовые компании	Компании нефтехимической промышленности	Проектные организации
Размер компании	Крупные				
	Средние				
	Мелкие				

Анализируя таблицу, можно прийти к выводу, что самыми заинтересованными и выгодными потребителями будут крупные компании нефтехимической и нефтегазовой промышленности. Это обусловлено тем, что эффективность внедрения систем подобного уровня приносят основные преимущества именно в условиях больших объемов производства. Это не исключает эффекта от внедрения систем СУУТП на маленьких производственных объектах. Также к потребителям можно отнести мелкие и средние компании по проектированию и по монтажу и обслуживанию АСУ ТП на производствах. Для данных компаний использования данной системы будет хорошим подспорьем для создания собственной репутации от внедрения систем управления высокотехнологичными производствами.

7.1.3 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта, проведем SWOT-анализ, который состоит из определения сильных, слабых сторон проекта, его возможностей и угроз (таблица 11).

Таблица 11 – Матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Экономический эффект от внедрения С2. Относительно не высокие затраты на внедрение С3. Отсутствие необходимости тотальной модернизации процесса	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1 Сложность тестирования на реальном объекте Сл2. Отсутствие специалистов с большим опытом внедрения и эксплуатации Сл3. Новизна технологии, отсутствие базы эмпирического опыта
Возможности: В1. Широкое развитие СУУТП В2. Появление новых, более совершенных технологий В3. Выпуск специалистов в данной отрасли, ориентированных на решение инженерных, промышленных задач	Развитие систем усовершенствованного управления, а также появление новых технологий в рамках данного направления, приведет к снижению стоимости готового продукта для потребителя и более надежной и экономически выгодной эксплуатации.	Тестирование разрабатываемой системы в реальных условиях будет затруднительно в связи с необходимостью работы с реально работающей установкой, сбой работы которой повлечет серьезные финансовые потери.
Угрозы: У1. Низкая готовность российских компаний к использованию СУУТП У2. Возникновение систем автоматизированного управления на базе систем искусственного интеллекта У3. Незаинтересованность в разработке	Трудности в переходе автоматизированного управления к СУУТП заключаются в том, что российские компании на данный момент не являются заинтересованными в развитии систем автоматизированного управления к следующему порядку.	Только в случае высокой обоснованности эффективности применения СУУТП, появится возможность получения финансирования от крупных компаний с последующим внедрением СУУТП.

Итак, определенные в ходе анализа сильные и слабые стороны разрабатываемой системы дают возможность определить те параметры, которые являются выигрышными, их нужно развивать и поддерживать на необходимом уровне, и параметры, улучшение которых может оптимизировать процессы управления и свести к минимуму возможные проблемы.

7.1.4 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения были выделены следующие критерии:

1. Технические критерии оценки ресурсоэффективности:

- оптимальность системы автоматического управления – критерий, характеризующий систему автоматического управления с точки зрения обеспечения оптимального значения какого-либо показателя качества работы системы;
- быстродействие системы автоматического управления – критерий, характеризующий быстроту достижения заданного значения;
- точность системы автоматического управления – критерий, определяющий степень приближения реального управляемого процесса к требуемому;
- устойчивость системы автоматического управления – критерий, характеризующий способность системы автоматического управления нормально функционировать и противостоять различным неизбежным воздействиям;
- надежность системы автоматического управления – критерий, характеризующий способность системы автоматического управления сохранять в течение времени определенные значения параметров для реализации возложенных на нее функций;
- безопасность системы автоматического управления – критерий, характеризующий вероятность возникновения чрезвычайной ситуации при обслуживании системы автоматического управления;
- сложность реализации – критерий, определяющий сложность внедрения данного технического решения на новый объект.

2. Экономические критерии оценки ресурсоэффективности:

- конкурентоспособность;
- уровень проникновения на рынок;
- цена;
- предполагаемый срок эксплуатации;
- условия проникновения на рынок.

Проведем данный анализ с помощью оценочной карты, представленной в таблице 12. В качестве конкурентных разработок выделим СУУТП компаний T-Soft (Санкт-Петербург) и YokoGawa (Япония).

Таблица 12 – Оценочная карта

Критерии оценки	Вес	Баллы			Конкурентоспособность		
		Разрабатываемая СУУТП	T-Soft	YokoGawa	Разрабатываемая СУУТП	T-Soft	YokoGawa
1. Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Оптимальность САУ	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
Быстродействие САУ	0,08	4	4	5	0,32	0,32	0,4
Точность САУ	0,08	4	4	4	0,32	0,32	0,32
Устойчивость САУ	0,05	4	3	4	0,2	0,15	0,2
Надежность САУ	0,1	5	2	4	0,5	0,2	0,4
Безопасность САУ	0,05	5	3	4	0,25	0,15	0,2
Простота реализации	0,08	4	2	4	0,32	0,16	0,32

Продолжение таблицы 12

Критерии оценки	Вес	Баллы			Конкурентоспособность		
		Разрабатываемая СУУТП	T-Soft	YokoGawa	Разрабатываемая СУУТП	T-Soft	YokoGawa
2. Экономические критерии оценки ресурсоэффективности							
Конкурентоспособность	0,05	4	2	4	0,2	0,1	0,2
Уровень проникновения на рынок	0,05	3	2	3	0,15	0,1	0,15
Цена	0,2	4	5	3	0,8	1	0,6
Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
Условия проникновения на рынок	0,06	4	2	4	0,24	0,12	0,24
Итого	1	51	37	48	4,3	3,42	3,93

Опираясь на полученные результаты, можно сделать вывод, что разрабатываемая система усовершенствованного управления на текущий момент может стать серьезным конкурентом ведущим производителям, при этом данная технология однозначно превосходит классические системы АСУТП как по техническим, так и по экономическим критериям.

7.1.5 FAST-анализ

FAST-анализ является функционально-стоимостным анализом. Суть этого метода базируется на том, что затраты, связанные с созданием и использованием любого объекта, выполняющего заданные функции, состоят из необходимых для его изготовления и эксплуатации и дополнительных, функционально неоправданных, излишних затрат, которые возникают из-за введения ненужных функций, не имеющих прямого отношения к назначению

объекта, или связаны с несовершенством конструкции, технологических процессов, применяемых материалов, методов организации труда и т.д.

В таблице 13 приведены описания главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом.

Таблица 13 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования

Наименование устройства	Кол-во деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Колонна деэтанализации	1	Вывод этановой фракции из нестабильного конденсата	X		
Колонна стабилизации	1	Финальная стабилизация конденсата	X		
Приборы КИПиА	12	Контроль технологических параметров		X	
Система вентиляции	1	Вентиляция операторной УДСК			X
Система обогрева	1	Обогрев помещения операторной УДСК			X

Далее необходимо определить значимость выполняемых функций объектом. В таблице 14 приведена матрица смежности функций. В таблице используются обозначения значимости функций: «<» – менее значимая; «=» – одинаковые функции по значимости; «>» – более значимая.

Таблица 14 – Матрица смежности

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5
Функция 1	=	=	>	>	>
Функция 2	=	=	>	>	>
Функция 3	<	<	=	>	>
Функция 4	<	<	<	=	=
Функция 5	<	<	<	=	=

В таблице 15 проведено преобразование матрицы смежности в матрицу количественных соотношений. Преобразование проводится по принципу: 0,5 при «<»; 1,5 при «>»; 1 при «=».

Таблица 15 – Матрица количественных соотношений функций

	Функция 1	Функция 2	Функция 3	Функция 4	Функция 5	Итого
Функция 1	1	1	1,5	1,5	1,5	6,5
Функция 2	1	1	1,5	1,5	1,5	6,5
Функция 3	0,5	0,5	1	1,5	1,5	5
Функция 4	0,5	0,5	0,5	1	1	3,5
Функция 5	0,5	0,5	0,5	1	1	3,5

Проведем определение относительной значимости функций путем деления балла, полученного по каждой функции, на общую сумму баллов по всем функциям:

функция 1 – $6,5/25=0,26$;

функция 2 – $6,5/25=0,26$;

функция 3 – $5/25=0,2$;

функция 4 – $3,5/25=0,14$;

функция 5 – $3,5/25=0,14$.

Следующим этапом анализа предусмотрено определение стоимости функций, выполняемых объектом. В таблице 16 приведен примерный расчет стоимости каждой функции.

Таблица 16 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование устройства	Кол-во деталей на узел	Выполняемая функция	Стоимость детали, тыс.р.	Себестоимость, тыс.р.	Отн-ая стоимость
Колонна деэтанализации	1	Вывод этановой фракции из нестабильного конденсата	4500	4500	0,3996
Колонна стабилизации	1	Финальная стабилизация конденсата	4500	4500	0,3996
Приборы КИПиА	12	Контроль технологических параметров	80	960	0,0852
Система вентиляции	1	Вентиляция операторной УДСК	800	800	0,0710
Система обогрева	1	Обогрев помещения операторной УДСК	500	500	0,0444

Построим функционально-стоимостную диаграмму объекта и проведем ее анализ. На рисунке 38 приведена функционально-стоимостная диаграмма.

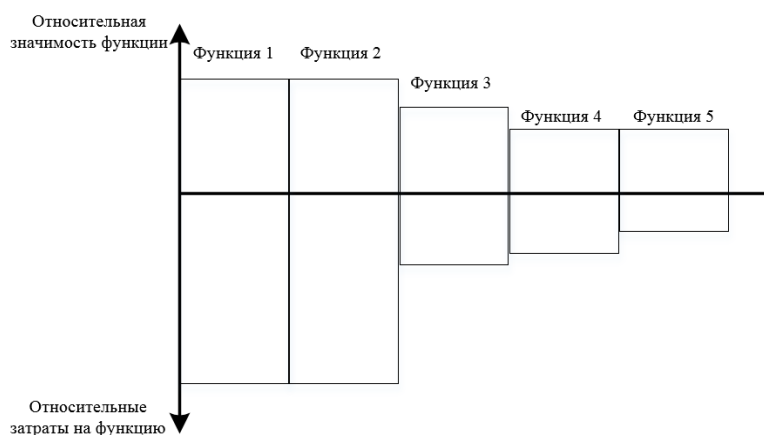


Рисунок 38 – Функционально-стоимостная диаграмма

Построенная функционально-стоимостная диаграмма имеет перекос в сторону затрат для главной и основной функции, это объясняется тем, что данное оборудование наиболее дорогостоящее и представлено в наибольшем количестве относительно других.

7.2 Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок

7.2.1 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела необходимо определить ключевые события проекта, определить их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты. Эта информация сведена в таблицу 17.

Таблица 17 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Подбор и изучение материалов по теме	03.09.2018-07.10.2018	Список изученной литературы
2	Проведение патентных исследований	08.10.2018-21.10.2018	Список изученных патентов
3	Выбор направления исследования	22.10.2018-31.10.2018	Определение, целей и задач исследования, составление задания
4	Проведение теоретических расчетов и обоснований	01.11.2018-11.11.2018	Обоснование целесообразности проведения исследования
5	Разработка концепции создания СУУТП	12.11.2018-02.12.2018	Разработанные положения концепции системы управления
6	Разработка структурной схемы	03.12.2018-16.12.2018	Разработанная структурная схема
7	Моделирование разработанной системы с помощью средств вычислительной техники	17.12.2018-20.01.2019	Полученные результаты моделирования разработанной системы
8	Тестирование полученных результатов в реальных условиях	21.01.2019-03.03.2019	Полученные результаты тестирования
9	Анализ полученных данных	04.03.2019-31.03.2019	Полученный анализ результатов исследования
10	Составление отчета о проделанной работе	01.04.2019-28.04.2019	Отчет о проделанной работе

7.2.2 План проекта

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. Рабочая группа, выполняющая научные исследования, состоит из двух человек: научного руководителя и непосредственного исполнителя – студента. План проекта предоставлен в таблице 18.

Таблица 18 – План проекта

Основные этапы	№ этапа	Содержание работ	Должность исполнителя
Выбор направления исследования	1	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, студент
	2	Проведение патентных исследований	Студент
	3	Выбор направления исследования	Руководитель, студент
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Студент
	5	Разработка концепции создания СУУТП	Студент
Разработка технической документации и практические исследования	6	Разработка структурной схемы	Студент
	7	Моделирование разработанной системы с помощью средств вычислительной техники	Студент
	8	Тестирование полученных результатов в реальных условиях	Студент
Оформление результатов исследований	9	Анализ полученных данных	Руководитель, студент
	10	Составление отчета о проделанной работе	Студент

7.2.3. 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. Для определения ожидаемого значения трудоемкости $t_{ожи}$ используется следующая формула:

$$t_{ожи} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{5}, \quad (38)$$

где $t_{ожи}$ - 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_{pi} , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожи\ i}}{Ч_i}, \quad (39)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожи\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн;

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

7.2.4. 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:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (40)$$

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

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

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (41)$$

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

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

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

В 2019 году 365 дней; из них 118 выходных и праздничных дней.

Коэффициент календарности рассчитаем следующим образом:

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

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе необходимо округлить до целого. Результаты расчетов сведем в таблицу 19.

Таблица 19 – График проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в рабочих днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож\ i}$, чел-дни						
	НР	С	НР	С	НР	С		НР – научный руководитель; С - студент	НР	С	НР
1. Подбор и изучение материалов по теме	30	30	35	35	32	32	НР, С	16	16	24	24
2. Проведение патентных исследований	-	10	-	14	-	12	С	-	12	-	17
3. Выбор направления	7	7	10	10	8,2	8,2	НР, С	4,1	4,1	6	6
4. Проведение теоретических расчетов и обоснований	–	7	–	11	–	8,6	С	–	8,6	–	13
5. Разработка концепции создания системы усовершенствованного управления	–	15	–	21	–	17	С	–	17	–	26

Продолжение таблицы 19

Название работы	Трудоёмкость работ						Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в рабочих днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожг}$, чел-дни			T_{pi}	T_{ki}	T_{pi}	T_{ki}
	НР	С	НР	С	НР	С					
	НР	С	НР	С	НР	С	НР – научный руководитель; С - студент	НР	С	НР	С
6. Разработка структурной схемы	-	10	-	14	-	12	С	-	12	-	17
7. Моделирование разработанной системы с помощью средств вычислительной техники	–	27	–	35	–	30	С	–	30	–	45
8. Тестирование полученных результатов в	–	36	–	42	–	38	С	–	38	–	57
9. Анализ полученных	21	21	28	28	24	24	НР, С	17	17	25	25
10. Составление отчета по проделанной работе	–	25	–	28	–	26	С	–	26	–	39
Итого								38	181	55	269

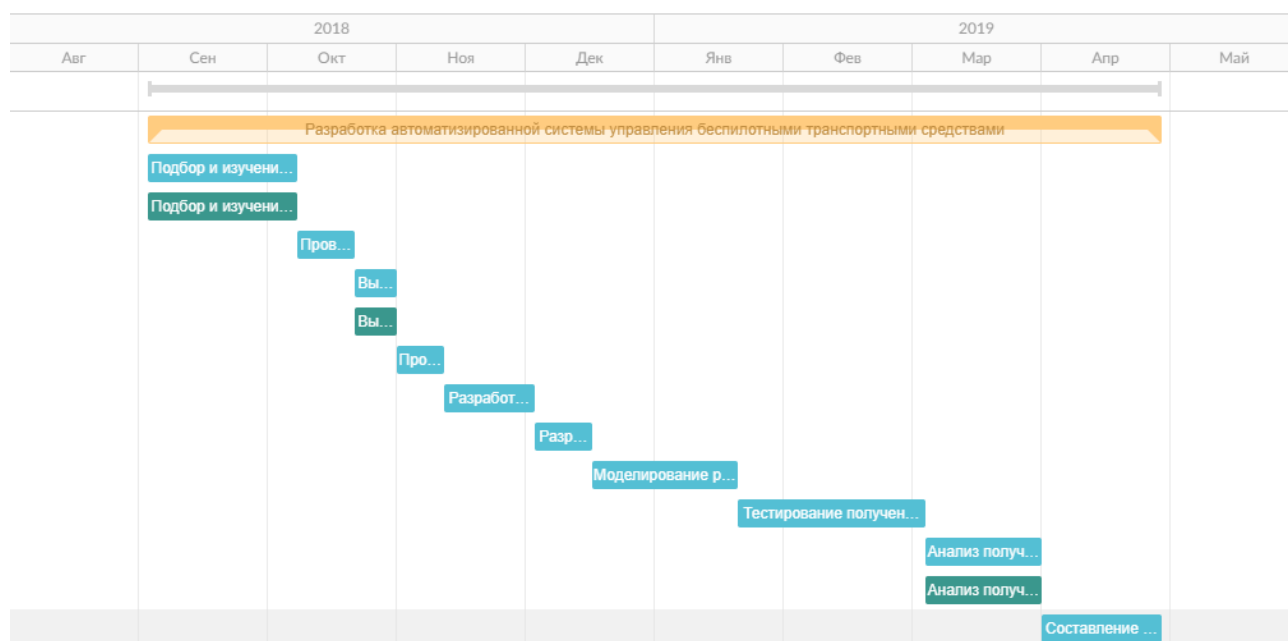


Рисунок 39 – Диаграмма Ганта

Таким образом, получили диаграмму Ганта, которая достаточно наглядно показывает распределение времени студента и руководителя во время выполнения проекта.

7.3 Разработка устава научно-технического проекта

7.3.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта. В нашем случае мы будем учитывать только затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{эл} = P_{об} \cdot t_{об} \cdot Ц_{э} , \quad (42)$$

где $P_{об}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{э}$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{об}$ – время работы оборудования, час.

Для ТПУ $Ц_{э} = 5,257$ руб./кВт·час (с НДС). Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 2 для инженера (ТРД) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{об} = T_{РД} \cdot K_t , \quad (43)$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{РД}$, определяется исполнителем самостоятельно.

В ряде случаев возможно определение $t_{об}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования. Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{ном} \cdot K_c , \quad (44)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_c \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности.

Для технологического оборудования малой мощности $K_c = 1$.

Пример расчета затраты на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 20.

Таблица 20 – Расчет затрат на сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

Наименование	Время работы оборудования, $t_{об}$, час	Потребляемая мощность, $P_{об}$, кВт	Затраты на электроэнергию, $C_{эл}$, руб
Электронергия	1488	0,4	3128,97
Итого:			3128,97

7.3.2 Специальное оборудование для научных работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ. Для выполнения работ по данной тематике необходим персональный компьютер и установленное на нем лицензионное программное обеспечение Matlab. Сведем стоимость специального оборудования в таблицу 21.

Таблица 21 – Специальное оборудование для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Персональный компьютер (ПК)	1	39500	39500
2	Доставка ПК в лабораторию и его последующая настройка	1	5925	5925
3	Лицензия ПО Matlab	1	43800	43800
Итого:				89225

7.3.3 Основная и дополнительная зарплата научно-производственного персонала

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп} , \quad (45)$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $З_{осн}$).

Основная заработная плата ($З_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p , \quad (46)$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

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

$З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_M \cdot M}{F_D} , \quad (47)$$

где $З_M$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

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. (Таблица 22)

Таблица 22 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	120	120
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	50	70
Действительный годовой фонд рабочего времени	195	175

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$З_m = З_{тс} \cdot k_p, \quad (48)$$

где $З_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчет основной заработной платы представлен в таблице 23.

Таблица 23 – Основная заработная плата исполнителей темы

Исполнители	$З_{тс}$, руб.	k_p	$З_m$, руб.	$З_{дн}$, руб.	$T_{р.раб. дн.}$	$З_{осн.руб.}$
Руководитель	27484	1,3	57166,72	3233	15	48495
Студент	1692	1,3	2200	131	196	25676

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:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} , \quad (49)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12).

Данные приведены в таблице 24.

Таблица 24 – Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Исполнители	Основная зарплата(руб.)	Коэффициент дополнительной заработной платы ($k_{\text{доп}}$)	Дополнительная зарплата(руб.)
Руководитель	48495	0,12	5819,5
Студент	25676	0,12	3081,12
Итого:			8900,62

7.3.4 Отчисления во внебюджетные

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:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) , \quad (50)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2017 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность, вводится пониженная ставка – 27,1%. На стипендию студента отчисления во внебюджетные фонды не осуществляются. Результаты расчетов представлены в таблице (таблица 25).

Таблица 25 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	48495	5819,5
Студент	25676	3081,12
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	30%	
Итого		
Руководитель	16294,35	
Студент	8627,136	

7.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (51)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент накладных расходов.

$$C_{\text{накл}} = 0,4 \cdot (74171 + 8900,62) = 33228,64 \text{ руб.}$$

Данные по накладным расходам указаны в таблице 26.

Таблица 26 – Накладные расходы

№	Затраты по статьям						
	Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты, руб.	Специальное оборудование для научных работ, руб.	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Накладные расходы, руб.	Отчисления на социальные нужды, руб.	Итого плановая себестоимость, руб.
1	3128,97	89225	74171	8900,62	33228,64	24921,48	233575,71
2	3128,97	96225	74171	8900,62	33228,64	24921,48	240575,71

7.4 Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности

7.4.1 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности. Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения. Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (52)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп } i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}} = \frac{233575,71}{250000} = 0,9343$$

$$I_{\text{финр}} = \frac{230000}{250000} = 0,92$$

$$I_{\text{финр}} = \frac{240575,71}{250000} = 0,9623$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum_{i=1}^n a_i b_i \quad (53)$$

где I_{pi} – интегральный финансовый показатель разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки.

Сравнительная оценка характеристик проекта представлена в таблице 27.

Таблица 27 – Сравнительная оценка характеристик

Критерии	Весовой коэффициент	Проект	Аналог 1	Аналог 2
Материалоемкость	0,05	4	5	3
Надежность	0,3	5	4	5
Производительность	0,2	4	3	3
Удобство в эксплуатации	0,05	4	5	3
Энергосбережение	0,1	5	3	4
Безопасность	0,3	5	4	5
Итого	1	4,7	3,8	4,3

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{\text{финр}}^p$) и аналога ($I_{\text{финаi}}^{ai}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формулам:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{финр}}^p}, \quad I_{\text{финаi}}^{ai} = \frac{I_m^{ai}}{I_{\text{финаi}}^{ai}} \quad (54)$$

Все необходимые параметры для оценки ресурсоэффективности сведены и рассчитаны в таблице 28.

Таблица 28 – Сравнительная таблица показателей эффективности

№	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,9343	0,92	0,9623
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,7	3,8	4,3
3	Интегральный показатель эффективности	5,03	4,13	4,47
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,834	0,863

Таким образом, основываясь на определении ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования, проведя необходимый сравнительный анализ, можно сделать вывод о превосходстве разработки над аналогами, в первую очередь в силу того, что технология, применяемая у аналогов, является устаревшей и работает не в оптимальных режимах работы, несмотря на доказанную работоспособность. Аналог 2 имеет незначительное превосходство над аналогом 1 в виду использования более современного оборудования, однако модернизация только технической части без модернизации принципов управления приносит не таких высоких результатов.

7.4.2 Оценка абсолютной эффективности исследования

В основе проектного подхода к инвестиционной деятельности предприятия лежит принцип денежных потоков. Особенностью является его прогнозный и долгосрочный характер, поэтому в применяемом подходе к анализу учитываются фактор времени и фактор риска. Для оценки общей экономической эффективности инноваций в качестве основных показателей рекомендуются считать:

- чистая текущая стоимость (NPV);
- срок окупаемости (D_{PP});
- внутренняя ставка доходности (IRR);
- индекс доходности (PI).

7.4.2.1 Расчет чистой текущей стоимости

Чистая текущая стоимость является абсолютным показателем. Условием экономичности инвестиционного проекта по данному показателю является выполнение следующего неравенства: $NPV > 0$.

Чем больше NPV , тем больше влияние инвестиционного проекта на экономический потенциал предприятия, реализующего данный проект, и на экономическую ценность этого предприятия.

Таким образом, инвестиционный проект считается выгодным, если NPV является положительной величиной. Расчет текущей стоимости по проекту показан в таблице 29.

Таблица 29 – Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Выручка от реализации, тыс.руб.	0,000	138,214	138,214	138,214	138,214
2.	Итого приток, тыс.руб.	0,000	138,214	138,214	138,214	138,214
3.	Инвестиционные издержки, тыс.руб.	-225,8	0,000	0,000	0,000	0,000
4.	Операционные затраты, тыс. руб. С+Ам+ФОТ	0,000	26,814	26,814	26,814	26,814
5.	Налогооблагаемая прибыль (1-4)	0,000	111,4	111,4	111,4	111,4
6.	Налоги, тыс. руб донал.приб*20%	0,000	22,28	22,28	22,28	22,28
7.	Итого отток, тыс.руб. Опер.затр.+налоги	-225,8	49,094	49,094	49,094	49,094
8.	Чистая прибыль, т.р. (5-7)	-225,8	62,306	62,306	62,306	62,306

Продолжение таблицы 29

9.	Амортизация, т.р	0,000	-0,500	-0,500	-0,500	-0,500
10.	Чистый денежный поток, тыс. руб. ЧДП=Пчист+Ам	-225,8	61,806	61,806	61,806	61,806
11.	Коэффициент дисконтирования (приведения при $i = 20\%$)	1	0,985	0,970	0,955	0,941
12.	Дисконтированный чистый денежный поток, тыс.руб. ($c_{10} \cdot c_{11}$)	-225,8	60,879	59,952	59,025	58,159
13.	То же нарастающим итогом, тыс.руб. ($NPV = 12,215$ тыс.руб.)	-225,8	-164,921	-104,969	-45,945	12,215

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 12,215 тыс. рублей, что позволяет говорить о его эффективности.

7.4.2.2 Дисконтированный срок окупаемости

Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разной ценности денег во времени.

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости.

Рассчитывается данный показатель примерно по той же методике, что и простой срок окупаемости, с той лишь разницей, что последний не учитывает фактор времени.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (таблица 30).

Таблица 30 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Дисконтированный чистый денежный поток ($i=0,20$)	-225,8	60,879	59,952	59,025	58,159
2.	То же нарастающим итогом	-225,8	-164,921	-104,969	-45,945	12,215
3.	Дисконтированный срок окупаемости	$PP_{диск} = 3 + 45,945/58,159 = 3,79$ месяца				

7.4.2.3 Внутренняя ставка доходности (IRR)

Для установления показателя чистой текущей стоимости (NPV) необходимо располагать информацией о ставке дисконтирования, определение которой является проблемой, поскольку зависит от оценки экспертов. Поэтому, чтобы уменьшить субъективизм в оценке эффективности инвестиций на практике широкое распространение получил метод, основанный на расчете внутренней ставки доходности (IRR).

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования (i) существует обратная зависимость. Эта зависимость следует из таблицы 31 и графика, представленного на рисунке 40.

Таблица 31 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№	Наименование показателя	0	1	2	3	4	
1	Чистые денежные потоки	-225,8	61,806	61,806	61,806	61,806	
2	Коэффициент дисконтирования						
	$i=0,1$	1	0,992	0,984	0,976	0,969	
	$i=0,2$	1	0,985	0,97	0,955	0,941	
	$i=0,3$	1	0,978	0,957	0,937	0,916	
	$i=0,4$	1	0,972	0,945	0,919	0,894	
	$i=0,5$	1	0,967	0,935	0,904	0,874	
	$i=0,6$	1	0,962	0,925	0,889	0,855	
	$i=0,7$	1	0,957	0,915	0,876	0,838	
	$i=0,8$	1	0,952	0,907	0,863	0,822	
	$i=0,9$	1	0,948	0,899	0,852	0,807	
	$i=1$	1	0,944	0,891	0,841	0,794	
3	Дисконтированный денежный поток, тыс. руб						NPV
	$i=0,1$	-225,8	61,3116	60,8171	60,3227	59,89	16,5413
	$i=0,2$	-225,8	60,8789	59,9518	59,0247	58,1594	12,2149
	$i=0,3$	-225,8	60,4463	59,1483	57,9122	56,6143	8,32113

Продолжение таблицы 31

№	Наименование показателя	0	1	2	3	4	
3	Дисконтированный денежный поток, тыс. руб						NVP
	i=0,4	-225,8	60,0754	58,4067	56,7997	55,2546	4,73638
	i=0,5	-225,8	59,7664	57,7886	55,8726	54,0184	1,64608
	i=0,6	-225,8	59,4574	57,1706	54,9455	52,8441	-1,3824
	i=0,7	-225,8	59,1483	56,5525	54,1421	51,7934	-4,1637
	i=0,8	-225,8	58,8393	56,058	53,3386	50,8045	-6,7595
	i=0,9	-225,8	58,5921	55,5636	52,6587	49,8774	-9,1082
	i=1	-225,8	58,3449	55,0691	51,9788	49,074	-11,333

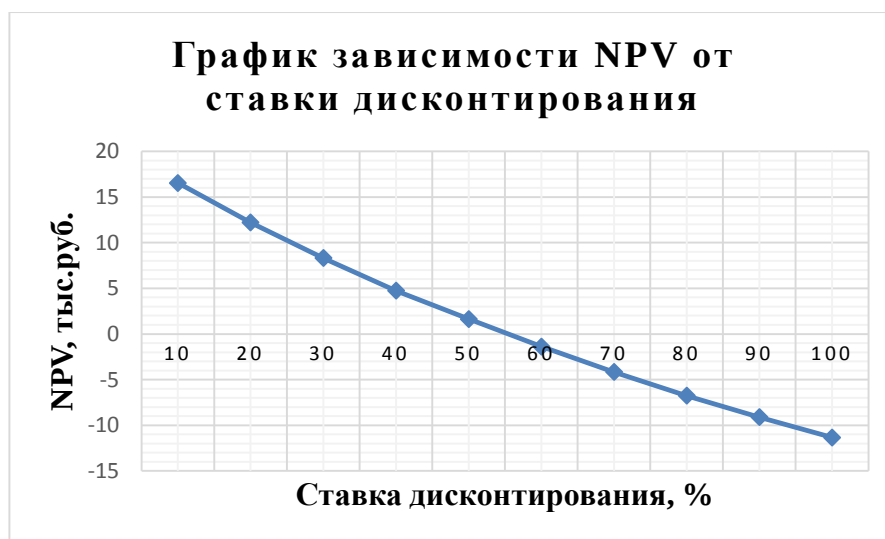


Рисунок 40 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования.

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 55%.

7.4.2.4 Индекс доходности (рентабельности) инвестиций

Индекс доходности показывает, сколько приходится дисконтированных денежных поступлений на рубль инвестиций.

Расчет этого показателя осуществляется по формуле:

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧПД_t}{(1+i)^t} / I_0, \quad (54)$$

где I_0 – первоначальные инвестиции.

$$PI = \frac{62,918 + 61,969 + 61,035 + 60,115}{225,8} = 1,089$$

$PI=1,089>1$, следовательно, проект эффективен при $i=0,2$;

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населения, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты (таблица 32).

Таблица 32 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Работа системы автоматизированного управления не в оптимальном режиме	СУУТП выводит процесс в оптимальный режим, тем самым, повышая производительность работы установки, и, увеличивая экономическую эффективность для предприятия
Загрязнение окружающей среды	Применяя системы усовершенствованного управления снижаются количества вредных выбросов от установок, ввиду работы в оптимальном режиме

7.5 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Таким образом, на основании всех расчётов можно сделать вывод о том, что проект является рентабельным и эффективным для инвестиций в первую очередь потому что обслуживание инвестиций не требует больших капиталовложений, так как разрабатываемая система является автономной и требует точной настройки, следовательно, и финансовые вложения только на начальном этапе своего функционирования. Все показатели финансовой и экономической эффективности, такие как чистая текущая стоимость (NPV), срок окупаемости (D_{PP}), внутренняя ставка доходности (IRR), индекс доходности (PI), рассчитанные в ходе работы по разделу подтверждают вышесказанное утверждение.

8 Раздел «Социальная ответственность»

На сегодняшний день нефтегазодобывающая промышленность России – это не только добыча ресурсов из недр земли, но и система комплексов по очистке сырья и производству продукции. И огромная роль в данной индустрии отводится специализированному техническому оснащению и технологиям.

Важно отметить, что при добыче и переработке природного газа получают побочное сырье – нестабильный газовый конденсат. Данное сырье перерабатывают в стабильный газовый конденсат на установке деэтанзации и стабилизации конденсата, основным процессом на которой является ректификация многокомпонентной смеси в колонне ректификации.

В процессе трудовой деятельности на специалиста, разрабатывающего методы модернизации автоматизированной системы управления ректификационной колонной, могут оказывать воздействие различного рода производственные факторы. Для их предупреждения и сохранения здоровья работника предусматривается ряд мер по обеспечению безопасности трудовой деятельности.

В магистерской диссертации выполняется разработка проекта модернизации автоматизированной системы управления ректификационной колонной на базе СУУТП. Применяться разработанная система будет на установке деэтанзации и стабилизации конденсата.

Стейкхолдерами системы управления станут компании нефтегазовой отрасли, а также производства нефтехимической отрасли. Данная система приведет к увеличению эффективности обработки нестабильного конденсата, а также уменьшить выход побочных нежелательных продуктов. В ходе выполнения работы были проведены теоретические исследования, а также осуществлено проектирование системы управления.

Основными инструментами для выполнения поставленных задач являются средства вычислительной техники – персональный компьютер, устанавливаемое программное обеспечение и периферийные устройства. При разработке системы на здоровье человека влияют определенные негативные

факторы, например, нагрузка на зрение, вредные шумы и излучения, неправильная поза за компьютером, а также психологическая нагрузка.

Целью данного раздела магистерской диссертации является анализ опасных и вредных факторов труда, анализ степени их влияния на человека и выявление потенциальных мер по нивелированию их воздействия на инженера. Кроме этого, были рассмотрены вопросы охраны окружающей среды, пожарной безопасности, а также организационно-правовые вопросы.

8.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

8.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

Основная работа выполняется на компьютере, отсюда следует, что инженер длительный период пребывает за компьютером, сидя у монитора, в одной позе. Данный фактор наряду с излучением, нагрузкой на зрение и подобным факторам наносит неблагоприятное воздействие на организм человека. Поэтому при работе за компьютером следует в обязательном порядке делать перерывы.

Трудовой кодекс РФ данный вопрос напрямую не регулирует, но при этом работодатель обязан предоставлять работникам перерывы. Согласно статье 107 Трудового кодекса РФ одним из видов отдыха в процессе рабочего дня являются перерывы. На основании статьи 109 ТК РФ работники в течение рабочего дня имеют право на отдых, что вызвано спецификой условий работы. Работодатель обязан предусматривать порядок предоставления перерывов в правилах внутреннего распорядка.

Статья 27 Закона о санитарно-эпидемиологическом благополучии от 30 марта 1999 года регулирует вопросы влияния различных устройств (в том числе и ЭВМ) на здоровье работника.

СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 (утверждены 30 мая 2003 года) регулируют порядок организации рабочего процесса для лиц, труд которых связан с компьютерной техникой. Согласно приложению 7 к данному документу, в зависимости от степени нагрузки и времени работ, время отдыха должно

составлять от 50 до 140 минут в течение рабочего дня. При этом данные перерывы не должны увеличивать продолжительность рабочего дня. За нарушение данных правил предусмотрена административная ответственность (ст. 6.3 КоАП).

В статье 22 Трудового кодекса РФ указано, что работодатель обязан обеспечивать безопасность работника и соответствие условий труда всем необходимым требованиям.

Типовая инструкция ТОО Р-45-084-01 (утверждена 2 февраля 2001 года) более детально регламентирует данный вопрос. Согласно данному документу, без перерыва работник может находиться за монитором компьютера не более двух часов. Перерывы выполняются с целью сохранения здоровья органом зрения, снижения усталости глаз и уменьшения их напряжения.

В зависимости от вида и времени осуществляемой работы инструкция устанавливает разделение путем классификации по группам:

- А – чтение информации с монитора по сделанному запросу;
- Б – печатание на клавиатуре с целью ввода информации;
- В – творческая работа.

Кроме этого, предусмотрено деление на категории сложности работ:

- для группы А (не свыше 60000 считываемых знаков за смену) перерыв составляет 15 минут, предоставляется два раза – через два часа после начала работы и перерыва на обед;
- для группы Б (не свыше 40000 напечатанных знаков за смену) перерыв составляет 10 минут через каждый трудовой час;
- для группы В (не свыше шести 6 часов за смену) перерыв составляет 15 минут через каждый трудовой час.

Если смена длится двенадцать часов, время регламентированных перерывов при работе на компьютере за восемь часов работы предоставляется в

вышеуказанном порядке, а за оставшиеся четыре часа – пятнадцать минут за каждый час (вне зависимости от категории).

8.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

К вредным психофизиологическим факторам можно отнести:

- умственное перенапряжение;
- статические физические нагрузки;
- монотонность труда;
- эмоциональные перегрузки.

Для минимизации влияния данных факторов на производительность и здоровье работника необходимо корректно организовать работу с ЭВМ в зависимости от категории и вида трудовой деятельности. Для предотвращения утомления, снижения влияния гипокинезии и гиподинамии целесообразно выполнять специализированные комплексы упражнений.

Также для минимизации вредных психофизиологических факторов следует организовать рабочие места согласно требованиям и нормам. Организация рабочих мест для пользователей ЭВМ осуществляется в соответствии с требованиями СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03:

- расстояние между рабочими столами с видеомониторами должно быть не менее двух метров, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов – не менее 120 сантиметров;
- экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии от 600 до 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов;
- конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение используемого оборудования с учетом характера выполняемой работы;
- поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения от 0,5 до 0,7;

- конструкция рабочего стула должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПК, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины; тип рабочего стула выбирается с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПК.

8.2 Профессиональная социальная безопасность

Для выполнения данной работы в качестве оборудования используется персональный компьютер. Это учитывается при рассмотрении вредных и опасных факторов. Классификация вредных и опасных факторов проведена в соответствии с СанПиН 2.2.2.1332-03. Возможные опасные и вредные факторы при выполнении магистерской диссертации на разных этапах работ отражены в таблице 33.

Таблица 33 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разрабо тка	Изготов ление	Эксплуа тация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96
2. Превышение уровня шума	+	+	+	СН 2.2.4/2.1.8.562-96
3. Возможность поражения электрическим током	+	+	+	ГОСТ ИЕС 61140-2012
4. Отсутствие или недостаток естественного света	+	-	-	СП 52.13330.2016
5. Электромагнитное и электростатическое излучения	+	+	+	СанПиН 2.2.4.1191-03

Поскольку современные жидкокристаллические мониторы отвечают всем нормам по ионизирующему излучению, оно в данной работе не рассматривается.

8.2.1 Отклонение показателей микроклимата

Для помещения с компьютером существуют определенные требования к температуре, влажности и наличию пыли. Температура должна находиться в диапазоне от 21 до 25 °С, относительная влажность – от 40 до 60 %, уровень аэроионов – от 400 до 50 000 (оптимальный – 1500–5000).

Это оптимальные условия для обеспечения максимально комфортного теплового баланса температуры тела человека и его терморегуляции. Если температура выше нормы, кровеносные сосуды расширяются, и теплоотдача в окружающую среду возрастает. При понижении температуры кровеносные сосуды соответственно сужаются приток крови к телу замедляется, и теплоотдача уменьшается.

На терморегуляцию организма влияет также влажность воздуха. Слишком высокая влажность (более 85 %) затрудняет терморегуляцию, а слишком низкая (менее 20 %) вызывает пересыхание слизистых, причем не только дыхательных путей, но и глаз.

Не менее важна оптимальная влажность в помещении: чем она выше, тем слабее влияние электростатических и электромагнитных полей, уровень излучения которых в помещении, где установлен компьютер, всегда повышен.

Принципиальным фактором в микроклимате помещения с компьютером является уровень пыли. Человеческий организм плохо адаптирован к условиям повышенной запыленности. Квартирно–офисная пыль сильно отличается от природной. Офисная пыль может содержать частицы мебельных тканей, клея, строительных материалов, частицы кожи человека и домашних животных, в том числе грызунов, споры микроскопических плесневых и дрожжевых грибов, различные виды клещей, волокна хлопка, льна, бумаги, бактерии и вирусы.

Такая пыль, попав в легкие, может вызвать различные заболевания – от аллергических реакций до хронических катаров верхних дыхательных путей, ларингита, хронического насморка, трахеита и даже хронического бронхита.

Учитывая высокий уровень электромагнитного излучения в помещении с компьютером, пыль не оседает на поверхностях. Она электризуется от экрана

монитора и висит в воздухе, поэтому гораздо проще попадает в легкие и на слизистые человека. По этой причине чистоте помещения, где есть компьютер, следует уделять особенное внимание. Влажная уборка в таком помещении должна проводиться не реже трех раз в неделю в офисе и не реже раза в неделю дома. Кроме этого, помещение, где стоит компьютер, должно хорошо проветриваться.

8.2.2 Превышение уровня шума

В производственных помещениях, в которых работа на ПЭВМ является вспомогательной, уровни шума на рабочих местах не должны превышать значений, установленных для данных видов работ "Санитарными нормами допустимых уровней шума на рабочих местах".

При выполнении основной работы на ПЭВМ (диспетчерские, операторские, расчетные кабины и посты управления, залы вычислительной техники и др.) уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБА.

В таблице 34 приведены предельные уровни звукового давления в октавных полосах, а также предельные уровни звука для видов работ, выполняемых специалистом за испытательной установкой.

Таблица 34 – Предельные уровни звукового давления и предельные уровни звука согласно СН2.2.4/2.1.8.562-96

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звуча (в дБА)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Конструкторские бюро, программисты, лаборатории	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

В помещениях, где работают инженерно-технические работники, осуществляющие лабораторный, аналитический или измерительный контроль, уровень шума не должен превышать 60 дБА.

В помещениях операторов ЭВМ (без дисплеев) уровень шума не должен превышать 65 дБА.

На рабочих местах в помещениях для размещения шумных агрегатов вычислительных машин (АЦПУ, принтеры и т.п.) уровень шума не должен превышать 75 дБА.

При выполнении работ с ПЭВМ в производственных помещениях уровень вибрации не должен превышать допустимых значений согласно "Санитарным нормам вибрации рабочих мест".

Шумящее оборудование (АЦПУ, принтеры и т.п.), уровни шума которого превышают нормированные, должно находиться вне помещения с ВДТ и ПЭВМ.

Снизить уровень шума в помещениях с ВДТ и ПЭВМ можно использованием звукопоглощающих материалов с максимальными коэффициентами звукопоглощения в области частот 63 - 8000 Гц для отделки помещений (разрешенных органами и учреждениями Госсанэпиднадзора России), подтвержденных специальными акустическими расчетами. Дополнительным звукопоглощением служат однотонные занавеси из плотной ткани, гармонирующие с окраской стен и подвешенные в складку на расстоянии 15 - 20 см от ограждения. Ширина занавеси должна быть в два раза больше ширины окна.

8.2.3 Электробезопасность

Основная работа выполняется при помощи ЭВМ, обладающей мощностью ~350 Вт с напряжением питания 220 В.

В целом, помещение сухое, непыльное, с нормальной температурой воздуха и поэтому относится к классу помещений без повышенной опасности: переключатели, кнопки и разъемы, клавиатура изолированы, пол покрыт электроизоляционным покрытием.

Корпус ЭВМ изготовлен из металлического листа, обладает высокой механической прочностью и высокими экранирующими свойствами, покрыт ток непроводящими полимерными пластмассами. Компьютер подключен к заземляющему контуру.

Электрические изделия по способу защиты человека от поражения электрическим током подразделяются на пять классов: 0, 01, 1, 2, 3.

ЭВМ можно отнести к классу 01, то есть, к изделиям, имеющим рабочую изоляцию, элемент для заземления и провод без заземляющей жилы для присоединения к источнику питания. При начале работы с ЭВМ необходимо проверить герметичность корпуса, не открыты ли токоведущие части. Убедиться в подключении заземляющего проводника к общей шине заземления, проверить его целостность. Если заземляющий проводник отключен, подключать его можно только при отключении машины от питающей сети. Важное значение для предотвращения электротравматизма имеет правильная организация обслуживания действующих электроустановок, проведение ремонтных, монтажных и профилактических работ.

8.2.4 Отсутствие или недостаток естественного света

Освещение рабочего места за компьютером играет важную роль в комплексе мероприятий по охране труда. Глаза не должны страдать от яркого света или, наоборот, от затемнения.

Рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться системой общего равномерного освещения. В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов).

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть от 300 до 500 лк. Освещение не должно создавать бликов

на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Следует ограничивать прямую блёскость от источников освещения, при этом яркость светящихся поверхностей (окна, светильники и др.), находящихся в поле зрения, должна быть не более 200 кд/м².

Следует ограничивать отраженную блёскость на рабочих поверхностях (экран, стол, клавиатура и др.) за счет правильного выбора типов светильников и расположения рабочих мест по отношению к источникам естественного и искусственного освещения, при этом яркость бликов на экране ПЭВМ не должна превышать 40 кд/м² и яркость потолка не должна превышать 200 кд/м².

Следует ограничивать неравномерность распределения яркости в поле зрения пользователя ПЭВМ, при этом соотношение яркости между рабочими поверхностями не должно превышать 3:1 - 5:1, а между рабочими поверхностями и поверхностями стен и оборудования 10:1.

В качестве источников света при искусственном освещении следует применять преимущественно люминесцентные лампы типа ЛБ и компактные люминесцентные лампы (КЛЛ). При устройстве отраженного освещения в производственных и административно-общественных помещениях допускается применение металлогалогенных ламп. В светильниках местного освещения допускается применение ламп накаливания, в том числе галогенные.

8.2.5 Электромагнитное и электростатическое излучения

Компьютер является источником электростатического и электромагнитного поля. Электромагнитные поля контролируют в двух диапазонах: от 5 Гц до 2 кГц, от 2 до 400 кГц. Измерения проводят на рабочих местах пользователей стационарных и портативных персональных компьютеров. Контролируют следующие параметры: напряженность электрического и магнитного поля, напряженность электростатического поля.

Среди неудовлетворительных результатов измерений электромагнитного поля персональных компьютеров, превышения напряженности чаще всего

наблюдаются у электрического поля, реже у магнитного поля. Как показывает практика, при использовании современных сертифицированных мониторов электромагнитная обстановка на рабочем месте в значительной степени определяется наличием заземления в помещении.

Если в помещении отсутствует заземление, то напряженность электрического поля возрастает в обеих частотах. При наличии в помещении сторонних источников электромагнитных полей промышленной частоты (50 Гц) возрастает напряженность на частоте от 5 Гц до 2 кГц по обоим параметрам. Скученность компьютеров негативно влияет на электромагнитную обстановку в целом.

Чтобы исключить негативные воздействия этих факторов на организм человека, необходимо иметь качественное заземление компьютера. Заземлять технику самостоятельно не рекомендуется, следует обращаться к профессионалам. Нельзя подключать заземляющий провод к молниеотводу, газопроводу и трубам отопления. Все это может привести к поломке компьютера и другим нежелательным последствиям.

При правильной организации рабочего места пользователя, при наличии заземления негативное влияние электромагнитных полей на организм человека можно исключить. Необходимо проводить производственный контроль электромагнитного излучения от персональных компьютеров на рабочих местах периодичностью один раз в год.

8.3 Экологическая безопасность

Защита окружающей среды — это комплексная проблема, требующая усилий всего человечества. Охрана окружающей среды - деятельность органов государственной власти Российской Федерации, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, общественных объединений и некоммерческих организаций, юридических и физических лиц, направленная на сохранение и восстановление природной среды, рациональное использование и воспроизводство природных ресурсов,

предотвращение негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду и ликвидацию ее последствий.

Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий является полный переход к безотходным, малоотходным и энергосберегающим технологиям и производствам.

При выполнении данной работы не осуществляется выбросов вредных веществ в атмосферу. Загрязнение атмосферного воздуха может возникнуть в случае возникновения пожара в помещении, в этом случае дым от пожара будут являться антропогенным загрязнением атмосферного воздуха.

В ходе выполнения данной работы не происходило значительного загрязнения гидросферы, образовывались лишь хозяйственно – бытовые воды. Бытовые сточные воды помещения образуются при эксплуатации туалетов, столовой, а также при мытье рук, полов и т.п. Данные воды отправляются на городскую станцию очистки. Загрязнение гидросферы осуществляют производственные отходы, в качестве которых в данном случае выступают бумажные отходы (макулатура) и неисправные детали персональных компьютеров, плат, контроллеров.

Бумажные отходы должны передаваться в соответствующие организации для дальнейшей переработки во вторичные бумажные изделия. Неисправные комплектующие персональных компьютеров должны передаваться либо государственным организациям, осуществляющим вывоз и уничтожение бытовых и производственных отходов, либо организациям, занимающимся переработкой отходов. Важнейшим этапом обращения с отходами является их сбор, а в дальнейшем переработка, утилизация и захоронение. Еще одним из способов снижения бумажных отходов является хранение данных на электронных носителях.

8.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

8.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

Согласно п. 1 ст. 2 Федерального закона от 21.07.1997 № 116-ФЗ участок комплексной подготовки газа и конденсата относится к категории опасных производственных объектов (ОПО) как объект на котором: получают, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются в указанных в приложении 2 к Федеральному закону от 21.07.1997 № 116-ФЗ количества опасные вещества (воспламеняющиеся и горючие); используется оборудование, работающее под избыточным давлением газа более 0,07 МПа (пп. 1 (а, в), 2 (а) приложения 1 к Федеральному закону от 21.07.1997 № 116-ФЗ). Опасность для обслуживающего персонала обусловлена следующими факторами:

- необходимостью работы во взрывоопасных и пожароопасных помещениях, необходимостью обслуживания запорной аппаратуры сепараторов, насосного оборудования и другого оборудования, находящегося под высоким давлением, при низкой (минусовой) и высокой температурах;
- выделением из технологических линий пожаро- и взрывоопасных веществ;
- использованием в технологических процессах вредных химических веществ;
- нахождением площадок обслуживания оборудования на значительной высоте;
- необходимостью проведения газоопасных и огневых работ;
- необходимостью круглосуточного обслуживания оборудования УКПГиК в различных метеорологических условиях.
- перегонка газового конденсата осуществляется при высоких температурах, давлении, в сложном технологическом оборудовании; нагрев газового конденсата ведется в трубчатых огневых печах;

- находящиеся в аппаратуре продукты (углеводородные газы, пары легких фракций, дизельные фракции) в случае разгерметизации оборудования могут образовывать с воздухом взрывоопасные или горючие смеси;
- нагретые до высоких температур (210°C) в процессе производства нефтепродукты могут стать причиной ожогов обслуживающего персонала.

В соответствии с этим опасные и аварийные производственные ситуации при подготовке транспортировке газа и газового конденсата возникают, главным образом, из-за нарушения технологического регламента при эксплуатации технологического оборудования, проведении ремонтных и огневых работ без соблюдения инструкций по охране труда, промышленной и пожарной безопасности.

Также существует риск:

- отравления при отборе проб газа, газового конденсата, при пропуске через сальниковые и фланцевые уплотнения, при дренировании аппаратов;
- получения термических ожогов при непосредственном контакте с горячим оборудованием, с водяным паром, с огнем при ликвидации загорания, при попадании в зону огня;
- поражения электрическим током при непосредственном контакте с незаземленными токоведущими проводами или оборудованием, находящимися под напряжением.

8.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией, которая может возникнуть при выполнении данной магистерской диссертации, является пожар, так как происходит эксплуатация устройств электропитания, электронных схем ЭВМ и других источников возникновения пожара. В результате различных неполадок, образующих перегретые элементы и электрические искры, может произойти возгорание горючих материалов.

В соответствии с правилами определения категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, регламентируемыми правилами устройства электроустановок, помещение, в котором была написана данная работа, относится к категории В, так как в помещении находятся сгораемые вещества и материалы (шкафы, столы, стулья, документация), для питания вычислительной техники используется напряжение 220 В переменного тока.

Для предупреждения возникновения пожара в помещении необходимо проводить следующие пожарно-профилактические мероприятия:

- организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта;
- эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования;
- технические и конструктивные, связанные с правильные размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов.

Организационные мероприятия:

- Противопожарный инструктаж работников;
- Изучение правил техники безопасности;
- Издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.

Эксплуатационные мероприятия:

- Соблюдение эксплуатационных норм оборудования;
- Обеспечение свободного подхода к оборудованию. В комнате рабочие места размещены так, что расстояние между рабочими местами с видеотерминалами (от поверхности экрана одного, до поверхности экрана другого) составляет порядка 250 сантиметров, расстояния между боковыми поверхностями порядка 150 сантиметров, что соответствует нормам. Из вышесказанного следует, что дополнительных мер защиты не требуется;
- Содержание в исправном состоянии изоляции токоведущих проводников.

Технические:

- Соблюдение противопожарных мероприятий при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения. В коридоре помещения на достигаемом расстоянии находится рубильник, обесточивающий всё помещение.
- Профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

В коридоре помещения, в котором выполнялась магистерская диссертация, на достигаемом расстоянии, находится пожарный щит. Наиболее дешевым и простым средством пожаротушения является вода, поступающая из обычного водопровода. Для осуществления эффективного тушения огня используют пожарные рукава и стволы, находящиеся в специальных шкафах, расположенных в коридоре. В пунктах первичных средств огнетушения должны располагаться ящик с песком, пожарные ведра и топор. Если возгорание произошло в электроустановке, для его устранения должны использоваться огнетушители углекислотные типа ОУ-2. Кроме устранения самого очага пожара нужно, своевременно, организовать эвакуацию людей.

8.5 Вывод по разделу «Социальная ответственность»

В ходе выполнения работы по разделу «Социальная ответственность» были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, суть которых заключалось в анализе основных нормативных документов регулирующих и регламентирующих производственную деятельность. Также был выполнен анализ вредных факторов проектируемого решения, таких как микроклимат, шум, освещение, электромагнитное и электростатическое излучение. В качестве мер по снижению шума, воздействующего на людей в рабочем помещении, предусмотрено использование звукопоглощающих материалов; в качестве мер по улучшению микроклимата предусмотрено поддержание в помещении оптимальной температуры и влажности воздуха; в качестве мер по снижению недостатка освещенности предусмотрено использование искусственного освещения; в качестве мер по снижению электромагнитного и электростатического излучения предусмотрено заземление компьютера. Также были рассмотрены такие важные вопросы, как экологическая безопасность и безопасность в чрезвычайных ситуациях. Практически на любых предприятиях создаются целые отделы, занимающиеся техникой безопасности, специалисты данных отделов следят за выполнением всех норм и регламентов безопасности. За несоблюдение данных регламентов грозят различного рода санкции вплоть до увольнения или уголовной ответственности работников предприятия.

Следование правилам, описанным в данном разделе диссертации, помогут избежать данных ситуаций, а также обеспечить здоровье персонала и сохранность окружающей среды.

Заключение

В результате выполнения работы была достигнута цель магистерской диссертации, была разработана и исследована система усовершенствованного управления ректификационной колонной. Были выполнены поставленные задачи:

- изучение основ процессов протекающих при ректификации многокомпонентной смеси;
- создание модели системы управления ректификационной колонной на УДСК;
- применение усовершенствованной АРС-стратегии управления в созданной системе;
- применение классической стратегии ПИД-управления в созданной системе;
- проведение анализа эффективности АРС-управления и подведение итогов.

В рамках выполнения работы для сложного объекта (ММО-объекта) был применен МРС-регулятор, который использовался в условиях ограничений на управляющие сигналы. На основании оценки прямых и интегральных показателей качества управления было доказано, что МРС-регулятор, примененный в разработанной модели системы управления и работающий в условиях ограничений на управляющие сигналы, позволяет добиться снижения энергетических затрат на управление, позволяет добиться увеличения быстродействия. МРС-регулирование позволяет добиться сокращения энергетических потерь при смене режима работы, при этом переход системы на новый режим работы осуществляется быстрее. Снижение энергозатрат позволяет повысить энергетическую экономичность работы рассмотренной системы управления ректификационной колонной.

Полученные результаты доказывают, что усовершенствованное управление позволяет повысить качество управления, снизить потери при смене режима работы системы, а также снизить экономические затраты, путем экономии энергетических ресурсов.

Список используемых источников

1. Ушева Н.В., Бешагина Е.В., Мойзес О.Е., Кузьменко Е.А., Гавриков А.А. Технологические основы и моделирование процессов промышленной подготовки нефти и газа: учебное пособие / Томский политехнический университет. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 128 с.
2. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для ВУЗов – Москва: Химия, 1995. – 368 с.
3. Бекиров Т.М, Ланчаков Г.А. Технология обработки газа и конденсата. – Москва: Недра, 1999. – 596 с.
4. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию (издание второе, переработанное и дополненное) – Москва: Химия, 1991. – 496 с.
5. Комиссарчик В.Ф. Автоматическое регулирование технологических процессов: учебное пособие (издание второе, расширенное). – Тверь: Изд-во Тверского государственного технического университета, 2001. – 248 с.
6. Азизов С.А., Али-заде Н.С., Искандер-Заде З.А., Молчанов А.М. Современное состояние математического моделирования ректификационных колонн. – Москва: Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 1974. – 18 с.
7. Авазов Ю.Ш., Кадыров Ё.Б., Саттаров О.У. Моделирование системы управления процессом ректификации / Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. — Екатеринбург: УрФУ, 2013. — С. 128-131.
8. Petar Durdevic, Zhenyu Yang. Application of H_{∞} Robust Control on a Scaled Offshore Oil and Gas De-Oiling Facility: Energies. – Vol. 11. – 2018. – 287 p.
9. Дозорцев В.М., Ицкович Э.Л., Кнеллер Д.В. Усовершенствованное управление технологическими процессами (APC): 10 лет в России // Автоматизация в промышленности. – 2013. – №1. – С. 12-19.
10. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. APC – усовершенствованное управление технологическими процессами // Датчики и системы, 2005. – № 10. – С. 56-62.
11. Camacho E.F., Bordons C. Model Predictive Control. – London: Springer-Verlag, 2004. – 294 p.
12. Holkar K.S., Waghmare L.M. An Overview of Model Predictive Control // International Journal of control and automation. – Vol. 3. – No. 4. – 2010. – P.47-63.

13. Надеждина И. С., Горюнова А. Г. и Маненти Ф.З. Системы управления нестационарным объектом на основе МРС-регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой // Управление большими системами: [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ст.: <http://docplayer.ru/53377728-Nadezhdin-i-s-1-goryunov-a-g-2manenti-f-3-nacionalnyy-issledovatel'skiy-tomskiy-politehnicheskii-universitet-tomsk.html>
14. Wang L. Model Predictive Control System Design and Implementation using MatLab // Advances in Industrial Control. – London: Springer-Verlag, 2009. – 403 p.
15. Денисенко В., ПИД-регуляторы: вопросы реализации // В записную книжку инженера: [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ст.: <https://www.cta.ru/cms/f/364276.pdf>.
16. Chongxin Huang, Dong Yue, Xiangpeng Xie, Jun Xie. Anti-Windup Load Frequency Controller Design for Multi-Area Power System with Generation Rate Constraint // Energies. – Vol. 9. – 2016. – 330 p.
17. Клиначев Н.В. и Маргацкая Е.А. PI- и PID-регуляторы. Решение задачи об интегральном насыщении: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/md_128.htm.
18. Anti-Windup Control Using a PID Controller: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mathworks.com/examples/simulink/mw/simulink_products/demo_antiwindup-anti-windup-control-using-a-pid-controller.
19. Уравнения Навье – Стокса: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/56422>.
20. Веремей Е.И., Еремеев В.В. Введение в задачи управления на основе предсказаний: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/modelpredict/book1/0.php>.
21. Веремей Е.И. Реализация оптимизационного подхода к проектированию систем управления в среде MATLAB: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://matlab.ru/upload/resources/EDU%20Conf/pp%2019-39%20Veremey.pdf>.
22. Optimization problem. MathWorks: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/mpc/ug/optimization-problem.html>.

23. ANSI/ISA-5.1-2009, Instrumentation Symbols and Identification. – North Carolina, USA, 2009. – 128 p.

24. 1756 ControlLogix and GuardLogix Controllers. Technical data: Rockwell Automation Publication. – 2018. – 52 p.

25. Дмитрий Кнеллер, Михаил Шундерюк. 40 лет Хоневелл в России: от «поля» к «облакам». Усовершенствованное управление и оптимизация технологических процессов: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/presentations/advancedsolutions-and-optimization-Dmitry-Kneller.pdf>.

26. Advanced Solutions. Honeywell: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.honeywellprocess.com/en-US/training/programs/advancedapplications/Pages/advanced-solutions.aspx>.

27. Advanced Software. Honeywell: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.honeywellprocess.com/en-US/explore/products/advancedapplications/Pages/default.aspx>.

28. Profit Controller. Honeywell: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.honeywellprocess.com/en-US/explore/products/advancedapplications/profit/profit-optimization-suite/Pages/profit-controller.aspx>.

29. Гаврикова Н.А., Тухватулина Л.Р., Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Шаповалова Н.В. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

30) ГОСТ 12.1.004–91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

31) СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах.

32) СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. М.: Минздрав России, 2003. 152

33) СП 52.13330.2011 Свод правил. Естественное и искусственное освещение.

34) СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.

35) СанПиН 2.2.2/2.4. 1191-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

36) ГОСТ 12.1.004–91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

37) ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

38) Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197–ФЗ.

Приложение А
(обязательное)

Modernization of rectification column management system based on advanced
process control systems

Раздел 1 Введение
Introduction

Раздел 2 Применение APC-управления
Applying of APC-management

Раздел 3 Описание технологической схемы
Description of the technological scheme

Раздел 4 MPC-управление процессами МИМО-системы «буферная емкость – колонна
ректификации»
MPC-control of MIMO-system "buffer capacity - rectification column"

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ71	Селивёрстов Павел Андреевич		

Консультант отделения автоматизации и робототехники:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н.		

Консультант – лингвист кафедры ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ ШБИП	Пичугова Инна Леонидовна	-		

1 Introduction

Safety, production reliability and product quality improvement issues are not only important issues for modern enterprises, issues of production economy, reduction of economic losses are important too; they can increase economical profitability of the enterprise. Advanced process control (APC) is aimed at increasing the profitability of the enterprise by increasing the productivity of technological units, reducing energy losses, stabilizing product quality indicators, reducing losses caused by changing the operating mode, increasing the stability and safety of installations, and also increase the controllability of technological units. MPC-control or Model Predictive Control, which is the main direction of APC-systems development, allows the enterprise profit to increase in conditions of constraints imposed on controlling and controlled variables, as well as in controlling complex multivariable objects.

The oil and gas industry is the leading industry of the Russian Federation, and the oil and gas industry objects are complex objects with many parameters and constraints imposed on them. Extraction of natural resources is tightly connected with their further processing. When processing oil and gas, a by-product is obtained – an unstable gas condensate. This type of condensate is the raw material for the installations of de-ethanization and stabilization of condensate (IDSC). Stable gas condensate is intended for use in the petrochemical industry and for producing fuel based on it. The issues of completeness of the use natural resources have always been quite acute and it is impossible to ignore the by-products obtained at various stages. That is why it is necessary to pay special attention to the issues of control and regulation at the enterprises where the processes of integrated gas treatment take place. Moreover, increasing the economic efficiency of enterprises, reducing energy and material costs, saving resources and improving the quality of oil products remain the burning issues.

Within the framework of this Master's thesis, an APC-system for rectification column control in an installation of de-ethanization and stabilization of condensate (IDSC) has been developed, the effectiveness of APC-control strategy has been

analyzed, the analysis was based on an assessment of the direct and integral indicators of control quality.

At this stage, it is necessary to formulate the goals and objectives of the modernization. They are as follows:

- 1) To increase the reliability of the automated control system;
- 2) The output control process in the optimum modes;
- 3) To improve the system of emergency signaling and protection;
- 4) To strengthen control over emissions of harmful substances;
- 5) To increase the profitability of production.

2 Applying of APC-management

The object of study of this Master's thesis is the control system of a distillation column, which is made according to two column schemes. Existing control systems, based on classical control methods, are compliant with safety requirements and perform the required functions, but it is noteworthy that these systems do not fully meet the efficiency requirements. Companies today want not only to get a safe technological process, but also to reduce economic losses, operating costs, to increase production profits and to improve product quality, thereby gaining a leadership position among competing companies. These goals can be achieved by taking the process to an optimal operating mode, using an advanced approach to control – APC (Advanced Process Control). APC allows to improve the technological process, not by acquiring new expensive technological equipment, but by rationalizing the process control system, the rationalizing of the control system is much cheaper than the acquiring of new equipment. The main direction of APC development is MPC (Model Predictive Control).

Proportional-integral-differentiating (PID) regulators are widely applied in control systems of oil and gas industry. PID-controller has a simple and compact

structure and, in most cases, allows to achieve the control objective, in addition, the effectiveness of PID-control algorithms is enhanced by new developments and ideas: different variants of the differentiating component are implemented, PID-regulator's structures allowing feedforward control are developed. However, the main issue of the PID-controller using is its coefficients adjusting. Currently, the adjustment of the PID-controller coefficients can be carried out automatically, but the problem is that the majority of technological processes in oil and gas industry have parameters that drift with time, so that a once-tuned PID-controller will not be able to achieve the control target throughout the operation of the control object. As a result, constant adjustment of the PID-controller parameters is necessary. In addition, for all production processes, it is true that the greatest economic benefit can be obtained with the optimal values of the parameters, which depend on the ratio of the product cost and expended resources cost, therefore, it is necessary to control the process optimally. Traditional algorithms often do not work in the optimal mode and this leads to a loss of efficiency of the technological process.

Some object of the oil and gas industry are complex objects with many inputs and many outputs. There are complex cases of control over the technological process in oil and gas industry. Thus, during the process of stabilization of condensate on the two-column scheme of rectification controlled about fifteen different parameters and its composition are controlled periodically in the laboratory in a manual mode and, therefore, they are not directly regulated. Even more difficult is petrochemical industries control. In these and similar cases automation with additional properties is required. To solve such problems, control methods based on predictive models were created.

In real systems the so-called «windup» effect takes place, which is caused by nonlinearities of some real system's elements. These nonlinearities are caused by constraints on engine power, rotation speed, angle of rotation, cross-sectional area of the valve etc. Such nonlinearities lead to the fact that the control loop is in saturation, when a variable set value is reached, and the loop becomes open, because the change

of the variable at the input of the nonlinear link does not cause changes in the variable at the output of this link. Windup takes place in a system with a regulator that has a nonzero integral coefficient. Windup leads to a deceleration of the transient process, and can also lead to a large overshoot. It is possible to prevent the negative effects of windup using the «anti-windup control» strategy.

Development of the Master's thesis included the following main stages:

- searching, studying and analyzing the literature;
- developing a process control model;
- implementing and analyzing various APC strategies.

Literature review was divided into the following directions: review of literature with a description of rectification columns work principles and with description of their mathematical models; review of literature with description of APC methods.

Before proceeding to the formation of the necessary mathematical models, it was necessary to study information about the processes occurring in the two-column rectification column. To study this information: the book *Technological bases and modeling of oil and gas field preparation processes* by N.V. Usheva, the book *processes and apparatuses of chemical technology* by Yu.I. Dytnerskiy, the work *Technology of gas and condensate treatment* by TM. Bekirova, G.A. Lanchakova were used. In these works, the process of rectification and the design of distillation columns are described in sufficient detail.

During the formulation of the mathematical model of the separator, the work *Basic processes and apparatuses of chemical technology* by Yu.I. Dytnerskiy and the book *Automatic Regulation of Technological Processes* by V. Commissarchik were used. The first work was useful for the formulation of the control system's overall structure, this work helped to create an understanding of signal transformation's features during its sequential passage through the elements of technological process. The second work was used to understand the relationship between the pressure, the valve flow coefficient and the volume flow rate through the valve. Equations presented by V. Commissarchik were used to convert the flow rate into a pressure value.

The study of the processes occurring during the rectification of a multicomponent mixture allowed us to make the conclusion about the complexity of the process being studied, and also to understand that the formation of a mathematical model cannot be attributed to an easy task. For the formation of a mathematical model of a rectification column, the works *The current state of mathematical modeling of distillation columns* by S.A. Azizov, N.S. Ali, Z.A. Iskander-Zade, A.M. Molchanov, and *Modeling of the rectification process control system* by Avazova Yu.Sh., Kadyrova Y.B., Sattarov OU were considered. These works allowed us to form a mathematical model based on the equations of material and energy balance.

After the completion of the mathematical models formation, literature review to study APC methods was started. APC is discussed in Russian and foreign literature. In the article *Advanced Process Control (APC): 10 years in Russia* by V. Dozortsev, E. Itskovich and D. Kneller, the basics and history of APC development in the world and in Russia were considered. In another paper *APC – Advanced Process Control* by V. Dozortsev and D. Kneller it was explained what APC is, what it includes and what it gives, what is the benefit of APC use.

The central link of APC systems is the system with Model Predictive Control (MPC), in order to gain a deeper understanding of this control strategy, the following works were studied: *Model Predictive Control* by E. Komacho and Ts. Bordons ;*An Overview of Model Predictive Control* by K. Holkar and L. Waghmer, *Nonlinear Model Predictive Control of Gravity Separators* by M.F. Dlima, *Control Systems for a Nonstationary Object Based on an MPC-regulator and a PID-controller with Fuzzy Logic* by I. Nadezhdin, A. Goryunov and F. Manenti. To configure the MPC-regulator in MatLab, in addition to the official Matlab users support site and Matlab program's references, the book *Model Predictive Control System Design and Implementation using MatLab* by Luping Wang was used.

To study the anti-windup control strategy (control strategy to prevent the phenomenon of windup) the following papers were studied: *PID-regulators: Implementation Issues* by V. Denisenko, *Anti-windup Load Frequency Controller*

Design for the Multi-Area Power System with Generation Rate Constraint by Chongxin Huang, Dong Yue, Xiangpeng Xie and Jun Xie; *PI- and PID-regulators. Solution of the Windup Problem* by N. Klinichev and E. Margatskaya. The given works allowed understanding the concept of anti-windup control. To implement this control strategy in the Simulink package, the method presented in the work *Anti-windup Control Using a PID-controller* on the Matlab user support site was applied.

The books, manuals and articles reviewed allowed to form an understanding of advanced process control and introduce such management into the process of rectification of a multicomponent mixture. The purpose of this master's thesis is to develop an APC-control system for a distillation column and an analysis of the quality of the APC-control based on direct and integral indicators of the quality of control.

3 Description of the technological scheme

Unstable condensate from separators of gas treatment unit through the pipeline with temperature from 10 to 30 ° C and pressure from 2.3 to 2.4 MPa enters the IDSC switching armature site, where it is distributed into four streams, two streams flow to IDSC, and the other two flows are fed to the degassers.

On the switching valve site, the substandard weathered condensate is returned from vertical steel tanks (VST) to the corresponding IDSC process line for stabilization.

To maintain the pressure in the pipeline of unstable condensate at IDSC, in the event of an accident on one of the process lines, pressure regulator is provided through which excess unstable condensate is discharged into the degasser.

Unstable condensate from switching valve platform is fed into the buffer tank by the level regulator in the tank. Buffer tanks are used to stabilize the supply of raw materials to IDSC, providing stable mode of the process of rectification on the plates of the column of de-ethanization and the stabilization column. In buffer tanks, the

incoming raw materials are divided into three phases: degassing gases, methanol water, and unstable condensate.

Pressure of buffer tank is maintained by control valves. The degassing gases are discharged into the block compressor station of the low-pressure gas.

Unstable condensate from buffer tanks with temperature from 10 to 30 °C and with pressure from 2.3 to 2.5 MPa, through flow regulator which is located in unstable condensate measuring unit, is divided into two streams and fed into the tube space of two heat exchangers connected in series, or in parallel. Part of condensate is sent, bypassing the heat exchangers, with temperature from 20 to 25 °C, to the top of the column as acute irrigation.

Unstable condensate in heat exchangers is heated to 70 °C by return stream of stable condensate passing through the annulus of the heat exchanger.

The heated unstable condensate is fed to the de-ethanized column with pressure from 2.0 to 2.1 MPa and temperature from 60 to 80 °C to one of the power plates No. 10, No. 12, or No. 14, depending on content of light hydrocarbons in feedstock. The choice of the power plate is based on density of condensate: the lower density is fed to higher power plate.

Measurement of temperature of total flow at the inlet to de-ethanization column is carried out by resistance thermometer with output values to the operator's room.

Process of rectification in de-ethanization column is carried out due to the mass and heat exchange on the sieve plates, i.e. separation of high-boiling components from low-boiling components. As a result, low-boiling components rise to the top of column, and high-boiling components are poured through the drain troughs on the plates into bottom of the column.

The temperature of the top de-ethanization column is maintained within the range from 24 to 30°C due to cold irrigation supplied to the 27th plate through control valve installed in the reinforcement block of the de-ethanization column. A portion of

unstable condensate is used as cold irrigation, with temperatures ranging from 10 to 30°C, which come from buffer tanks.

Pressure in the de-ethanization column is maintained by control valves installed in the valve assemblies of the reinforcement block, metering diaphragms are also installed for determine the amount of de-ethanization gases. The de-ethanized gas after valve assemblies is sent to the block compressor station of low-pressure gases.

The de-ethanization column is a vertical cylindrical apparatus with diameter of 1200 mm and height of 26550 mm. The column contains 26 sieve plates and one semi-deaf plate separating the bottom of the column from the mass transfer part, with an overflow channel under the liquid layer in the receiving chamber of column bottom.

In reinforcing block of the de-ethanization column and in column of de-ethanization, control and regulation of the following parameters are provided:

- remote measurement and registration temperature of the de-ethanization gas at the exit from the de-ethanization column;
- remote measurement, registration and automatic regulation temperature of the top column;
- remote measurement and recording pressure of de-ethanized gases at the outlet of the column;
- local pressure measurement with a pressure gauge;
- remote measurement and recording gas consumption of de-ethanization which is fed to the low-pressure gas block compressor station;
- remote measurement temperature at the exit of de-ethanized condensate from selection chamber of de-ethanization column to stabilization column;
- remote measurement, registration, automatic regulation liquid level in the selection chamber;
- remote control regulating valve and automatic regulation of the temperature on the first plate of de-ethanization column, the supply of circulating condensate to cube of the column through the furnace;

- remote measurement and registration temperature in the area of power supply to the de-ethanization column;
- remote measurement and warning of pressure drop between the cube and the top of de-ethanization column;
- remote measurement, registration and warning of the maximum level in the receiving pocket of the de-ethanization column;
- remote measurement, registration, alarm of the minimum level in the receiving chamber of the de-ethanization column and emergency stop of the pumps;
- remote control and signaling of the state of shut-off valves for emergency discharge of the liquid phase from the de-ethanization column into emergency tanks.

There are dual safety valves to protect against overpressure in de-ethanization column.

The necessary heat for carrying out the rectification process in de-ethanization column is supplied by circulating bottom liquid through a P-1 tubular two-flow furnace.

Liquid from the receiving chamber cube of column with temperature from 90 to 120 ° C and with pressure from 2.0 to 2.1 MPa is fed to the pumps, and sent to a tubular double-flow furnace, where is heated to 130 °C.

The vapor-liquid mixture from the P-1 furnace is combined into one stream and, under pressure from 2.0 to 2.4 MPa, is fed into the receiving pocket of bottom part de-ethanization column. Evaporating low-boiling hydrocarbons rise up through holes of sieve first plate, and supply the necessary heat to liquid phase on the plate to maintain rectification process in the column. High-boiling hydrocarbons from the first plate over drain box overflow under layer of liquid which is located in the receiving chamber, bringing additional heat to bottom of the cube.

The liquid phase from receiving pocket flows through the edge also into receiving chamber of cube column and supplies additional heat to layer of boiling liquid. The edge of overflow pocket is located below edge of de-ethanized condensate

withdrawal chamber, which ensures constant level of liquid in receiving chamber of the cube of column and continuous supply of circulating fluid to the pumps.

The de-ethanized condensate from the chamber of de-ethanization column is taken through control valve with temperature from 90 to 120 °C and pressure from 2.0 to 2.2 MPa into 22, 20, 18 or 15 feeding plates of stabilization column, where through the rectification process broad fraction of light hydrocarbons with temperature of 80 °C and pressure of 1.5 MPa. From the bottom of column stable condensate with temperature from 175 to 200 °C is discharged into the annular space of heat exchangers.

Consumption of de-ethanized condensate is measured in Coriolis flowmeters «Micromotion». Flow results are recorded by the control system.

The stabilization column is vertical cylindrical apparatus with diameter of 2000 mm and a height of 25886 mm. The column contains 24 sieve plates and one semi-deaf plate separating in the bottom part of column from mass transfer part, with an overflow channel under liquid layer in receiving chamber of column bottom.

In the reinforcement block of stabilization column and in stabilization column control and regulation of the following parameters is provided:

- local measurement and recording temperature of de-ethanized condensate at the inlet to stabilization column;
- remote measurement, registration and automatic regulation pressure of top column;
- remote measurement, registration and automatic regulation temperature of top column;
- remote measurement and registration temperature in zone of power supply to stabilization column;
- remote measurement, recording and control of irrigation flow;

- remote measurement, registration and automatic regulation temperature of vapor-liquid mixture on the first plate of stabilization column, supplying circulating condensate to bottom of column through the furnace;
- remote measurement, registration and warning alarm of maximum pressure drop between cube and top of stabilization column;
- local measurement temperature of liquid phase in cube of stabilization column and pressure in the column;
- remote measurement, registration, automatic level control in selection chamber of stabilization column;
- remote measurement, registration and warning alarm of minimum level in the selection chamber;
- remote measurement, recording temperature at outlet of stable condensate from the stabilization column to heat exchangers;
- remote measurement, registration, warning alarm of maximum level in the receiving pocket of stabilization column;
- remote measurement, registration, warning alarm of minimum level in the receiving chamber of stabilization column and emergency stop of the pumps;

There are dual relief valves to protect against overpressure in stabilization column.

Necessary heat for carrying out process of rectification in stabilization column is supplied by circulating bottom liquid through the P-2 tube furnace.

The liquid from receiving chamber cube of column with temperature from 170 to 195 °C and pressure from 1.4 to 1.6 MPa enters the reception and it sent to tubular two-flow P-2 furnace, where it heats up to 215 °C.

The vapor-liquid mixture from the P-2 furnace is combined into one stream and under pressure of 1.5 MPa is fed into receiving pocket of the bottom part stabilization column. Evaporating low-boiling hydrocarbons rise up through the holes of sieve first plate, and supply necessary heat to liquid phase above plate to maintain the rectification process in column. High-boiling hydrocarbons from first plate over the drain box

overflow under layer of liquid which located in receiving chamber, bringing additional heat to bottom of cube column.

The liquid phase from receiving pocket flows through edge also into receiving chamber of cube column and supplies additional heat to layer of boiling liquid. The edge of overflow pocket is located below edge of de-ethanized condensate extraction chamber, which ensures constant level of liquid in the receiving chamber of cube column and supply of circulating liquid to the pumps intake.

Stable condensate from extraction chamber of cube stabilization column with temperature from 170 to 195 °C and with pressure of 1.5 MPa is directed through the annular space of heat exchangers, where it is cooled to 80 °C.

From heat exchangers, stable condensate is directed through the unit for measuring flow of stable condensate to radiators of air cooler VX-2, where condensate is cooled to 40 °C and discharged to the stable condensate inventory.

The vapor phase of wide fraction light hydrocarbons from top of stabilization column under its own pressure of 1.5 MPa and temperature from 70 to 80 °C enters VX-1 air coolers, where it is condensed by cooling to 40 °C.

The vapor-liquid phase from VX-1 enters the reflux tank, where it condenses - propane-butane fraction. At exit of the vapor-liquid phase from VX-1 provides measurement, temperature registration.

To maintain pressure, during the period of stabilization column output to mode, the vapor phase is supplied from top of column to reflux tank bypassing VX-1.

The liquid phase of wide fraction light hydrocarbons from reflux tank enters pump intake and flows in two directions: one stream is sent to NGL metering unit, and other is fed as sprinkler to maintain temperature at top of stabilization column through the control valve.

4 MPC-control of MIMO-system "buffer capacity - rectification column"

Within the framework of this master's thesis, the system was investigated using MPC-control. The MPC-controller was used for the MIMO system «buffer capacity - rectification column». Work with the MPC-controller was carried out using MatLab toolbox «Model Predictive Control Toolbox». The developed system with loops of MPC-control is presented in Appendix.

The MPC-controller of Model Predictive Control Toolbox is based on LQR optimization (linear integral quadratic optimization).

The main task of LQR optimization is related to the fact that integral quadratic functionals have a special role among the plurality of control systems and processes characteristics. They have sufficient adequacy for application in practice and characterize the accuracy of control and the energy costs of control devices [30].

The functional for quality of control evaluating in the MPC-controller of the MatLab is a standard functional (37) [31]:

$$J(z_k) = J_y(z_k) + J_u(z_k) + J_{\Delta u}(z_k) + J_c(z_k), \quad (37)$$

where z_k is the solution of the quadratic problem decision;

J_y is the quality index characterizing the correspondence of the output signal value to the set signal value;

J_u is a quality index, applied when the controlled variables' number is larger than a number of control object's outputs and it is necessary to maintain the selected controlled variables at a set level, characterizing the correspondence of the controlled variables to the set values;

$J_{\Delta u}$ is the quality index, used to suppress the motion of controlled variables when small adjustments of controlled variables are preferred;

J_c is a quality index, aimed at an optimization problem solving under conditions of constraints.

These indexes are discussed in more detail on the Mathworks website [31].

MPC-controllers with different setting variants, with different values of the control and prediction horizons, with different weight coefficients were considered in the developed control system. Firstly, different variants of horizons values were analyzed. The values are summarized in Table 5. Transient response diagrams for various settings of MPC-controller are demonstrated on Fig.27 and Fig.28.

Table 5 – Setting the horizons of the MPC-controller

Setting variant number	Control horizon (T_c)	Prediction horizon (T_p)
1	2	10
2	2	20
3	2	50
4	25	50
5	50	100

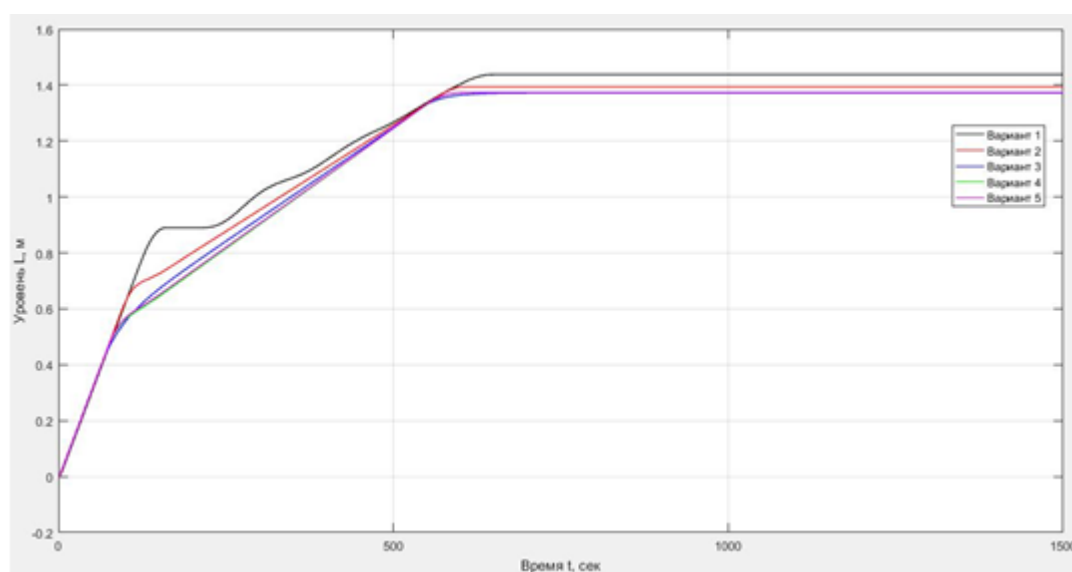


Figure 27 – Transient response for different setting variants of the MPC-controller.

Interface level

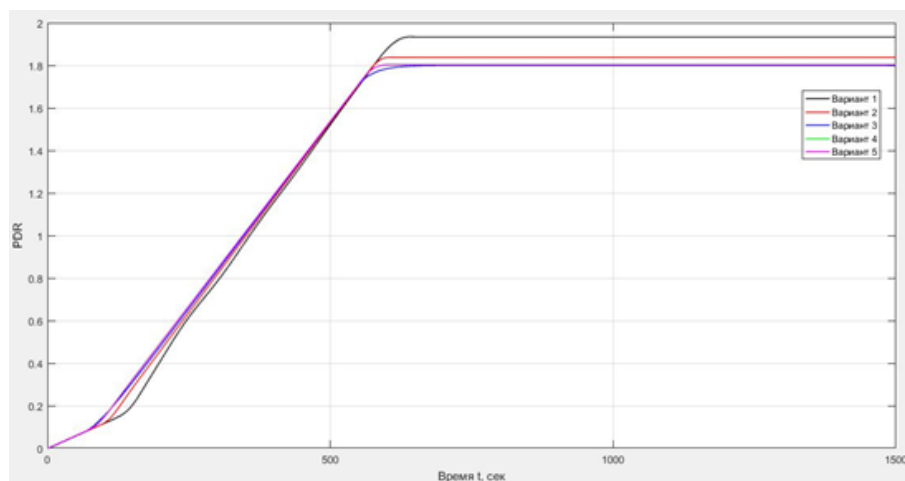


Figure 28 – Transient response for different setting variants of the MPC-controller.

PDR

After the analysis of the transient response diagrams, it was possible to find out that the best direct quality indicators of the level and PDR regulation were given by setting variants 4 and 5, these variants allows us to get the same quality of transient process. With these setting variants, the controlled value goes to the set value, the first and second settings do not allow reaching the set level of the controlled variable. It was decided to use the 4th setting variant. This setting variant was improved (Fig.29, 30) with the help of «Performance tuning» function of MatLab MPC Designer, and with the help of weights adjustment.

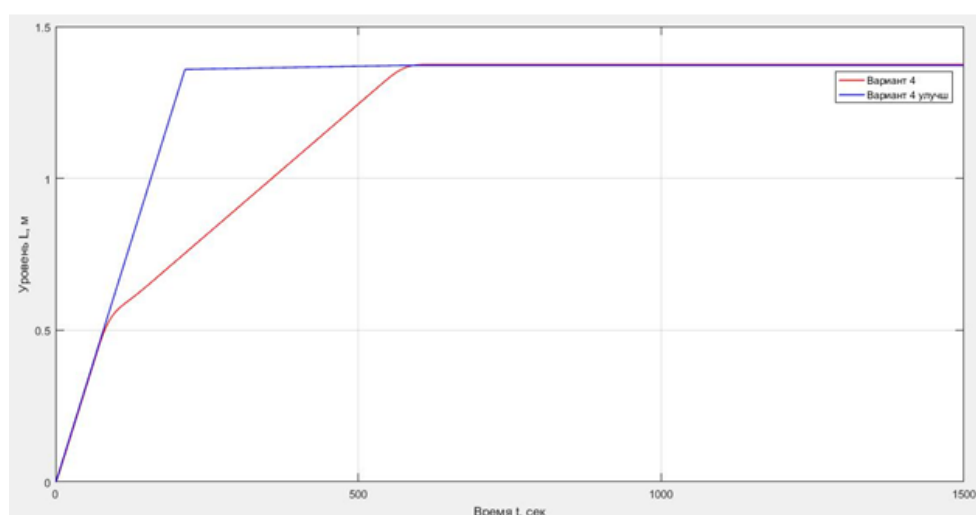


Figure 29 – MPC-controller's improvement. Interface level

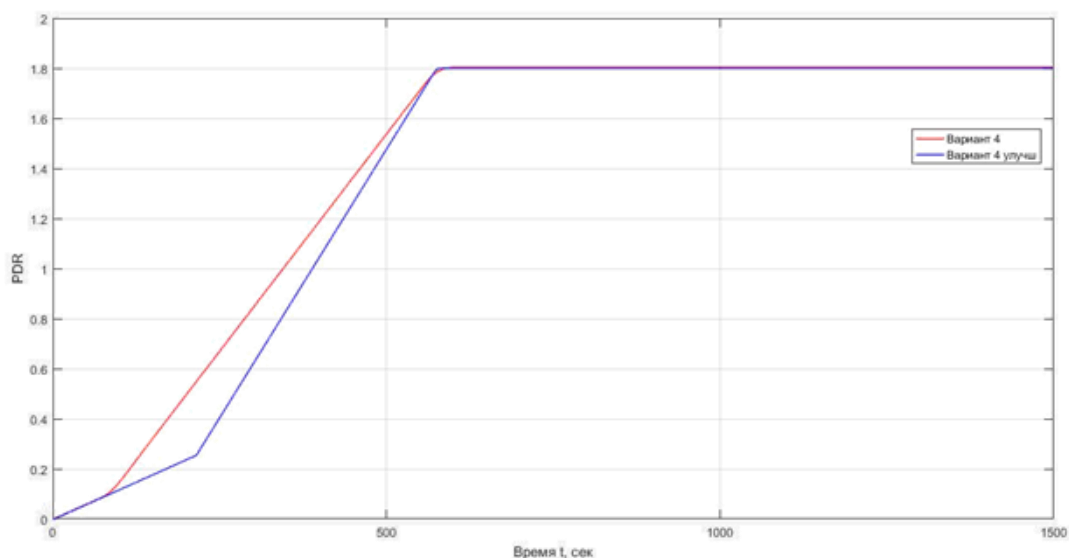


Figure 30 – MPC-controller's improvement. PDR

After the analysis of the transient response diagrams, it was possible to find out that the shortest transient time was obtained with the improved setting variant, which was improved by instrument «Performance tuning» and adjustment of MPC-controller's weights. After the accomplishment of the MPC-controller adjustment, it is necessary to perform an analysis of APC-strategy control quality. It is necessary to compare MPC-control and PID-control. MPC-regulators are recommended for use in conditions of constraints, the output signal of the regulator is the signal in the range 0 - 10 V. The control action cannot go beyond this range. In the system with PID regulators, the outputs of the regulators were also limited to this range. The quality of management was assessed according to the direct quality indicators (transient time and overshoot) and integral criterions: the energy integral criterion, which characterizes the control's energy costs, and the energy integral criterion characterizing the energy consumption by the actuating mechanisms for level regulation. A quadratic integral criterion can be used to estimate both monotonous and oscillating processes. The variant, in which the value of the integral criterion is the least, is considered to be the best. Transient response diagrams for level control and PDR control are presented in Figures 31 – 32.

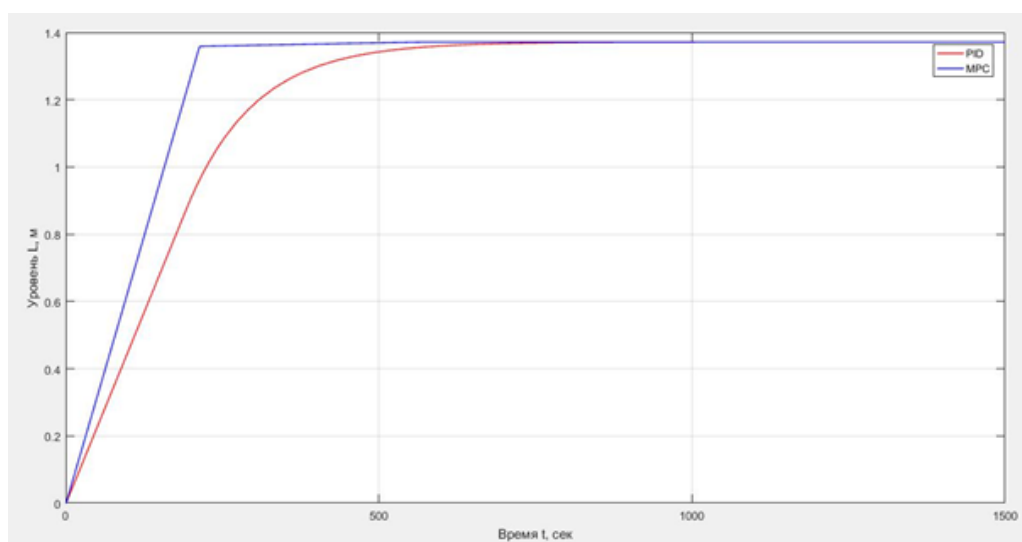


Figure 31 – Transient response diagrams with different types of control. Interface level

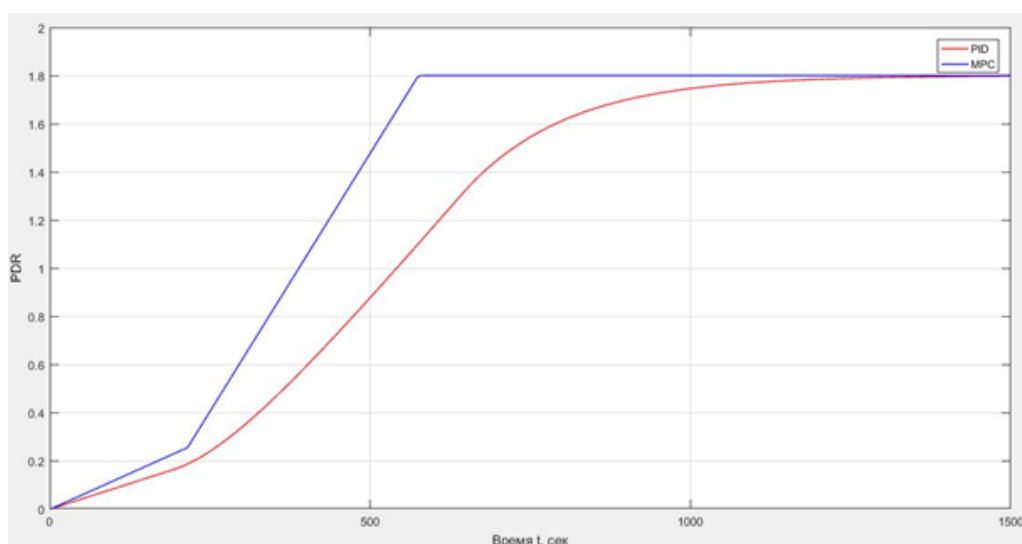


Figure 32 – Transient response diagrams with different types of control. PDR

Direct indicators of the transient response quality and integral criteria are presented in Table 6.

Table 6 – Transient response quality comparison

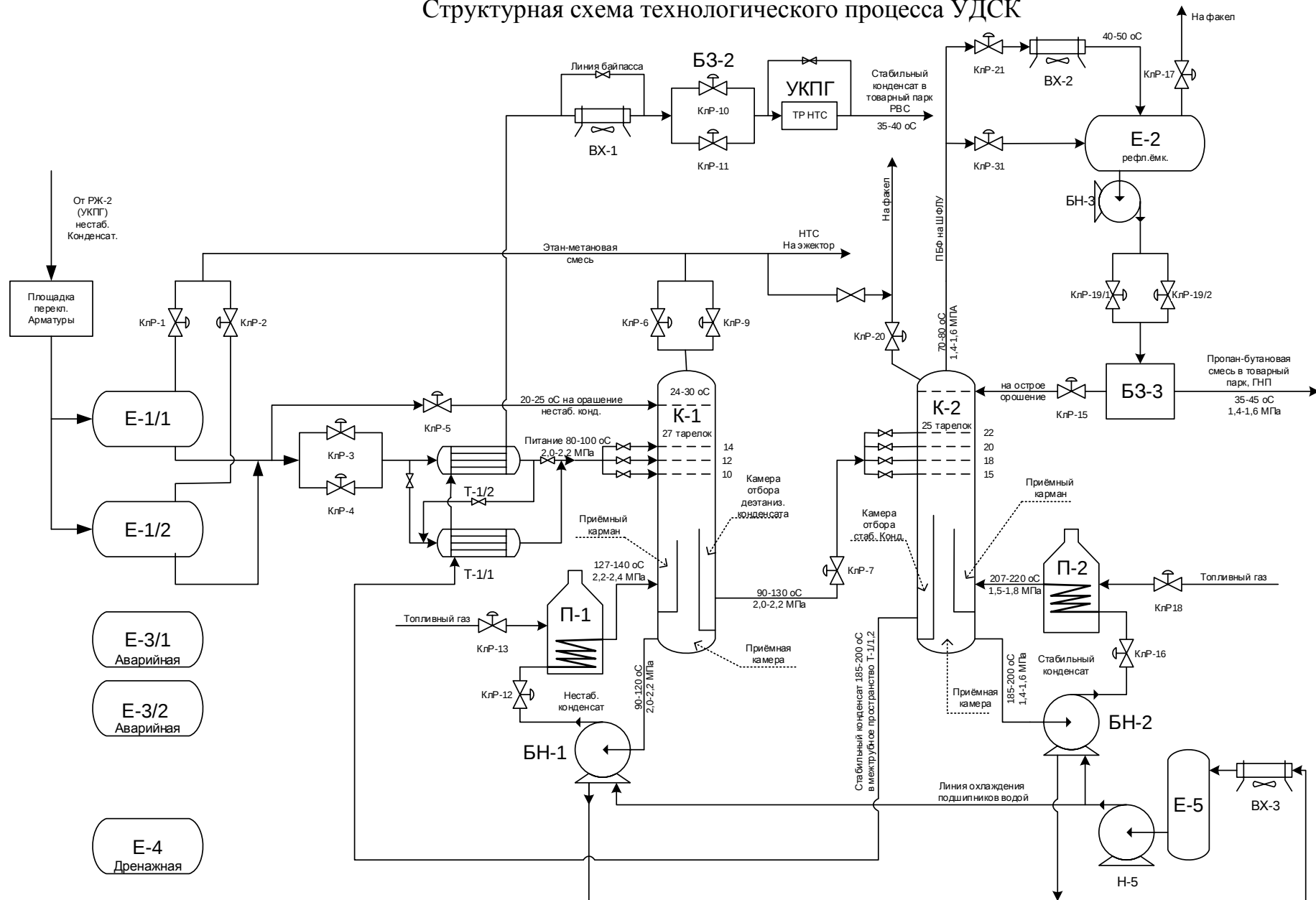
Indicator of the transient response quality	Interface level		PDR	
	PID	MPC	PID	MPC
t_p, c	408,94	205,09	918,32	554,48
$\sigma, \%$	0,00	0,00	0,00	0,00
Indicator characterizing energy consumption for control, $V^2 \cdot s$	24695,21	21306,71	72218,84	57184,35
Indicator characterizing energy consumption by actuating mechanisms $m^2 \cdot s$	2374,31	2551,38		

After the analysis of diagrams and the data in Table 6, it was concluded that the MPC control strategy allows to obtain a higher speed (203.85 seconds faster in the process of level regulation, 363.84 seconds faster in the process of PDR regulation), allows to obtain less energy consumption for control.

Приложение Б

(обязательное)

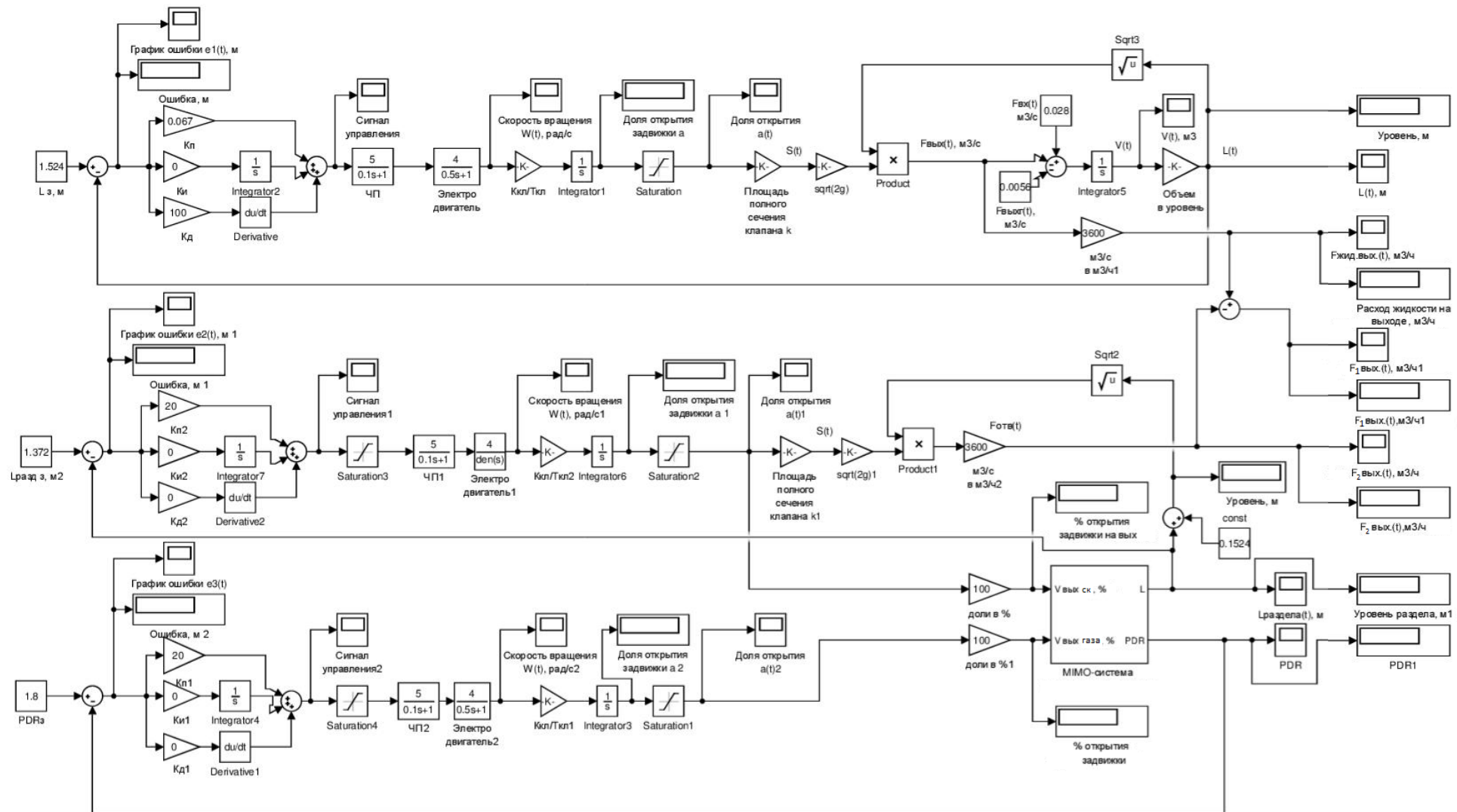
Структурная схема технологического процесса УДСК



Приложение В

(обязательное)

Модель системы управления процессами ректификации с классическим ПИД-управлением



Приложение Г

(обязательное)

Модель системы управления процессами ректификации с усовершенствованным управлением

