

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
Разработка цифрового двойника узла автоматизированной системы управления дожимной насосной станции

УДК 681.51:004.896:622.276.53

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Гуля Владислав Васильевич		02.06.2020

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Каранкевич Андрей Геннадьевич	к.т.н.		02.06.2020

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШПИБ	Конотопский Владимир Юрьевич	к.э.н.		02.06.2020

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШПИБ	Горбенко Михаил Владимирович	к.т.н.		02.06.2020

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Ефимов Семен Викторович	к.т.н.		02.06.2020

Томск – 2020 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ 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>

<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>FEAN</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 ИШИТР

Направление подготовки (специальность) 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ 02.06.20 Ефимов С.В.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ81	Гуля Владислав Васильевич

Тема работы:

Разработка цифрового двойника узла автоматизированной системы управления дожимной насосной станции

Утверждена приказом директора (дата, номер)

13.05.2020, 134-22/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

02.06.2020

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.).

Цель работы – разработка цифрового двойника узла автоматизированной системы управления дожимной насосной станции.

Результатом работы является цифровой двойник трехфазного сепаратора, входящего в состав дожимной насосной станции, который можно интегрировать в реальный производственный процесс.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><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></p>	<p>1. Обзор источников литературы по следующим тематикам:</p> <ul style="list-style-type: none"> – история развития цифровых двойников; – математическое моделирование. <p>2. Изучение технологических процессов и оборудования.</p> <p>2. Аппаратные и программные средства, а также разработка концепции управления.</p> <p>3. Моделирование трехфазного сепаратора в программном обеспечении Matlab и соединение модели с ПЛК для получения данных с датчиков.</p> <p>4. Анализ полученных результатов.</p>
--	--

<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский Владимир Юрьевич
Социальная ответственность	Горбенко Михаил Владимирович
Раздел на иностранном языке	Пичугова Инна Леонидовна

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

Исходные данные и требования к разработке
Разработка цифрового двойника

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	24.02.2020
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Каранкевич Андрей Геннадьевич	к.т.н.		24.02.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Гуля Владислав Васильевич		24.02.2020

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

Школа – ИШИТР

Направление подготовки (специальность) – 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

Период выполнения – (осенний / весенний семестр 2019 /2020 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:	02.06.20
--	----------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
24.05.20	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
04.06.20	Социальная ответственность	20
01.06.20	Раздел на иностранном языке	60

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Каранкевич Андрей Геннадьевич	к.т.н.		24.02.2020

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Ефимов Семен Викторович	к.т.н.		24.02.2020

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ81	Гуля Владислав Васильевич

Школа		Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	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	Использовать действующие ценники и договорные цены на потребленные материальные и информационные ресурсы, а также указанную в МУ величину тарифа на эл. энергию
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	—
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Действующие ставки единого социального налога и НДС, ставка дисконтирования = 0,1 (см. МУ)

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Дать характеристику существующих и потенциальных потребителей (покупателей) результатов ВКР, ожидаемых масштабов их использования
2. Разработка устава научно-технического проекта	Разработать проект такого устава в случае, если для реализации результатов ВКР необходимо создание отдельной организации или отдельного структурного подразделения внутри существующей организации
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Построение плана-графика выполнения ВКР, составление соответствующей сметы затрат, расчет цены результата ВКР.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Оценка экономической эффективности использования результатов ВКР, характеристика других видов эффекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Диаграмма FAST
5. Матрица SWOT
6. График проведения и бюджет НТИ - выполнить
7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ - выполнить
8. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСТН ШПИБ	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		27.05.2020 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Гуля Владислав Васильевич		27.02.2020 г.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ81	Гуля Владислав Васильевич

Школа	ИШИТР	Отделение	ОАР
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Автоматизация технологических процессов и производств

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения.</p>	<p>В работе будет рассмотрена разработка автоматизированной системы управления узла дожимной насосной станции и цифрового двойника данного узла. Целью является повышение эффективности технологического процесса, уменьшение человеческого фактора управления производства и получение дополнительных данных для принятия решений.</p>
<p>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</p>	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>	<p>1.1 Организационные мероприятия по обеспечению безопасности трудящихся за персональным компьютером.</p>
<p>2. Производственная безопасность 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>2.1 Рассмотрены вредные факторы: – отклонение показателей микроклимата; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – повышенный уровень шума; – электромагнитные излучения; – ионизирующее излучение. 2.2 Рассмотрены опасные факторы: – электрический ток.</p>
<p>3. Экологическая безопасность:</p>	<p>3.1 Рассмотрены негативно влияющие на экологию факторы при эксплуатации компьютера. 3.2 Решения по обеспечению экологической безопасности согласно нормативным документам.</p>

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС на объекте: возгорание, взрыв, короткое замыкание. Наиболее распространённым типом ЧС является пожар.
--	--

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Горбенко Михаил Владимирович	к.т.н.		27.05.2020 г

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Гуля Владислав Васильевич		27.05.2020 г

Реферат

Пояснительная записка содержит 108 страниц машинописного текста, 13 таблиц, 38 рисунков, список использованных источников из 31 наименования и одного приложения.

Ключевые слова: АСУ ТП, SCADA, дожимная насосная станция, трехфазный сепаратор, цифровой двойник, MATLAB, TIA PORTAL, ПИД-регулятор.

Цель работы: разработать цифровой двойник трехфазного сепаратора, входящего в состав дожимной насосной станции, а также обеспечить возможность его интеграции в реальный технологический процесс.

Объект исследования – трехфазный сепаратор НГСВ 1.6-3400, входящий в состав дожимной насосной станции.

Для выполнения работы использовались программные продукты: MS Excel, MS Word, OPC-сервер «Process Simulator», TIA Portal, Matlab Simulink.

Определения и сокращения

В данной работе используются следующие термины, аббревиатуры и сокращения:

АСУ ТП – Автоматизированная система управления технологическим процессом.

ДНС – Дожимная насосная станция.

ПЛК – Программируемый логический контроллер. Разновидность электронной вычислительной машины, используемой для автоматизации технологических процессов.

ПО – Программное обеспечение. Программа или множество программ, используемых для управления компьютером.

Цифровой двойник – программный аналог физического устройства, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях воздействий помех и окружающей среды.

Узел автоматизированной системы управления – объект автоматизированной системы управления, а также датчики и исполнительные механизмы, осуществляющие управление данным объектом.

SCADA - Supervisory control and data acquisition.

OPC - Open platform communications.

Оглавление

Введение.....	15
1 Обзор источников литературы по тематике исследования	16
1.1 Определение цифрового двойника.....	16
1.2 Определение математической модели	19
1.3 Основные этапы математического моделирования.....	19
1.4 Классификация математических моделей.....	20
2 Исходные данные и требования к разработке.....	21
2.1 Описание технологического процесса дожимной насосной станции	21
2.2 Основные цели и задачи цифрового двойника	22
2.3 Описание технологического процесса выбранного узла.....	23
2.4 Требования к математическому обеспечению.....	25
2.5 Требования к информационному обеспечению.....	25
2.6 Требования к программной документации	25
3 Разработка цифрового двойника	27
3.1 Этапы разработки.....	27
3.2 Выбор аппаратных и программных средств	28
3.2.1 Программируемый логический контроллер.....	28
3.2.2 Технология OPC	31
3.2.3 Программный пакет Matlab.....	32
3.2.4 Среда разработки SIEMENS TIA PORTAL.....	34
3.3 Создание схемы информационных потоков	35
3.4 Разработка математической модели	37
3.4.1 Построение контуров регулирования	37
3.4.1.1 Контур регулирования воды	37

3.4.1.2	Контур регулирования нефти	43
3.4.1.3	Контур регулирования давления	44
3.4.2	Объединение контуров в полную математическую модель.....	46
3.5	Организация связи между математической моделью и ПЛК.....	50
3.5.1	Настройка TIA Portal	50
3.5.2	Настройка Process Simulator.....	52
3.5.3	Настройка Simulink	53
3.5.4	Разработка экранных форм	57
3.5.5	Применение цифрового двойника для модернизации системы управления	58
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	62
4.1	Организация и планирование работ	62
4.1.1	Продолжительность этапов работ	63
4.2	Расчет сметы затрат на выполнение проекта	69
4.2.1	Расчет затрат на материалы	69
4.2.2	Расчет заработной платы	70
4.2.3	Расчет затрат на социальный налог	71
4.2.4	Расчет затрат на электроэнергию	71
4.2.5	Расчет амортизационных расходов	72
4.2.6	Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных документов.....	73
4.2.7	Расчет прочих расходов.....	73
4.2.8	Расчет общей себестоимости разработки	73
4.2.9	Расчет прибыли	74
4.2.10	Расчет НДС	74

4.2.11 Цена разработки НИР	74
4.3 Оценка экономической эффективности проекта	75
5 Социальная ответственность	76
5.1 Описание рабочего места	77
5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	78
5.3 Производственная безопасность	80
5.4 Анализ опасных и вредных факторов.....	81
5.4.1 Повышенный уровень шума	81
5.4.2 Электробезопасность	81
5.4.3 Отклонение показателей микроклимата рабочей зоны	82
5.4.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	83
5.4.5 Электромагнитные излучения	86
5.4.6 Ионизирующие излучения	86
5.5 Экологическая безопасность.....	88
5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	89
Заключение	92
Список литературы	93
Приложение А (обязательное) Development of a digital twin of the unit of an automated control system of a booster pump station	96

Введение

Актуальность данной работы состоит в наличии спроса на модели, которое могут довольно точно описать поведение системы. Это в свою очередь позволяет осуществить ее предварительную настройку и уже на ранних этапах проектирования выявить возможные ошибки и проблемы.

Целью выпускной квалификационной работы является увеличение экономической эффективности производства, а также снижение аварийности. Для этого был разработан цифровой двойник узла автоматизированной системы управления дожимной насосной станции, а именно трехфазного сепаратора.

Чтобы достичь выбранную цель в ходе исследования были решены следующие задачи:

1. Проведен обзор литературных источников по тематике создания математических моделей;
2. Проведен анализ возможных решений по настройке связи между ПЛК и программным пакетом Matlab;
3. Реализована логика управления системой на языке LD;
4. Создана математическая модель трехфазного сепаратора;
5. Создан графический интерфейс для работы оператора.

В данной работе объектом является трехфазный сепаратор, входящий в состав дожимной насосной станции.

Предметом являются различные способы математического моделирования, используемые при помощи средств автоматизации Siemens и программного пакета Matlab.

1 Обзор источников литературы по тематике исследования

1.1 Определение цифрового двойника

Цифровой Двойник (Digital Twin) – это виртуальный, программный аналог физического изделия, группы изделий или процесса, который моделирует их внутренние процессы, различные технические характеристики, а также реальное поведение при воздействии окружающей среды и внешних помех. Его работа заключается в сборе цифровой информации и в ее повторном использовании. Работа цифрового двойника не ограничивается в сборе и использовании данных, которые были получены на стадии проектирования и сборки готового изделия. Он продолжает обрабатывать данные в течении всего рабочего процесса модели [1].

Так как цифровой двойник основывается на реальную модель, значит все показания двойник должен брать с реальных датчиков. Следовательно, используя эти показания, можно задать входные возмущения на двойника. Учитывая это можно проводить сравнение показаний реальных датчиков с датчиками цифрового двойника и основываясь на данных показаниях можно делать выводы о разногласиях, и о причинах их возникновения.

Цифровой двойник содержит [1]:

- цифровую модель;
- характеристики материала;
- руководства и данные по проведению технического обслуживания продукта;
- информацию о влиянии внешних факторов.

Максимально эффективным считается применение цифровых двойников для такой продукции, которая соответствует следующим критериям:

- продукция сопровождается специализированным сервисом, таким как контроль состояния или мониторинг, а также техническим сопровождением;
- большие сроки жизненного цикла (5 – 70 лет);
- оборудование устанавливается в большом количестве;

- множество различных вариантов условий эксплуатации;
- обслуживание изделия является труднодоступным процессом.

Под данные критерии попадает продукция из многих промышленных отраслей. Это может быть энергетическая отрасль, авиационные системы, различное сложное промышленное оборудование, автотранспортные и железнодорожные системы, а также медицинское оборудование [2].

Существует другая интерпретация цифрового двойника. Она гласит, что цифровой двойник – это виртуальная модель, описывающая на макроуровне какой-либо реальный физический объект, либо же служащая прототипом проектируемого объекта. В таком случае любая информация, которую можно получить во время тестирования физического объекта, так же может быть получена при тестировании цифрового двойника этого объекта.

На данный момент чаще всего используют классификацию, которая разделяет цифровые двойники на три типа:

- цифровые двойники-прототипы (Digital Twin Prototype, далее DTP);
- цифровые двойники-экземпляры (Digital Twin Instance, далее DTI);
- агрегированные цифровые двойники (Digital Twin Aggregate, далее DTA).

DTP-двойники используются при проектировании какого-либо объекта и являются прототипом этого объекта. Информация, содержащаяся в этих двойниках, необходима для того, чтобы описать и создать физическую версию объекта и включает в себя требования к производству, аннотированную трехмерную модель, спецификации на процессы, услуги, материалы, а также утилизацию [3].

DTI-двойник является копией какого-либо конкретного реально существующего объекта. Он в полной мере описывает данный объект и связан с ним в течении всего срока службы этого объекта. В таких двойниках обычно содержится трехмерная модель объекта, включающая в себя общие размеры и допуски. Также приведена спецификация на материалы, которая содержит

информация о текущих и прошлых компонентах, и спецификация на процессы, где описаны различные операции, выполненные при создании данного объекта. Любые проведенные на объекте тесты, записи об обслуживании объекта, показания мониторинга и измерения с датчиков тоже находятся в цифровом двойнике.

DTA-двойники являются вычислительной системой, имеющей доступ ко всем экземплярам цифрового двойника, которая может опрашивать их в случайном и плановом режиме.

Симбиоз цифровых двойников и интернета вещей является своего рода толчком к развитию этих технологий. В цифровые двойники поступают реальные данные с датчиков, которые осуществляют постоянный мониторинг объектов, а интернет вещей позволяет собирать и анализировать данные, собираемые с различных сенсоров, а также делает этот процесс более экономичным и эффективным [3].

Если коротко проследить историю развития технологии цифровых двойников, то можно сделать вывод, что начиная с того момента, когда человек стал создавать материальные объекты, он пользовался виртуальными моделями, являющимися двойниками этих объектов. Первые двойники были воображениями человека, затем они перенеслись на бумагу, после на компьютеры, а в наше время и в облаке, с использованием умных датчиков, интернета вещей и искусственным интеллектом. В концепцию создания цифровых двойников постоянно добавлялись какие-либо новые технологии, а также методы моделирования, прогнозирования, анализа и обучения. Этот процесс будет продолжаться и в будущем с появлением новых технологий. Нельзя поспорить с тем, что цифровые двойники стали полезным и в своем роде незаменимым инструментом, позволяющим улучшать производственный процесс, экономить финансы, а также обеспечивать защиту от аварий и повышать безопасность производства.

1.2 Определение математической модели

Эксперимент, в котором используются реальные объекты модели не всегда является эффективным в плане экономики, в данной ситуации приходит на помощь математическое моделирование, которое позволяет провести эксперимент используя цифровой двойник. Иными словами, реальный эксперимент не позволяет быстро и без лишних затрат провести замену оборудования, для проверки теории. Особенно это влияет на медицинскую область, невозможно поставить в реальности эксперимент по влиянию какой-либо болезни или влиянию распространения ядерного взрыва [4].

1.3 Основные этапы математического моделирования

1) Построение модели

На данном этапе создается некая практическая модель, описывающая поведение системы, в нее включены все характеристики процесса, явления и т.д. Далее при выявлении неких зависимостей строится математическая модель. Данный этап является самым сложным.

2) Решение математической задачи, к которой привела построенная модель

На данном этапе осуществляется разработка алгоритмов и методов для решения задачи на ЭВМ, которые могут обеспечить поиск результата с требуемой точностью и за необходимое время.

3) Интерпретация следствий, которые были получены из математической модели.

Следствия, которые были выведены из модели на математическом языке, на данном этапе интерпретируются на том языке, который был принят в данной области.

4) Проверка адекватности разработанной модели.

На данном этапе осуществляется сравнение полученных результатов с результатами реального эксперимента, либо с результатами теоретического эксперимента.

5) Модификация модели

При модификации модели происходит усовершенствование модели, если требуется сделать ее более приближенной к действительности, либо ее упрощение, в случае необходимости прийти к практически приемлемому решению.

1.4 Классификация математических моделей

Математические модели можно разделить на функциональные и структурные [5].

В функциональной модели все величины, которые характеризуют объект, выражены количественно, причем некоторые из этих величин рассматривают в качестве независимых переменных, а некоторые в качестве функций от них. Математическая модель чаще всего представлена системой разно типовых уравнений, которые устанавливают количественные зависимости между выделенными величинами.

В структурной модели описывается структура сложного объекта, который состоит из нескольких отдельных частей, связанных между собой. Связи между этими частями не поддаются количественному измерению. При построении структурных моделей используется теория графов.

Также математические модели можно разделить по характеру исходных данных и результатов предсказания. Модели, которые дают однозначные предсказания, называются детерминистическими моделями. А модели, основанные на статистической информации и предсказания которых сбываются с некоторой вероятностью, называются вероятностно-статистическими моделями.

2 Исходные данные и требования к разработке

2.1 Описание технологического процесса дожимной насосной станции

В случае недостаточной пластовой энергии в залежах, для транспортировки нефтегазовой смеси и воды на центральный пункт подготовки нефти (ЦППН) или установки предварительного сброса воды (УПСВ) используют дожимные насосные станции (ДНС). На ДНС происходит предварительная сепарация нефти и газа для того чтобы можно было произвести бескомпрессорную транспортировку газа на газоперерабатывающий завод (ГПЗ). С помощью насосов нефти сообщается дополнительный напор и осуществляется ее транспортировка через системы сбора и подготовки на высоконапорные участки. Также проводится предварительный сбор и подготовка пластовой воды, и ее транспортировка на кустовую насосную станцию (КНС).

Схема дожимной насосной станции представлена на рисунке 1.

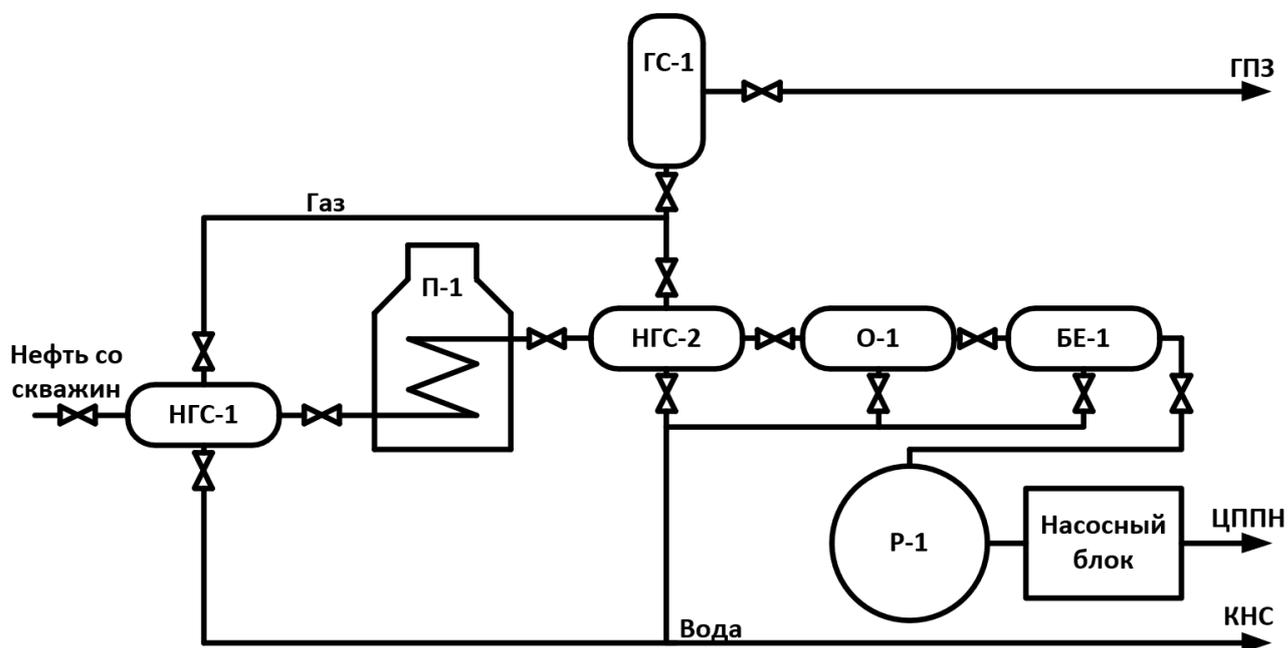


Рисунок 1 – Технологическая схема ДНС

Водогазонефтяная смесь с кустов месторождения поступает в трехфазные сепараторы, где происходит первая ступень сепарации. Далее газ, отделенный в

трехфазном сепараторе, поступает в газосепаратор и после этого отправляется на газоперерабатывающий завод [6].

Нефть, полученная после первой ступени сепарация, подогревается в печи и поступает в следующие сепараторы, где происходит вторая ступень сепарация, горячая сепарация. После этого этапа, будучи окончательно разгазированной, нефть уходит в отстойники.

После отстойников, где происходит отделение воды, нефть поступает в буферные емкости, где окончательно обезвоживается и через узел учета нефти поступает на насосный блок и после на центральный пункт подготовки нефти.

Вода, полученная при сепарации и обезвоживании нефти, отправляется в кустовую насосную станцию для закачки в пласт.

2.2 Основные цели и задачи цифрового двойника

В данной работе рассматривается создание цифрового двойника для узла автоматизированной системы дожимной насосной станции, управляющим трехфазным сепаратором, в котором происходит первая ступень сепарации нефтяной эмульсии [7].

Он включает в себя:

- трехфазный сепаратор;
- расходомеры;
- сигнализаторы уровня;
- датчики давления;
- уровнемеры;
- датчик температуры;
- исполнительные механизмы.

Цифровой двойник данного узла должен обеспечивать:

- имитацию работы технологической линии;
- тестирование режимов работы производственного процесса;
- локализацию неисправностей.

Основные цели создания цифрового двойника:

- сократить трудовые и финансовые затраты на модернизацию технологического процесса;
- отслеживать тенденции выхода из строя технологического оборудования;
- накапливать информацию о технологическом процессе;
- повысить эффективность работы производства.

2.3 Описание технологического процесса выбранного узла

На рисунке 2 представлена функциональная схема автоматизации используемого трехфазного сепаратора НГСВ 1,6 – 3400 [8].

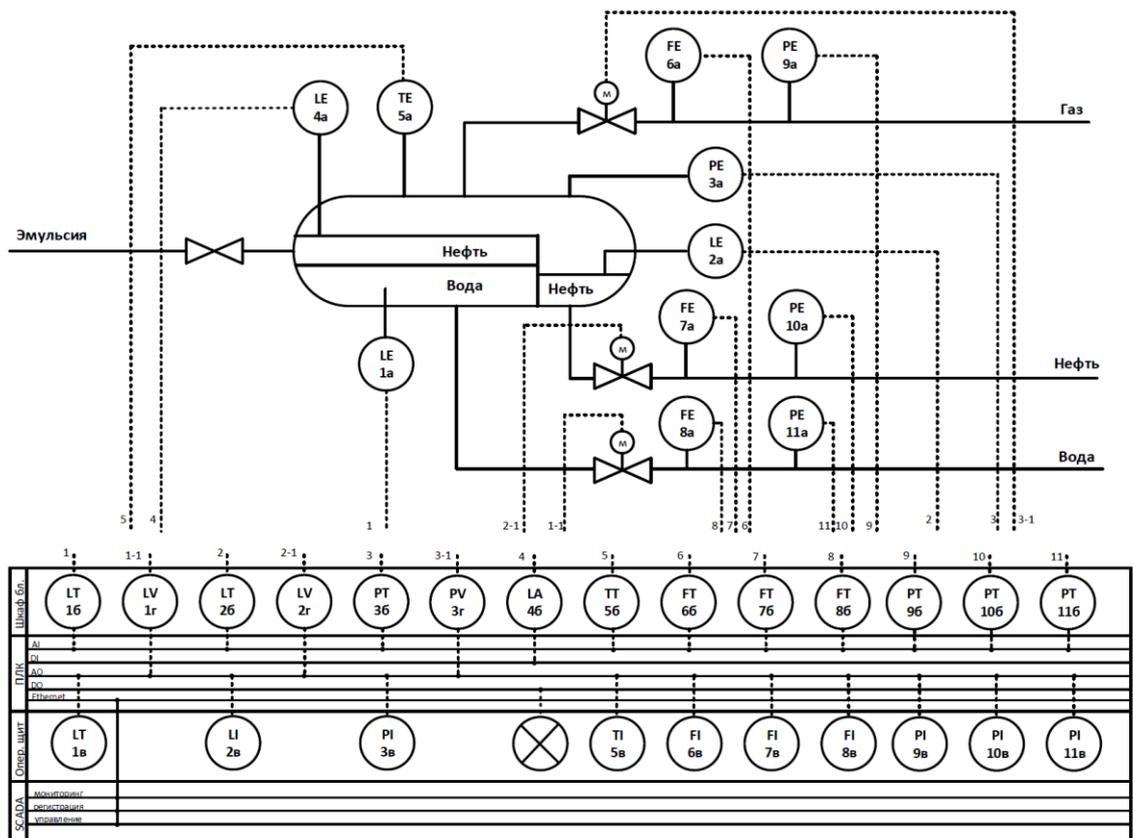


Рисунок 2 – ФСА трехфазного сепаратора

Газожидкостная смесь вводится в сепаратор через штуцер, оборудованный устройством приёма газожидкостной смеси циклонного типа, в котором происходит выделение свободного газа. Отделившийся газ собирается в верхней части аппарата, проходит устройство улавливания капельной жидкости и выводится через штуцер выхода газа. Сепаратор разделен перегородками на две полости. В первой полости нефтяная эмульсия

обезвоживается. Далее располагается нефтесборник (вторая полость) для очищенной нефти. Отделившаяся вода скапливается в нижней части первой полости, откуда сбрасывается через штуцер выхода воды.

Уровень нефти в сепараторе определяется уровнемером (ДУУ2М) и поддерживается регулирующим клапаном, расположенным на выкидной линии со стороны теплообменника [9].

Уровень воды определяется уровнемером (ДУУ2М) и поддерживается регулирующим клапаном, установленным на выкидной линии воды к установке подготовки пластовой воды.

Давление газа в аппарате определяется датчиком давления (Метран-150CG) и поддерживается регулирующим клапаном, установленным на выходной линии, подающей газ на газовую компрессорную станцию высокого давления [10].

Температура в сепараторе контролируется датчиком температуры (WIKА TR10-F). Предусмотрен сигнал тревоги по низкой температуре для предупреждения о возможности отложений парафинов, замерзания и образования гидратов [11].

Расход отходящего газа и расход нефти из сепаратора контролируются электромагнитными расходомерами (Rosemount 8700) [12].

Параметры трехфазного сепаратора указаны в таблице 1.

Таблица 1 - НГСВ 1,6 – 3400

Наименование параметра	Значение
Полный объем сепаратора, м ³	100
Объем цилиндрической части, мм	86,6
Объем сферических днищ, мм	13,4
Высота сепаратора, мм	3400
Производительность по нефти и воде, м ³ /ч	560
Производительность по газу, м ³ /ч	30000
Рабочее давление (не более), МПа	1,3

2.4 Требования к математическому обеспечению

Математическое обеспечение должно представлять собой совокупность математических методов, моделей и алгоритмов обработки информации, используемых при создании и эксплуатации системы, и позволять реализовывать различные компоненты системы средствами единого математического аппарата.

Реализация функций первичной обработки сигналов должна осуществляться с использованием стандартных алгоритмов масштабирования, сглаживания, фильтрации и линеаризации. Реализация функций автоматического регулирования должна осуществляться с помощью стандартного алгоритма ПИД-регулирования [13].

2.5 Требования к информационному обеспечению

Информационное обеспечение – набор данных, сигналов (входных и выходных), достаточный как по объему, так и по содержанию, для обеспечения стабильной работы всех автоматизированных функций системы, оперативной и достоверной оценки состояния оборудования. Одной из основных задач при разработке информационного обеспечения является организация человеко-машинного интерфейса [14].

Информационное обеспечение подразумевает собой:

- порядок и способ обмена информацией между компонентами системы;
- входная/выходная аналоговая и дискретная информация;
- формы различных документов;
- систему, организующую базу данных в реальном времени и архивных данных.

2.6 Требования к программной документации

В комплект программной документации программно-инструментального средства должно входить [15]:

- техническое задание;

- пояснительная записка;
- приложения.

Документация должна быть представлена в печатном и в электронном виде в формате Microsoft Word.

3 Разработка цифрового двойника

3.1 Этапы разработки

Для того чтобы начать разработку цифрового двойника необходимо определиться с этапами разработки.

Первым этапом является изучение технологического процесса и используемого оборудования. Это понадобится для того, чтобы сделать модель более точной и приближенной к реальной системе.

На втором этапе необходимо осуществить выбор программных средств, которые будут использоваться в процессе разработки цифрового двойника. Во-первых, необходима среда для математического моделирования, которая позволяет создавать динамические модели и работать с ними в режиме реального времени. Во-вторых, нужно выбрать среду разработки программного обеспечения для ПЛК, которая поддерживает работу с имеющимся оборудованием. И наконец требуется выбрать механизм обмена данными между средой для математического моделирования и средой разработки ПО, позволяющий обеспечивать совместную работу средств автоматизации, которые функционируют на разных аппаратных платформах, в разных промышленных сетях и производится разными фирмами [16].

На третьем этапе разрабатывается схема информационных потоков, которая показывает направление потоков информации, ее объем, и то, в каком виде она представлена. А также используемые при ее передаче интерфейсы и протоколы.

Четвертый этап — это создание математической модели. Она должна отображать заданные свойства объекта с погрешностью, не превышающей заданную. Иметь параметры, близкие к параметрам реального объекта, быть универсальной, а также экономичной. При создании математической модели сначала разрабатываются отдельные контуры системы, а затем объединяются и модель тестируется для различных режимов работы.

На пятом этапе необходимо организовать связь между созданной моделью и верхним уровнем АСУ ТП.

3.2 Выбор аппаратных и программных средств

Для осуществления возможности моделирования необходимо подобрать элементную базу: персональный компьютер с операционной системой Windows, программируемый логический контроллер. Также в этой главе будет описано осуществление связи между PLC и программным пакетом Matlab, средствами протокола OPC.

Так как система позволяет провести моделирование с использованием любого оборудования, выбор определенных клапанов и датчиков не обязателен. При моделировании характеристики выбранного оборудования заносятся в параметры соответствующих блоков.

3.2.1 Программируемый логический контроллер

В современном производстве на всех уровнях присутствует автоматизация систем управления. Для внедрения в производство АСУ ТП используются специальные программируемые микроконтроллеры (PLC), такие как Siemens Simatic S7-1200 (рисунок 3). Они рассчитаны на выполнение конкретных задач и ориентированы на работу в реальном времени.



Рисунок 3 – Siemens S7-1200

Программируемые контроллеры S7-1200 имеют компактные пластиковые корпуса со степенью защиты IP20, могут монтироваться на стандартную 35 мм профильную шину DIN или на монтажную плату и работают в диапазоне температур от 0 до +50 °С. Они способны обслуживать от 10 до 284 дискретных и от 2 до 51 аналогового канала ввода-вывода [17].

К центральному процессору (CPU) программируемого контроллера S7-1200 могут быть подключены коммуникационные модули, сигнальные модули и сигнальные платы ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов, технологические модули. Совместно с ними используются 4-канальный коммутатор Industrial Ethernet (CSM 1277) и модуль блока питания (PM 1207).

Центральный процессор обладает высокой производительностью и обеспечивает поддержку широкого набора функций:

- Программирование на языках LAD (Ladder Diagram), FBD (Function Block Diagram) и SCL (Structured Control Language), исчерпывающий набор команд.
- Высокое быстродействие, время выполнения логической операции не превышает 0.1 мкс.
- Встроенная загружаемая память объемом до 4 Мбайт, расширяемая картой памяти емкостью до 4 Гбайт.
- Рабочая память емкостью до 150 Кбайт.
- Энергонезависимая память емкостью 10 Кбайт для необслуживаемого сохранения данных при перебоях в питании контроллера.
- Встроенные дискретные входы универсального назначения, позволяющие вводить потенциальные или импульсные сигналы.
- Встроенные аппаратные часы реального времени с запасом хода при перебоях в питании 20 дней.
- Встроенные импульсные выходы с частотой следования импульсов до 1 МГц (только в CPU с транзисторными выходами).
- Поддержка функций ПИД регулирования.
- Поддержка функций управления перемещением в соответствии с требованиями стандарта PLCopen.
- Поддержка функций обновления операционной системы. Встроенный WEB – сервер, позволяющий выполнять дистанционную диагностику программируемых контроллеров с использованием стандартного Web-браузера.
- Коммуникационные модули CM 12xx и CP 12xx для подключения контроллера к сети Industrial Ethernet, PROFIBUS DP, обмена данными через последовательные каналы связи, мобильную сеть GSM, каналы связи систем телеуправления

3.2.2 Технология OPC

OPC – это набор открытых протоколов, регламентирующих взаимодействие между собой различных объектов автоматизации, таких как SCADA-системы. OPC UA (Unified Architecture) – это один из таких протоколов, он обеспечивает обмен данными с устройствами или программными компонентами [18].

OPC-сервер – программа, осуществляющая взаимосвязь между клиентом и сервером, которая получает данные используя внутренний формат клиента, с последующим преобразованием в формат сервера. По своей сути OPC-сервер – это некоторая универсальная модель физического оборудования, обеспечивающий взаимодействие с любым OPC-клиентом.

Программа или устройство, которая или которое соответственно принимает различные данные от сервера является OPC - клиентом.

Для обеспечения интеграции оборудования в верхний уровень АСУ ТП, а именно в систему диспетчеризации достаточно поддержки SCADA всех существующих протоколов передачи данных, используемых данным оборудованием.

Существует большое разнообразие производителей и их продукции, поэтому для применения SCADA необходимо использовать стандартные протоколы обмена данными (Modbus, LonTalk, Profibus), но это приводит к увеличению себестоимости АСУ ТП. Кроме того, уже на существующих объектах, где уже установлена SCADA существует вероятность замены элементов, которое может использовать новый протокол обмена данными, который не поддерживается данным решением. Для решения этой проблемы было предложено использование стандартного подхода к обмену данными, что и выполняет OPC сервер [19].

Суть OPC сервера лежит в том, что производитель оборудования предоставляет пользователю специальное программное обеспечение, которое реализует закрытый протокол обмена данными с отдельным оборудованием и

передает данные в унифицированном виде. Технология OPC (рисунок 4) построена по клиент-серверному принципу.

В данной работе используется программное обеспечение Process Simulator, которое при передаче данных с TIA Portal является сервером, а при передаче данных с Matlab Simulink клиентом.

Так как подсистемы готовятся раньше конечной системы и все интерфейсы, используемые в работе, фиксируются также заранее, OPC выходит на новый уровень использования, ведь все вышеупомянутое является главной особенностью OPC технологии.

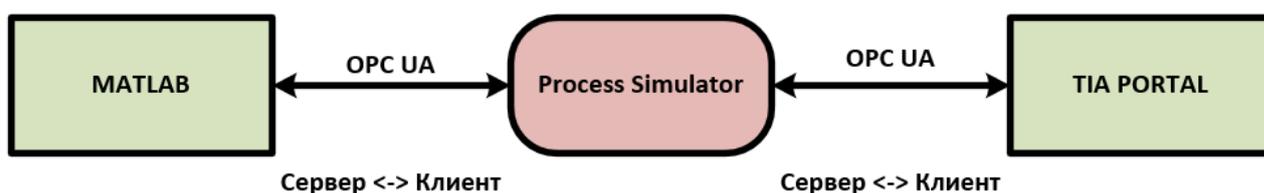


Рисунок 4 – Структурная схема связи программных комплексов по OPC

Технология OPC позволяет применять сетевую интеграцию, поддержку, и другие сервисы, которые предоставляются операционной системой. Технология OPC двоякая, она одновременно и мощна, но и сложна в использовании.

3.2.3 Программный пакет Matlab

В рамках текущей работы нам необходимо выполнять математическое моделирование, для этого потребуется мощный инструмент, который позволит выполнять моделирование в реальном времени, и который имеет возможность работать с технологией OPC. В качестве такого программного пакета был выбран Matlab и его пакет Simulink [20].

Matlab – это высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, численных расчетов и визуализации результатов (рисунок 5).

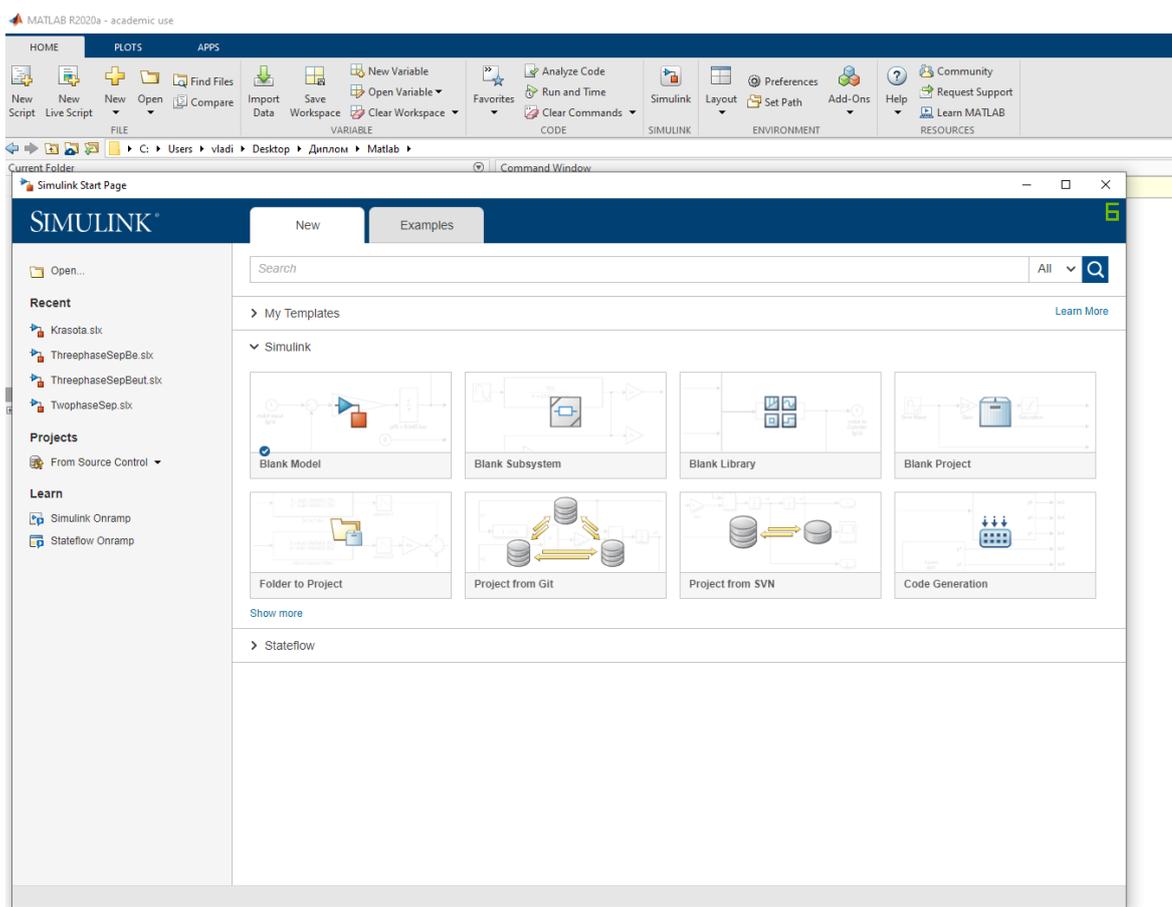


Рисунок 5 - Главное окно программного пакета Matlab Simulink

С помощью программного пакета Matlab можно проводить анализ данных, программировать, а также проектировать и моделировать. Для создания математических моделей. В данной работе будет использован пакет Matlab Simulink – графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов строить динамические модели, включая дискретные, нелинейные и разрывные системы, с помощью которых будет смоделирован трехфазный сепаратор.

Для связи Matlab с Process Simulator необходимо обратиться к библиотеке OPC Toolbox, которая имеет в арсенале набор интерфейсов для работы с OPC - сервером. Все вышеупомянутое позволяет наладить взаимосвязь между программным обеспечением Matlab и внешними аппаратными средствами, которые обмениваются с ним данными. Таким образом был выбран программный пакет, который отвечает необходимым требованиям для осуществления математического моделирования [21].

3.2.4 Среда разработки SIEMENS TIA PORTAL

Основной средой разработки программного обеспечения для ПЛК компании Siemens является TIA Portal (рисунок 6). Именно этот программный пакет будет использоваться для написания управляющей программы для организации передачи данных между реальными датчиками и математической модели, а также для управления цифровым двойником. Данное ПО может использоваться как OPC-клиент и подключаться к Process Simulator.

TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) — интегрированная среда разработки программного обеспечения систем автоматизации технологических процессов от уровня приводов и контроллеров до уровня человеко-машинного интерфейса.» Она является воплощением концепции комплексной автоматизации (англ. Totally Integrated Automation) и эволюционным развитием семейства систем автоматизации Simatic компании Siemens AG [22].

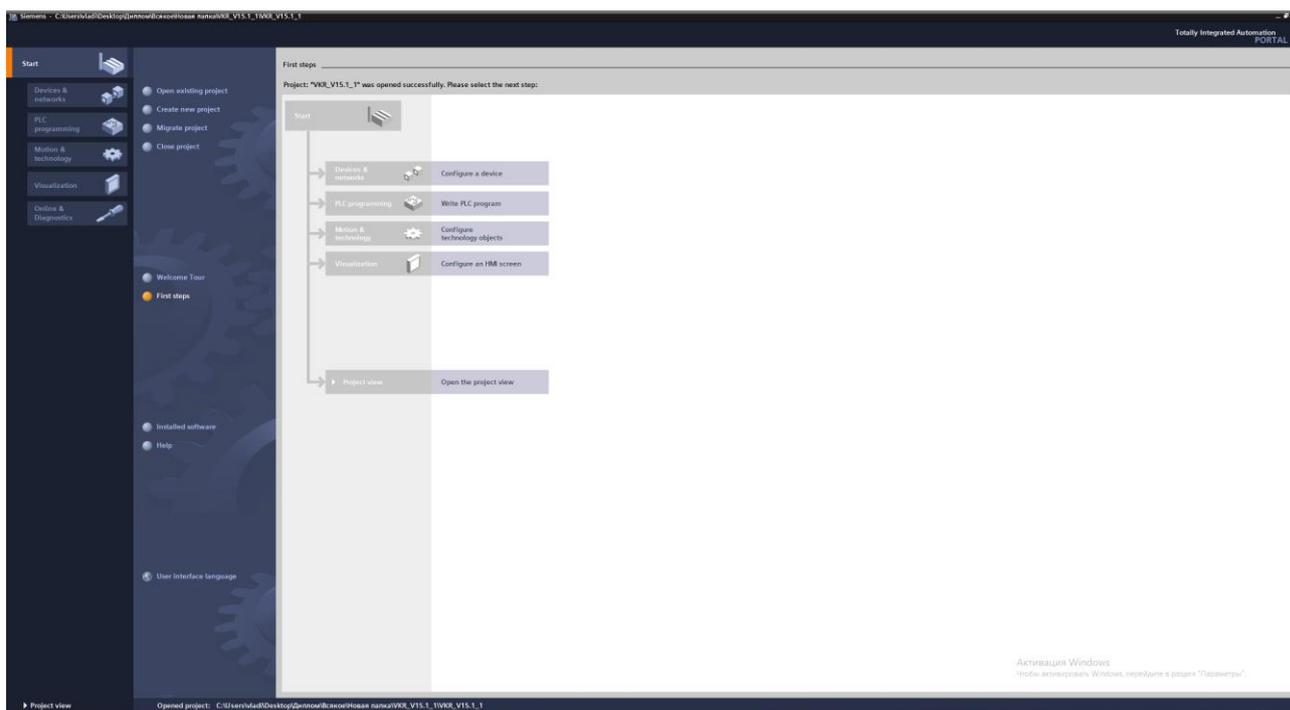


Рисунок 6 - Главное окно программного обеспечения TIA Portal

Данное ПО позволяет достигать наиболее высокую эффективность разработки любых проектов АСУ ТП, основывающихся на использовании PLC SIMATIC и интерфейса SIMATIC HMI.

В TIA Portal интегрированы два основных программных пакета [23]:

– Simatic Step 7 – для программирования контроллеров S7-1500, S7- 1200, S7-300, S7- 400 и WinAC;

– Simatic WinCC – для разработки человеко-машинного интерфейса (от простейших кнопочных панелей до сложных конфигураций уровня SCADA);

3.3 Создание схемы информационных потоков

Схема информационных поток представлена на рисунке 7 и состоит из трех уровней:

1. На нижнем уровне находятся датчики, фиксирующие давление в сепараторе и в трубах на выходах из сепаратора, температуру в сепараторе, уровни нефти и воды, а также расходы нефти воды и газа. Также здесь находятся регулирующие клапаны, которые управляют сбросом нефти, воды и газа из сепаратора.

2. На среднем уровне находятся ПЛК (Siemens S7-1200) и модули ввода/вывода. Модули ввода/вывода принимают данные с датчиков, которые обрабатывает ПЛК, а также посылают на исполнительные механизмы управляющие сигналы, сформированные ПЛК. Кроме того, на этом уровне идет передача данных о процессе с ПЛК на верхний уровень, а именно в Simatic Step 7 и на OPC-сервер.

3. На верхнем уровне информация о процессе передается на экранные формы оператора, а также на ПО Process Simulator, откуда данные берутся для использования в математической модели процесса.

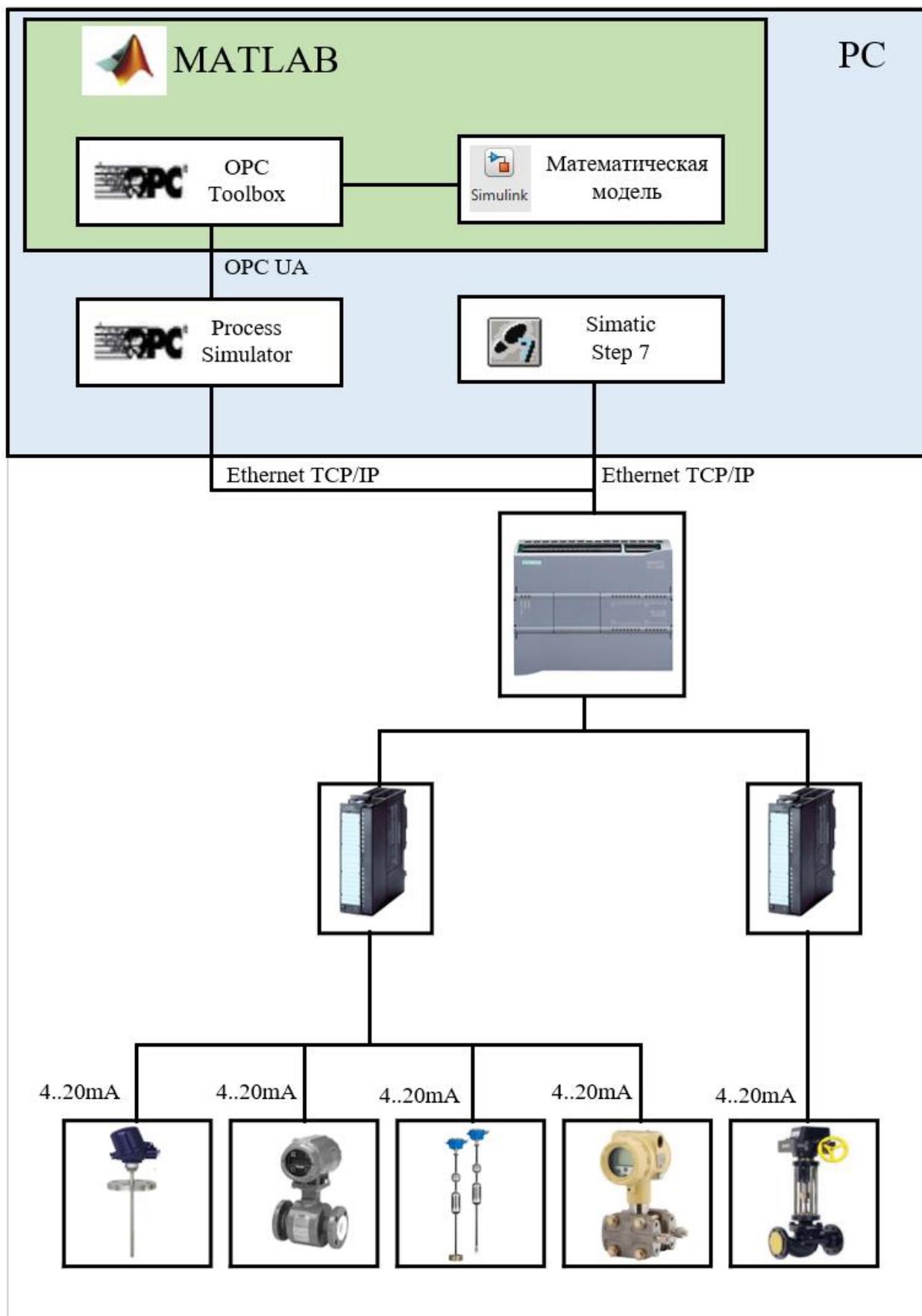


Рисунок 7 – Схема информационных потоков

3.4 Разработка математической модели

Для создания математической модели трехфазного сепаратора необходимо построить три контура регулирования – контур регулирования уровня воды, контур регулирования уровня нефти и контур регулирования давления в сепараторе.

3.4.1 Построение контуров регулирования

3.4.1.1 Контур регулирования воды

В сепаратор поступает нефтяная эмульсия. Следовательно, уравнение материального баланса выглядит следующим образом:

$$\int F_{\text{общий}}(t) = V_{\text{воды}}(t) + V_{\text{нефти}}(t) + V_{\text{газа}}(t), \quad (1)$$

где F – расход.

В свою очередь:

$$\int F_{\text{воды}}(t) = V_{\text{воды}}(t), \quad (2)$$

где $V_{\text{воды}}$ – объем воды в 1-ой полости;

Уровень в первой полости регулируется клапаном сброса воды, поэтому устанавливаем зависимость расхода от хода штока.

Для этого воспользуемся методом из РТМ 108.711.02-79 и рассчитаем пропускную способность регулирующего клапана:

$$Kv_{\text{max}} = 10^{-2} \cdot Q_{\text{max}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}}, \quad (3)$$

где Kv_{max} – максимальная пропускная способность клапана,

Q_{max} – объемный расход среды, м³/ч,

ρ – плотность среды, кг/м³,

ΔP – перепад давления на клапане, Мпа.

Выразим расход:

$$Q_{max} = \frac{Kv_{max}}{10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}}}, \quad (4)$$

$$Kv_{max} = Kvs \cdot \Phi, \quad (5)$$

$$\Phi = \Phi_0 + m \cdot h, \quad (6)$$

$$Q_{max} = \frac{(0,0183 + 0,9817 \cdot h) \cdot Kvs}{10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}}}, \quad (7)$$

где Φ – линейная расходная характеристика (функциональная зависимость коэффициента расхода от положения штока клапана).

Она подходит для регулирования технологических процессов, когда существует более или менее прямая зависимость между процессом управляемой величиной и потоком среды и определяется по формуле:

$$\Phi = \Phi_0 + m \cdot h, \quad (8)$$

где Φ_0 – относительный коэффициент расхода;

m – кривизна характеристики;

h – ход штока.

Подставляем стандартные величины:

$$\Phi = 0,0183 + 0,9817 \cdot h. \quad (9)$$

Следовательно, расход равен:

$$Q_{max} = \frac{(0,0183 + 0,9817 \cdot h) \cdot Kvs}{10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}}}, \quad (10)$$

В таблице 2 приведено изменение расхода от положения штока, исходя из производительности трехфазного сепаратора НГСВ 1,6 – 3400:

Таблица 2 – Изменение расхода в зависимости от изменения хода штока

Ход штока, мм	Расход воды, м ³ /ч
0,1	13,94145102
0,2	20,79820095
0,3	31,02726985
0,4	46,28724746
0,5	69,05245895
0,6	103,0141637
0,7	153,6790736
0,8	229,2622375
0,9	342,0190682
1	510,232493

Далее необходимо определить зависимость уровня от объема. Зависимость нелинейная, так как форма сепаратора – цилиндр со сферическими днищами. Она устанавливается эмпирически, следуя ГОСТ 8.346-2000 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Резервуары стальные горизонтальные. Методы и средства»

Полные объемы цилиндрической части и сферических днищ:

$$V_{ц.п.} = \pi \cdot r^2 \cdot L, \quad (11)$$

$$V_{сд.п.} = 0,5233 \cdot f(0,75 \cdot D^2 + f^2), \quad (12)$$

где r – радиус цилиндрической части, м,

L – длина цилиндрической части, м,

f – выпуклость сферического днища, м,

D – диаметр сферической части, м.

$$V_{ц.п.} = 3,14 \cdot 1,75^2 \cdot 9 = 86,59, \quad (13)$$

$$V_{сд.п.} = 0,5233 \cdot 2(0,75 \cdot 3,4^2 + 2^2) = 13,2, \quad (14)$$

Вместимость цилиндрической части и сферических днищ сепаратора пересчитывается исходя из формул:

$$V_{ц} = K_{ц} \cdot V_{ц.п.}, \quad (15)$$

$$V_{\text{сд}} = K_{\text{с}} \cdot V_{\text{сд.п.}}, \quad (16)$$

$K_{\text{ц}}$ и $K_{\text{с}}$ берутся из таблиц, представленных в ГОСТ 8.346-2000 «ТАБЛИЦА КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАПОЛНЕНИЯ $K_{\text{ц}}$ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ» и «ТАБЛИЦА КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАПОЛНЕНИЯ $K_{\text{с}}$ СФЕРИЧЕСКИХ ДНИЩ». Зависят коэффициенты от высоты наполнения сепаратора.

Затем составляем тарифовочную таблицу:

Таблица 3 – Тарифовочная таблица (из объема в уровень)

H	H/D	$K_{\text{ц}}$	$K_{\text{с}}$	$V_{\text{ц}}$	$V_{\text{сд}}$	$V_{\text{об}}$	$V_{\text{1-ой}}$ полости	$V_{\text{2-ой}}$ полости
0,175	0,051470588	0,019	0,003	1,6454	0,0396	1,685	1,26375	0,42125
0,35	0,102941176	0,053	0,015	4,5898	0,198	4,7878	3,59085	1,19695
0,525	0,154411765	0,097	0,04	8,4002	0,528	8,9282	6,69615	2,23205
0,7	0,205882353	0,147	0,081	12,7302	1,0692	13,7994	10,34955	3,44985
0,875	0,257352941	0,203	0,131	17,5798	1,7292	19,309	14,48175	4,82725
1,05	0,308823529	0,26	0,192	22,516	2,5344	25,0504	18,7878	6,2626
1,225	0,360294118	0,32	0,258	27,712	3,4056	31,1176	23,3382	7,7794
1,4	0,411764706	0,387	0,334	33,5142	4,4088	37,923	28,44225	9,48075
1,575	0,463235294	0,453	0,417	39,2298	5,5044	44,7342	33,55065	11,1836
1,75	0,514705882	0,52	0,5	45,032	6,6	51,632	38,724	12,908
1,925	0,566176471	0,56	0,583	48,496	7,6956	56,1916	42,1437	14,0479
2,1	0,617647059	0,6247	0,663	54,09902	8,7516	62,85062	47,13797	15,7127
2,275	0,669117647	0,71	0,739	61,486	9,7548	71,2408	53,4306	17,8102
2,45	0,720588235	0,77	0,808	66,682	10,6656	77,3476	58,0107	19,3369
2,625	0,772058824	0,83	0,869	71,878	11,4708	83,3488	62,5116	20,8372
2,8	0,823529412	0,88	0,919	76,208	12,1308	88,3388	66,2541	22,0847
2,975	0,875	0,93	0,958	80,538	12,6456	93,1836	69,8877	23,2959
3,15	0,926470588	0,97	0,963	84,002	12,7116	96,7136	72,5352	24,1784
3,325	0,977941176	0,994	0,997	86,0804	13,1604	99,2408	74,4306	24,8102
3,4	1	1	1	86,6	13,2	99,8	74,85	24,95

где H – уровень наполнения, м,

D – диаметр, м,

Итак, контур регулирования уровня воды работает следующим образом. Заданный уровень поступает на сумматор, где из него вычитается текущий уровень. Далее измеренная величина уровня поступает в ПИД-регулятор, который преобразует уровень в ход штока. Величина хода штока ограничивается блоком «Saturation» (рисунок 8):

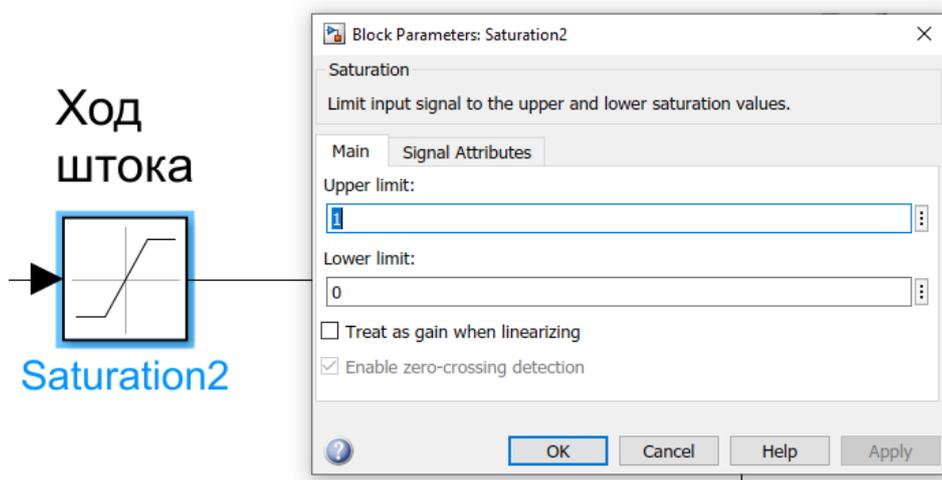


Рисунок 8 – Saturation

Значение хода штока пересчитывается в расход по формуле 10 (рисунок 9) и суммируется с дебитом воды (возмущением). Сигнал расхода интегрируется в объем. Затем объем пересчитывается в уровень согласно тарифовочной таблице с помощью блока LookUpTable (рисунок 10).

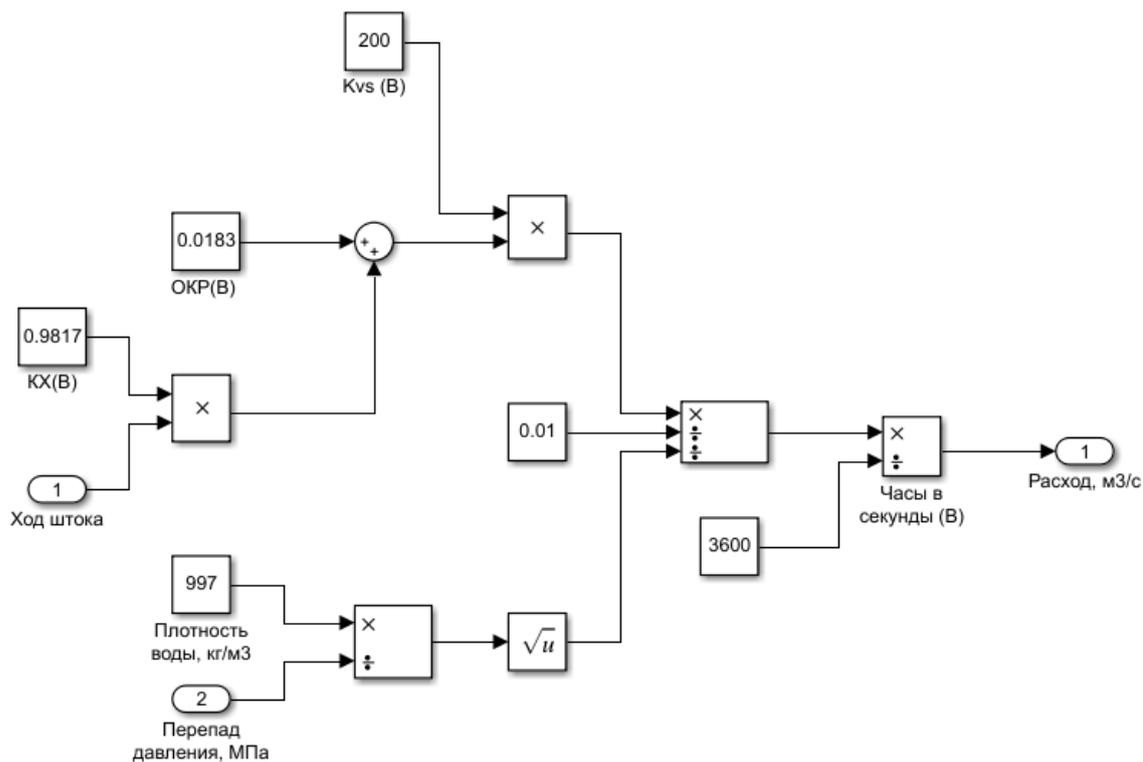


Рисунок 9 – Расчет расхода

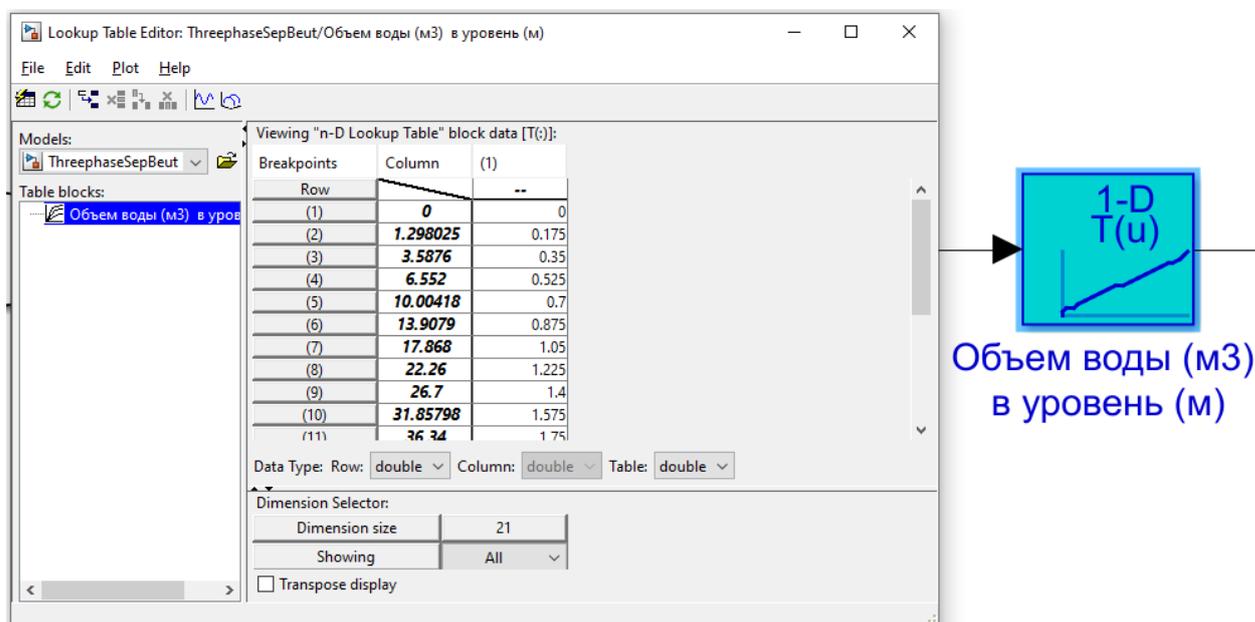


Рисунок 10 – Тарифовочная таблица в блоке LookUpTable

Замыкается контур обратной связи с масштабирующим коэффициентом (датчик уровня, рисунок 11):

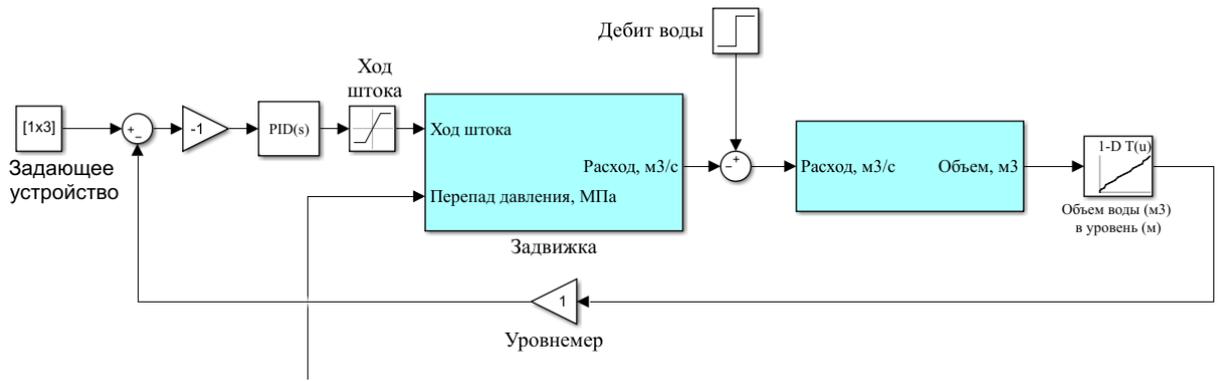


Рисунок 11 – Контур регулирования уровня воды

3.4.1.2 Контур регулирования нефти

Для того чтобы определить объем нефти, которая поступит во вторую полость, необходимо из объема первой полости вычесть объем воды:

$$V_{\text{нефти во 2-ю полость}}(t) = V_{\text{1-ой полости}}(t) - V_{\text{воды}}(t), \quad (17)$$

Далее аналогично контуру регулирования уровнем воды, то есть ход штока пересчитывается в расход нефти, а расход интегрируется в объем нефти, который суммируется с объемом нефти, которая перешла из 1-й во 2-ю полость, затем преобразуется в уровень нефти. Замыкает контур обратная связь с масштабирующим коэффициентом (датчик уровня, рисунок 12):

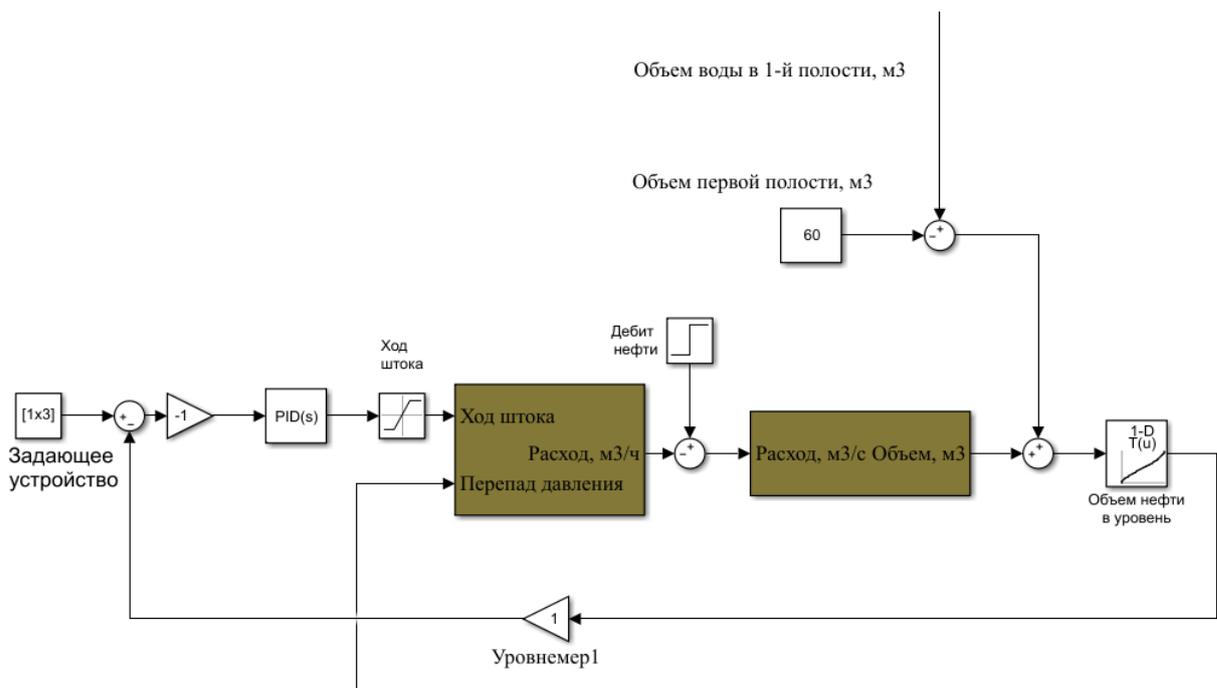


Рисунок 12 – Контур регулирования уровня нефти

3.4.1.3 Контур регулирования давления

Контур регулирования уровнем нефти и регулирования уровнем воды зависят от перепада давления, что следует из формулы X. Перепад давления, в свою очередь, зависит от давления в сепараторе и внешнего давления. Поэтому контур регулирования давления в сепараторе работает следующим образом: заданное давление поступает в сумматор, где вычитается текущее давление. Измеренная величина давления подается в ПИД-регулятор, в котором пересчитывается в ход штока, а ход штока в расход. К расходу суммируется дебит газа (возмущение). Затем расход газа интегрируется в количество вещества. Зависимость давления от количества вещества описывается формулой Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \mu RT , \quad (18)$$

$$P = \frac{\mu RT}{V} , \quad (19)$$

где T – температура внутри сепаратора, °C;

V_{Γ} – объем сепаратора без учета жидкости, м³:

$$V_{\Gamma}(t) = V_{\text{сепаратор}}(t) - V_{\text{нефти}}(t) - V_{\text{1-ой полости}}(t) , \quad (20)$$

Исходя из вышперечисленных формул, контур регулирования давления в сепараторе будет выглядеть следующим образом (рисунки 13-15):

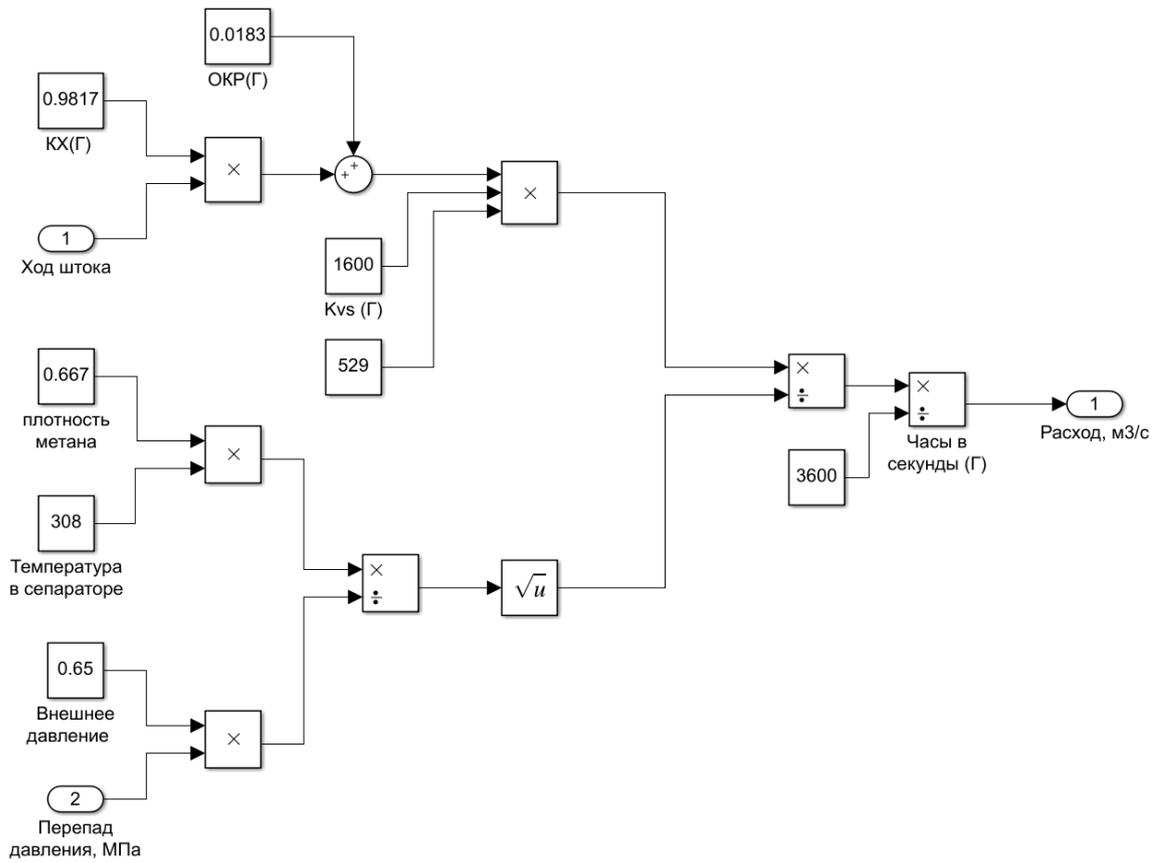


Рисунок 13 – Перевод хода штока в расход

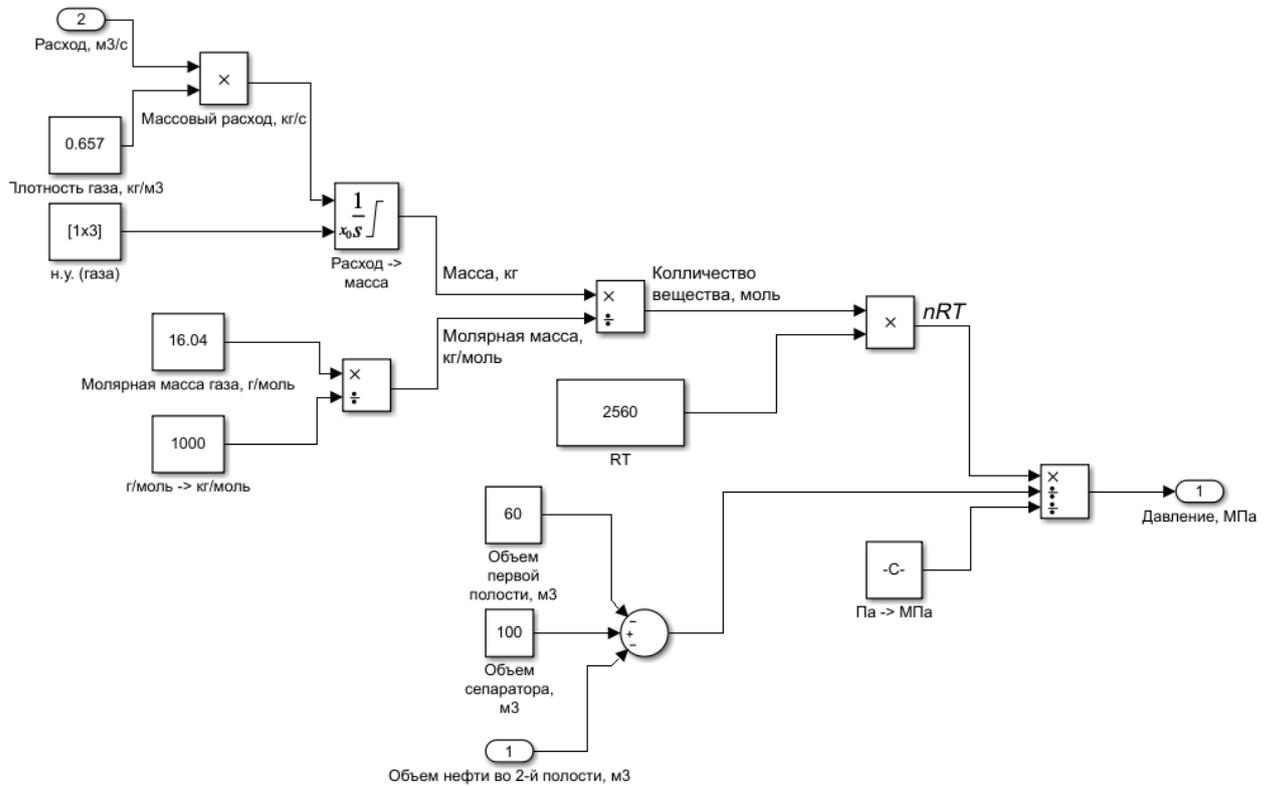


Рисунок 14 – Перевод расхода в давление

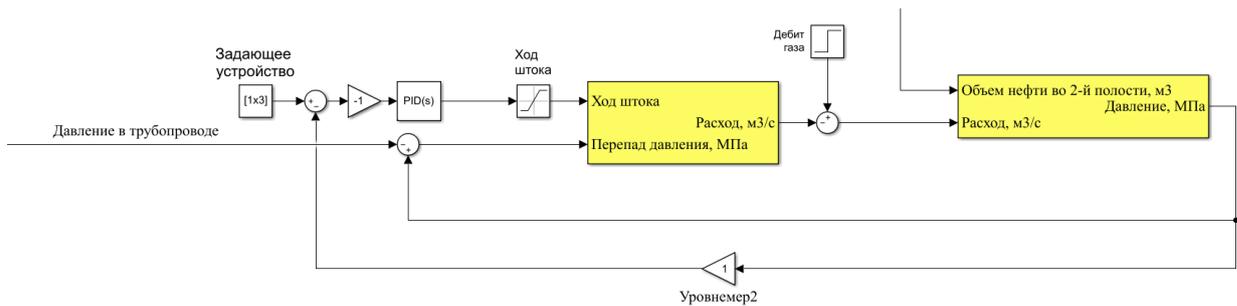


Рисунок 15 – Контур регулирования давления в сепараторе

Из давления на выходе вычитается внешнее давление. Перепад давления поступает в контуры регулирования уровня воды и регулирования уровня нефти.

3.4.2 Объединение контуров в полную математическую модель

Итак, имеем три контура регулирования каждый из которых влияет друг на друга, то есть при появлении возмущения на одном из контуров, это возмущение отразится и на других. Полная математическая модель представлена на рисунке 15.

Коэффициенты, полученные после настройки ПИД-регулятора, указаны в таблице 4.

Таблица 4 – Коэффициенты ПИД-регулятора

	P	I	D
Контур регулирования уровня воды	4	0.01	0
Контур регулирования уровня воды	4	0.01	0
Контур регулирования давления в сепараторе	10	0.01	0

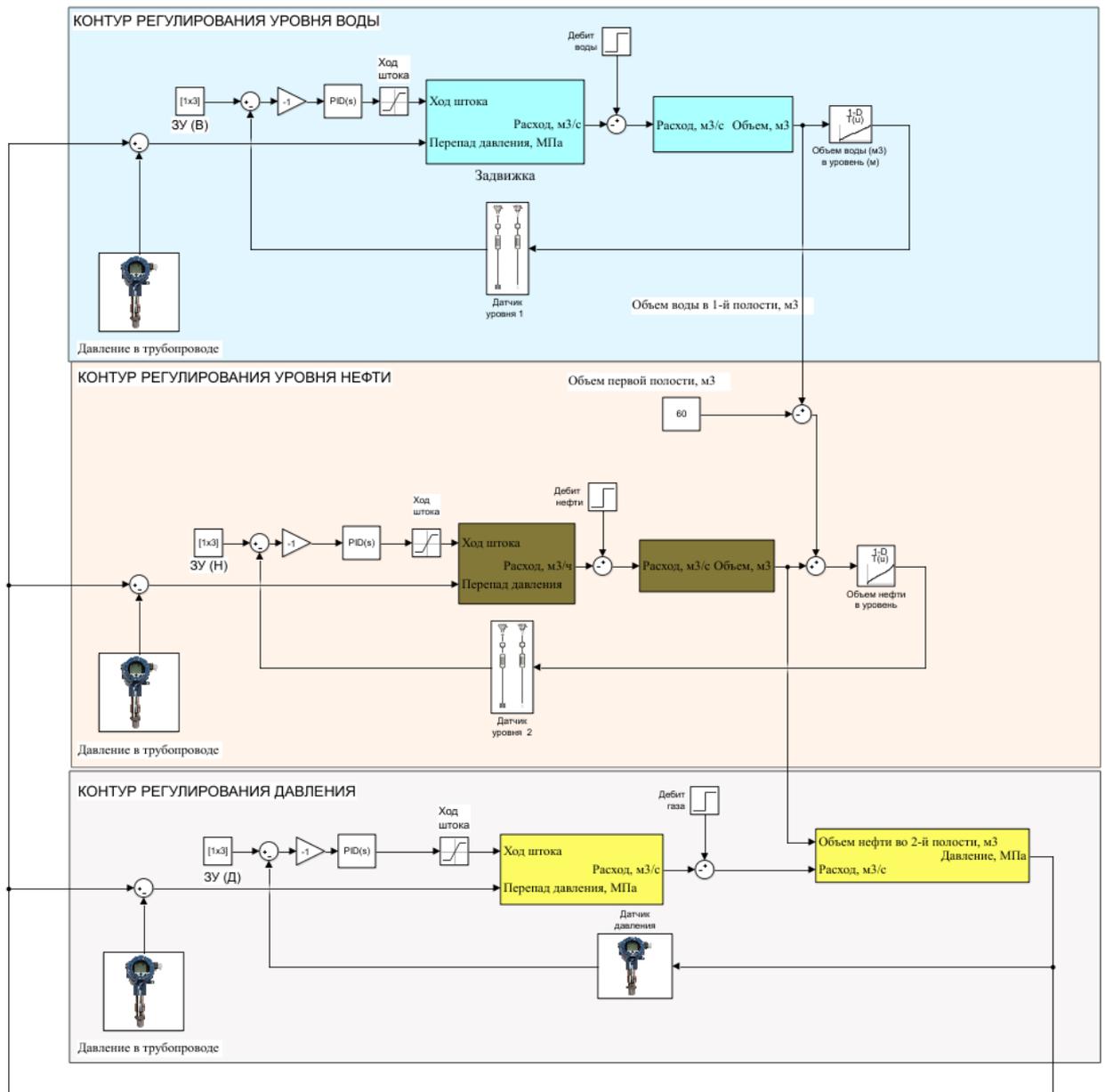


Рисунок 16 – Полная математическая модель

Проверим работоспособность модели в рабочей точке и на границах рабочего диапазона, величины которых представлены в таблице 5:

Таблица 5 - Рабочие диапазоны

	Верхняя граница	Нижняя граница	Рабочая точка
Контур воды	2.1	0.72	1.7
Контур нефти	2.5	0.8	1.25
Контур давления	1.3	1	1.1

Таблица 6 – Время появления возмущений

	Контур регулирования уровня воды	Контур регулирования уровня нефти	Контур регулирования давления
Возмущения	2000с	6000с	12000с

Взаимное влияние контуров обнаруживается на следующих рисунках (рисунки 17-19):

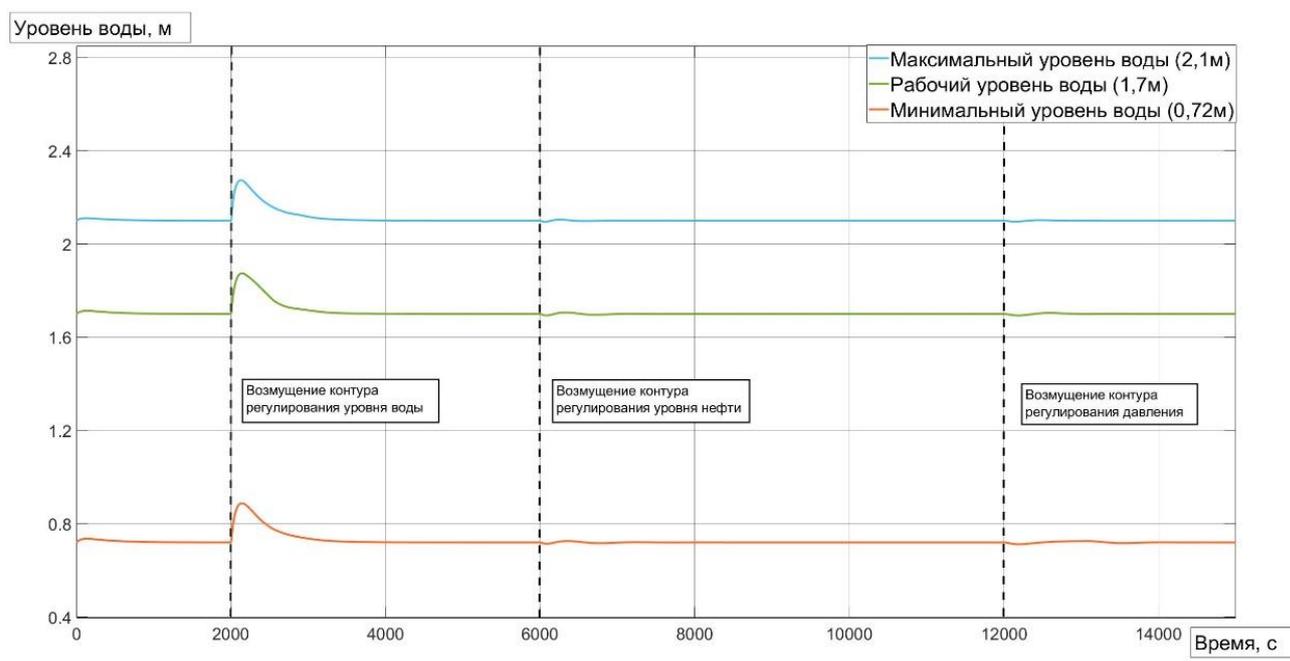


Рисунок 17 – Контур регулирования воды в рабочих диапазонах

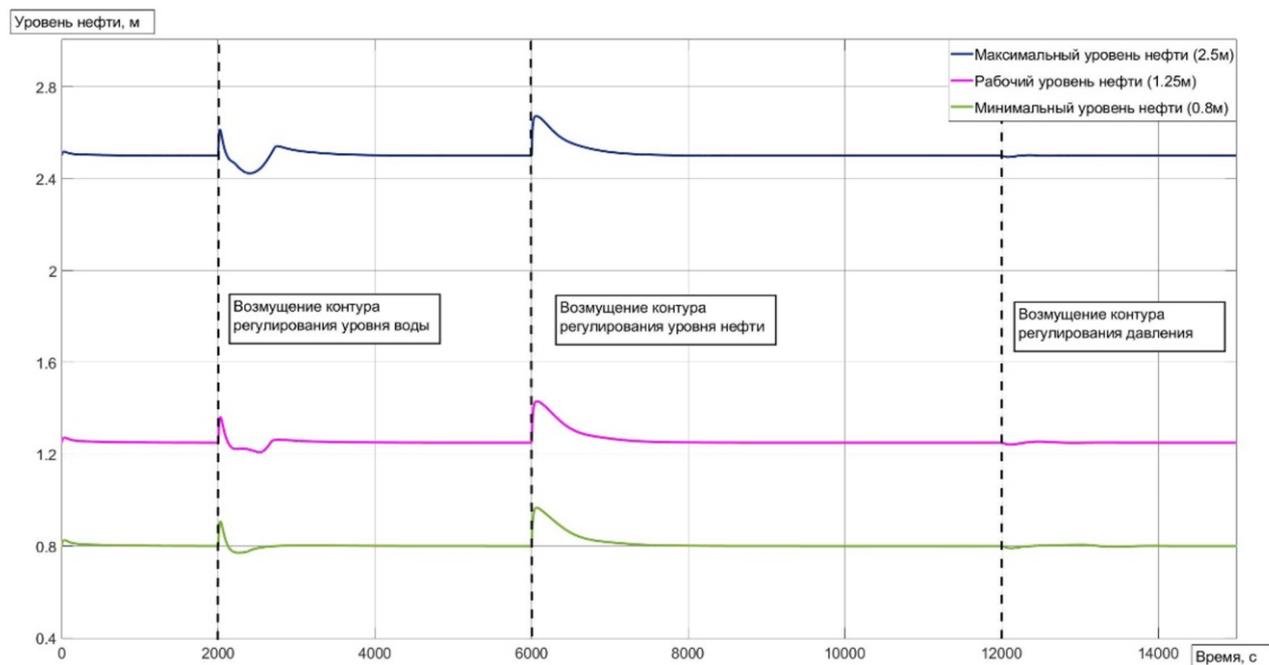


Рисунок 18 – Контур регулирования нефти в рабочих диапазонах

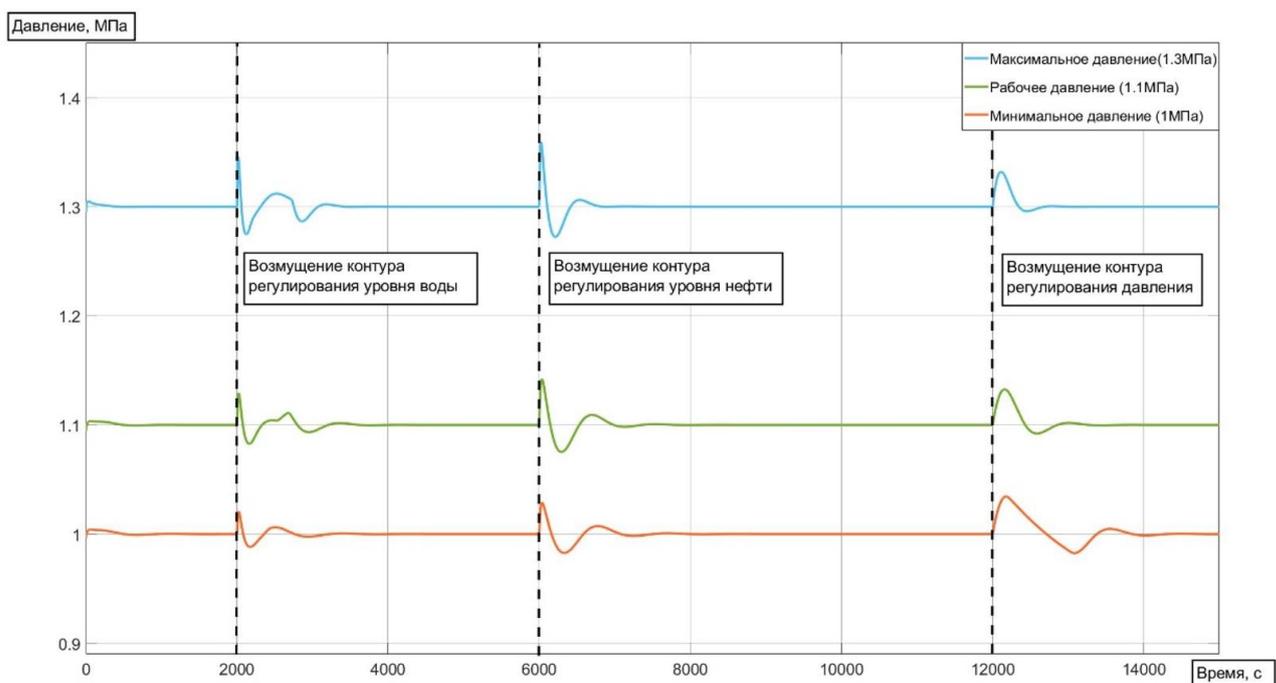


Рисунок 19 – Контур регулирования давления в рабочих диапазонах

Исходя из выше представленных рисунков можно сделать вывод что система обрабатывает возмущения и работает стабильно.

3.5 Организация связи между математической моделью и ПЛК

Целью стандарта OPC является обеспечение возможности совместной работы средств автоматизации, функционирующих на разных аппаратных платформах, в разных промышленных сетях и производимых разными фирмами.

Для того чтобы не адаптировать SCADA пакет индивидуально к каждому новому оборудованию используют OPC-сервер.

В разработанном проекте имеем: объект управления – математическая модель трехфазного сепаратора НГСВ 1.6 – 3400 в Simulink, ПЛК Siemens S7-1200. В качестве OPC-сервера выступит платформа Process Simulator 2.7.6484.

3.5.1 Настройка TIA Portal

Первым делом необходимо записать все теги, которые будут использоваться в программном коде, для привязок к SCADA, а также передачи на OPC-сервер. На рисунке x представлена часть тегов, используемых в работе цифрового двойника. Красным цветом выделен пример тегов, в которые записываются данные с датчиков. Синим цветом выделены теги, используемые в SCADA. Зеленым цветом выделены теги, используемые для передачи данных на OPC-сервер.

PLC tags								
	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Visibl...	Comment
1	pres_aft_gas	Default tag table	Real	%MD0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	pres_aft_oil	Default tag table	Real	%MD4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	pres_aft_water	Default tag table	Real	%MD8		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	lvl_oil_sens	Default tag table	Real	%MD12		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	lvl_water_sens	Default tag table	Real	%MD16		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	pres_sep_sens	Default tag table	Real	%MD20		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	temp_sens	Default tag table	Real	%MD24		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	flow_gas	Default tag table	Real	%MD28		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	flow_oil	Default tag table	Real	%MD32		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	flow_water	Default tag table	Real	%MD36		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
11	ust_lvl_oil	Default tag table	Real	%MD40		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
12	ust_lvl_water	Default tag table	Real	%MD44		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
13	ust_pres	Default tag table	Real	%MD48		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
14	valve_oil	Default tag table	Real	%MD52		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
15	valve_water	Default tag table	Real	%MD56		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
16	valve_gas	Default tag table	Real	%MD60		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
17	debit_oil	Default tag table	Real	%MD64		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
18	debit_water	Default tag table	Real	%MD68		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
19	debit_gas	Default tag table	Real	%MD72		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
20	lvl_oil_x	Default tag table	Bool	%M76.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
21	lvl_water_x	Default tag table	Bool	%M76.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
22	lvl_gas_x	Default tag table	Bool	%M76.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
23	lvl_oil_hand	Default tag table	Real	%MD80		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
24	lvl_oil OPC	Default tag table	Real	%MD84		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
25	temp OPC	Default tag table	Real	%MD88		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
26	temp_x	Default tag table	Bool	%M76.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
27	temp_hand	Default tag table	Real	%MD96		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Рисунок 20 – Теги ПЛК

Далее необходимо написать алгоритм, который будет обеспечивать возможность выбора данных, отправляемых в математическую модель. То есть либо модель будет получать реальные данные с датчиков, либо же можно осуществлять ручной ввод выбранных данных. Для этого необходимо написать код на языке LD. На рисунке 21 представлен фрагмент кода, в котором происходит передача информации о температуре в сепараторе на OPC-сервер. В зависимости от значения тега temp_x данные берутся либо с датчика температуры, либо введенные с экранной формы.

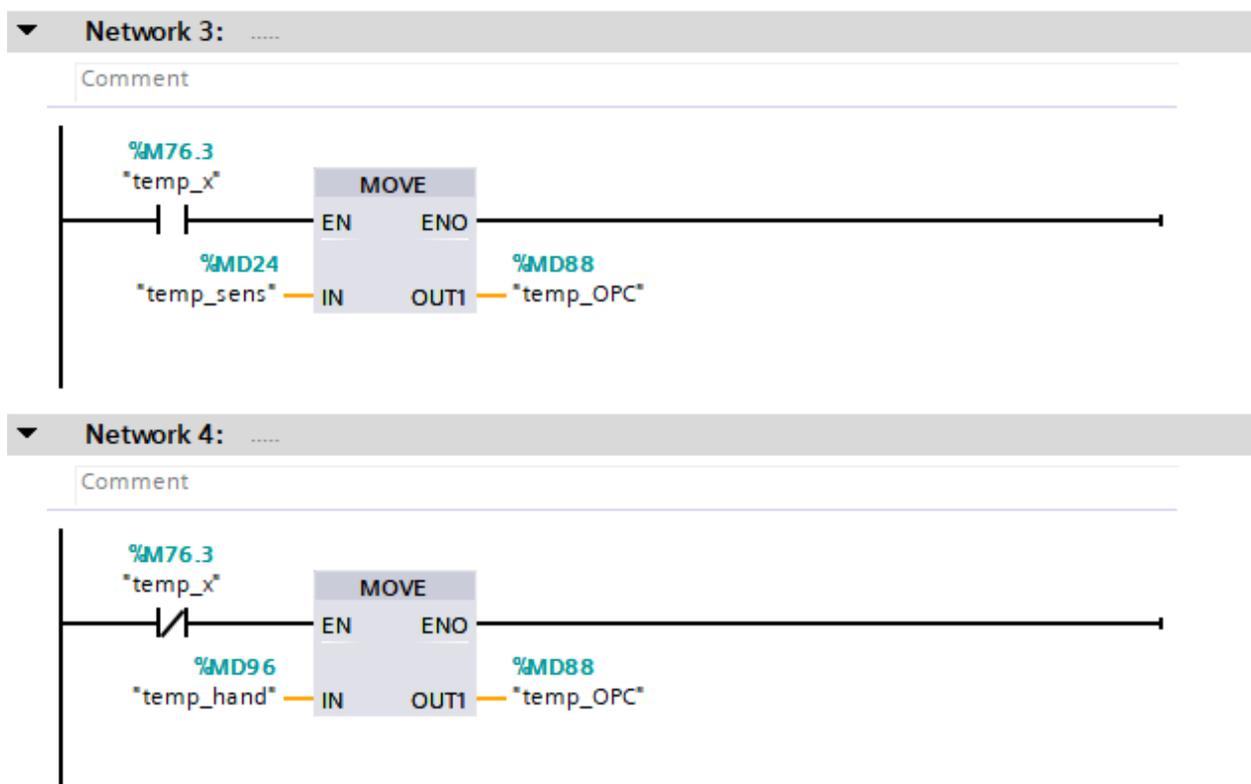


Рисунок 21 – Передача данных на OPC-сервер

Для демонстрации работы соединения необходимо запустить работу программы в режиме симуляции. После этого установить значения тега temp_x равное нулю, для включения режима передачи данных, введенных пользователем. Также нужно ввести значение температуры.

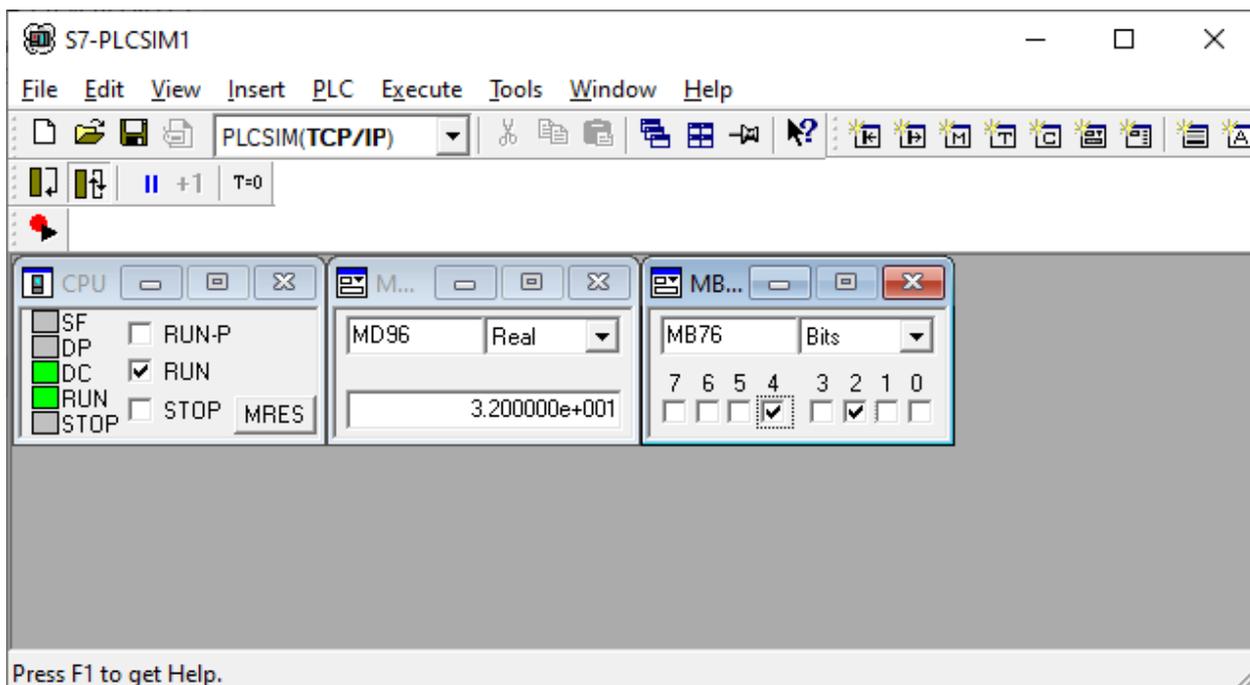


Рисунок 22 – Программа, работающая в режиме симуляции

3.5.2 Настройка Process Simulator

Далее необходимо обеспечить передачу данных с TIA Portal, выступающим в роли OPC-клиента, в Process Simulator, который является OPC-сервером. Для начала нужно создать соединение в Process Simulator, для этого нужно ввести имя подключения и его тип, в данном случае осуществляется подключение к симулятору S7PLCSim (рисунок 23).

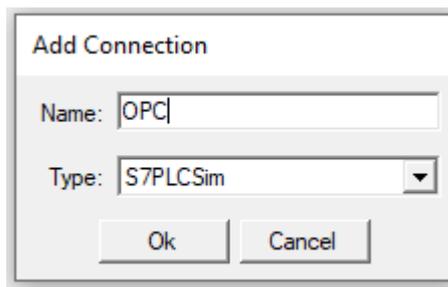


Рисунок 23 – Создание подключения

На рисунке 24 видно, что подключение прошло успешно и можно приступить к вводу данных, передаваемых с TIA Portal.

The screenshot shows the 'Communication Manager' window with a table of connections. The table has columns for Name, Type, Items, Connected, and Last Error. One connection is listed: OPC, S7PLCSim, 1, yes, and S7ProSim is not connected...

Name	Type	Items	Connected	Last Error
OPC	S7PLCSim	1	yes	S7ProSim is not connected...

Рисунок 24 – Функционирующее соединение

Дальше теги, обозначенные в TIA Portal, обозначаются также и в Process Simulator. Важно чтобы тип данных и адрес тега полностью совпадали с введенными ранее. На рисунке 25 представлен пример добавление тега температуры, который будет передаваться на модель, а также расхода газа, который будет передаваться с модели в TIA Portal.

The screenshot shows the 'Items' table in Process Simulator. The table has columns for Name, Comment, Type, Access, Using, Converter, and Description. Two items are listed: flow_gas_OPC and temp_OPC.

Name	Comment	Type	Access	Using	Converter	Description
flow_gas_OPC		Single	r/w	0		MD100, REAL
temp_OPC		Single	r/w	1		MD88, REAL

Рисунок 25 – Теги в Process Simulator

3.5.3 Настройка Simulink

Соединение с Process Simulator осуществляется в Simulink при помощи блока OPC Configuration библиотеки OPC Toolbox. Причем в данном случае в роли OPC-сервера выступает Simulink, а Process Simulator в роли клиента. На рисунке 26 показано соединение в блоке OPC Configuration.

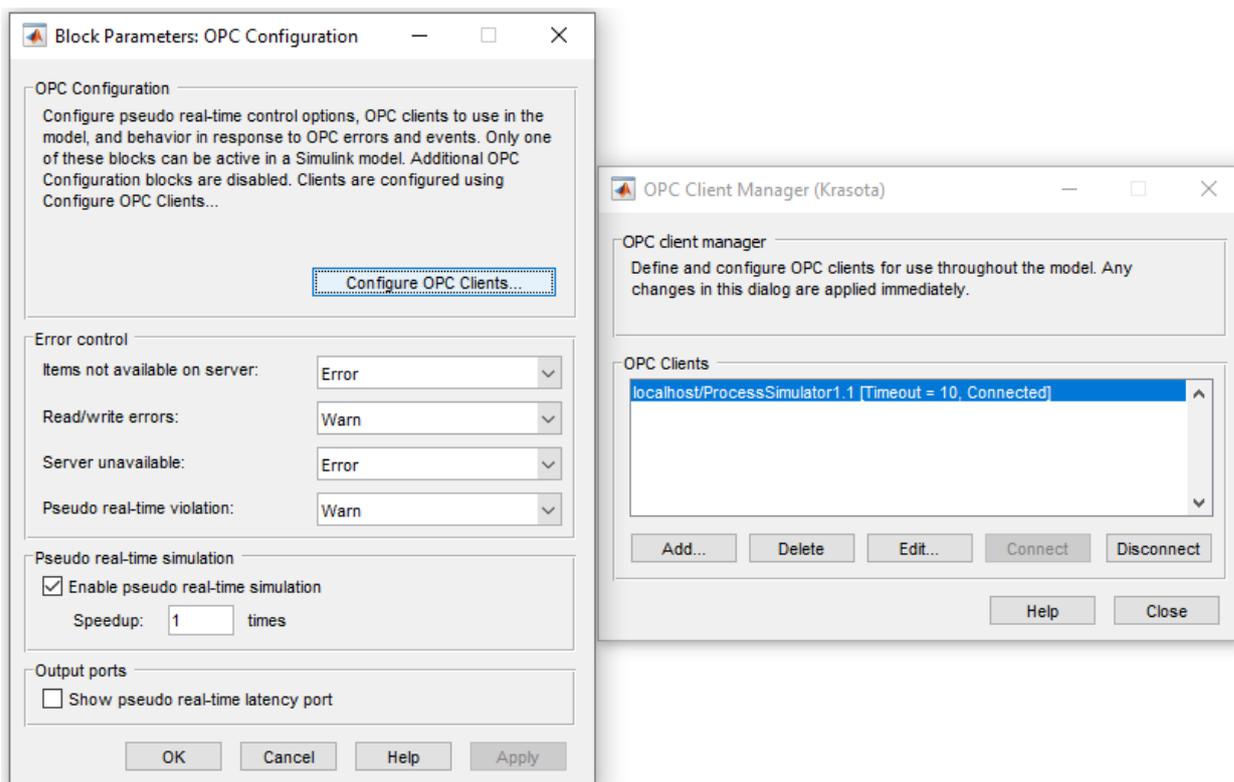


Рисунок 26 – Созданное соединение

Передача данных в модель осуществляется с помощью блока OPC Read, а передача данных из модели с помощью блока OPC Write. На рисунке 27 показан пример использования полученных через OPC данных в математической модели. Здесь используется температура, которая необходима для расчета расхода газа в контуре регулирования давления. Для демонстрации работы блока OPC Write была осуществлена передача расхода газа в TIA Portal (рисунок 28).

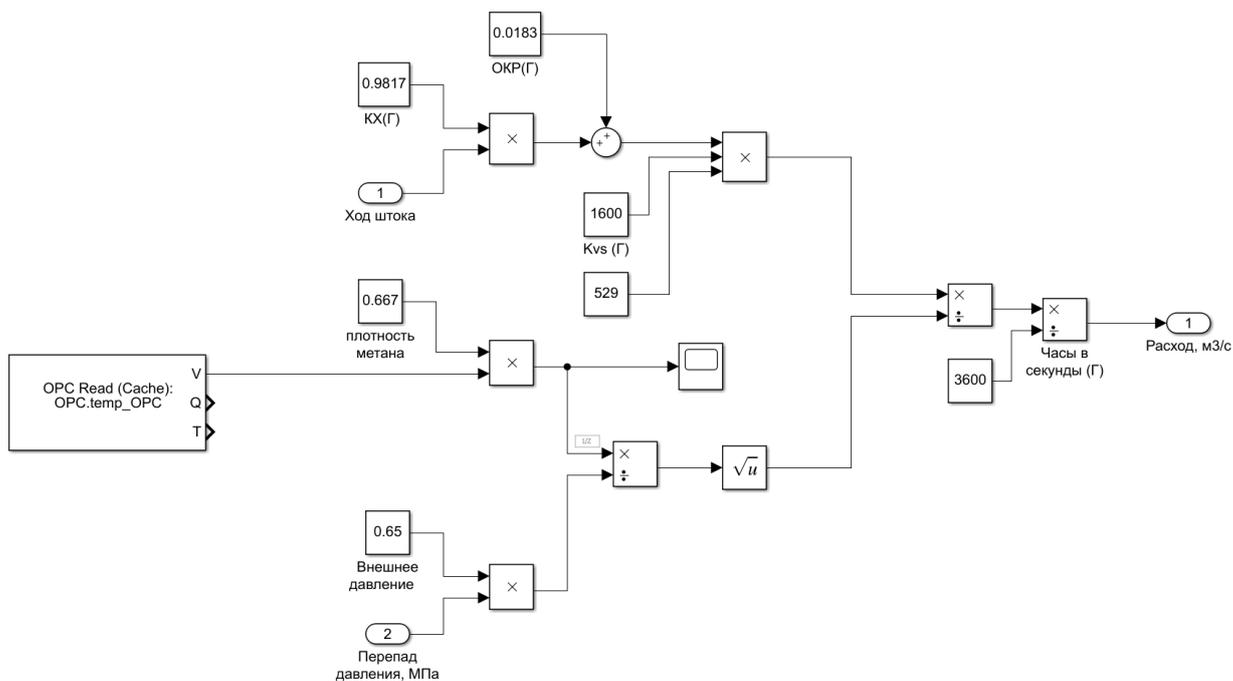


Рисунок 27 – Передача температуры в математическую модель

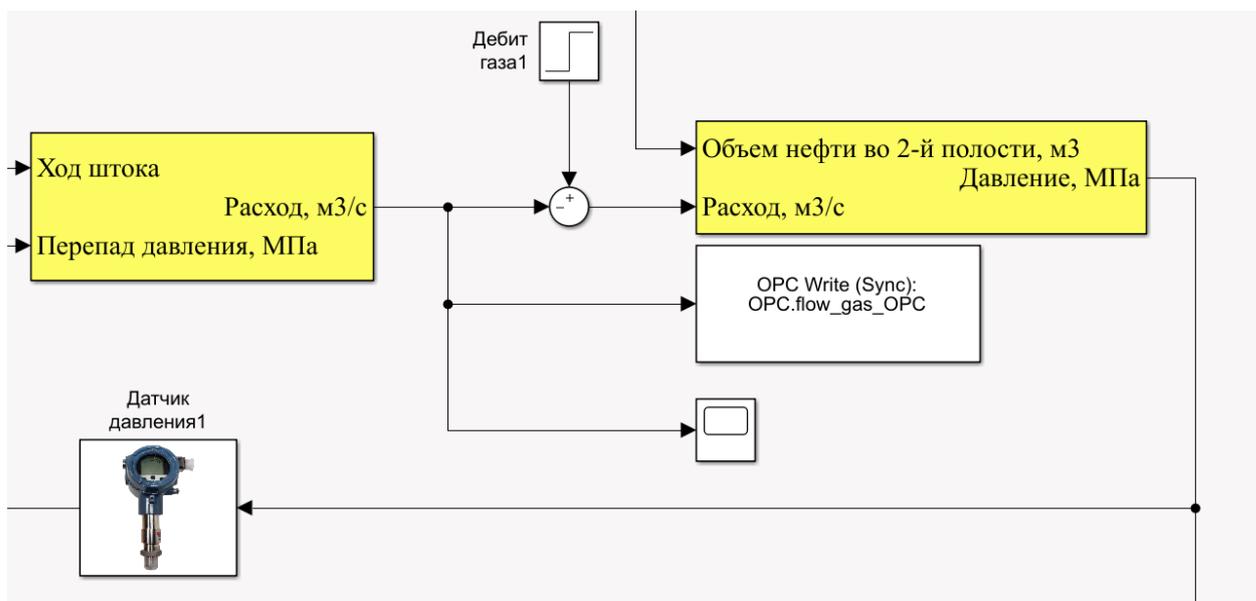


Рисунок 28 – Передача расхода газа из математической модели

Следующий шаг – проверка корректности передаваемых данных. Для этого необходимо сравнить значения температуры и расхода газа в TIA Portal и Simulink (рисунки 29 и 30).

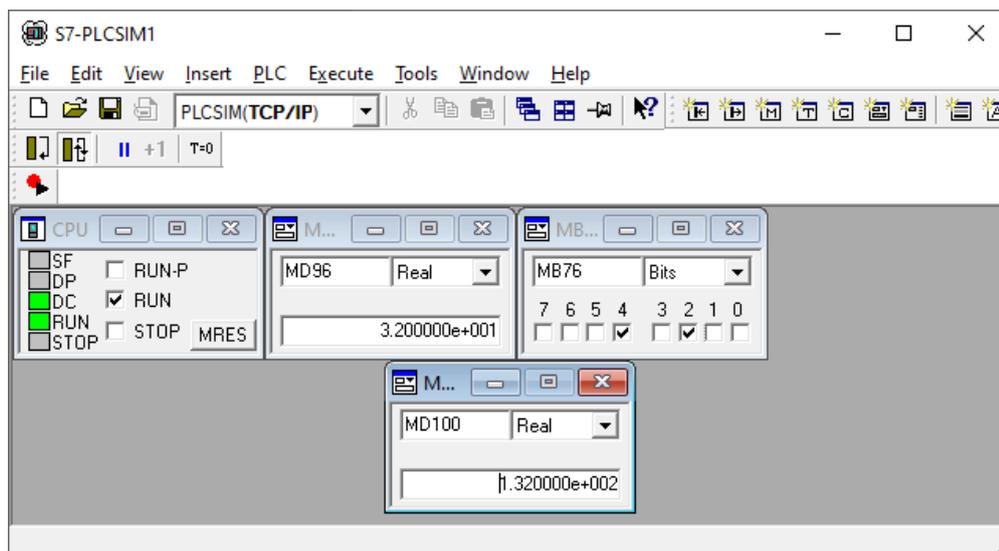


Рисунок 29 – Данные в TIA Portal

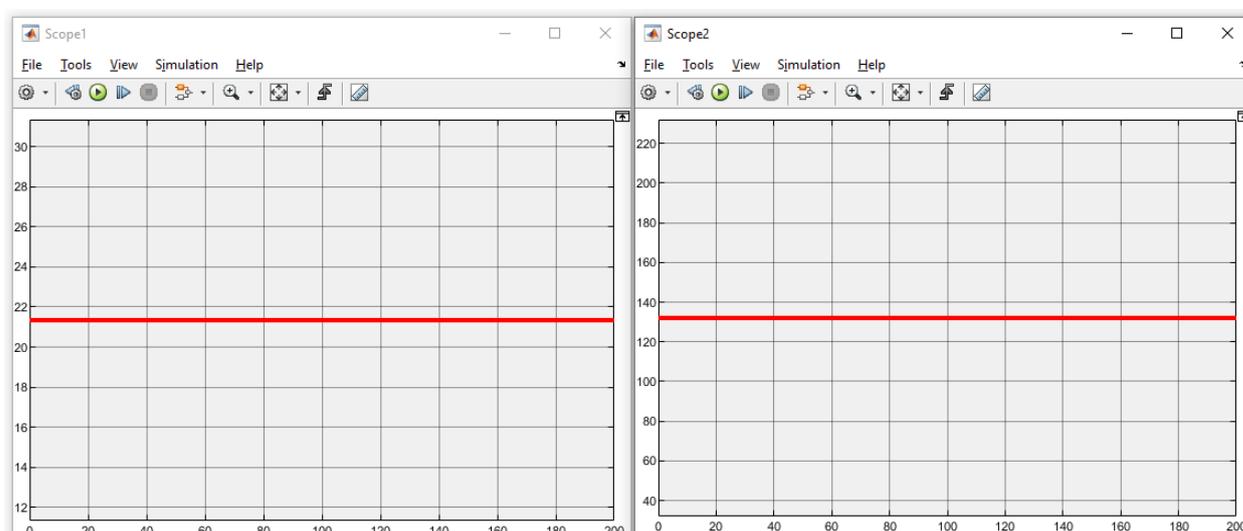


Рисунок 30 – Данные в Simulink

Из рисунков видно, что данные совпадают. На первом графике Simulink показано произведение температуры и плотности газа, которые необходимы для определения расхода газа. Можно сделать вывод что передача данных осуществлена успешно.

Далее необходимо модифицировать математическую модель таким образом, чтобы все необходимые данные можно было передавать в нее с TIA Portal или же наоборот, считывать эти данные.

На рисунке 31 показана модифицированная с помощью блоков OPC Read и OPC Write математическая модель.

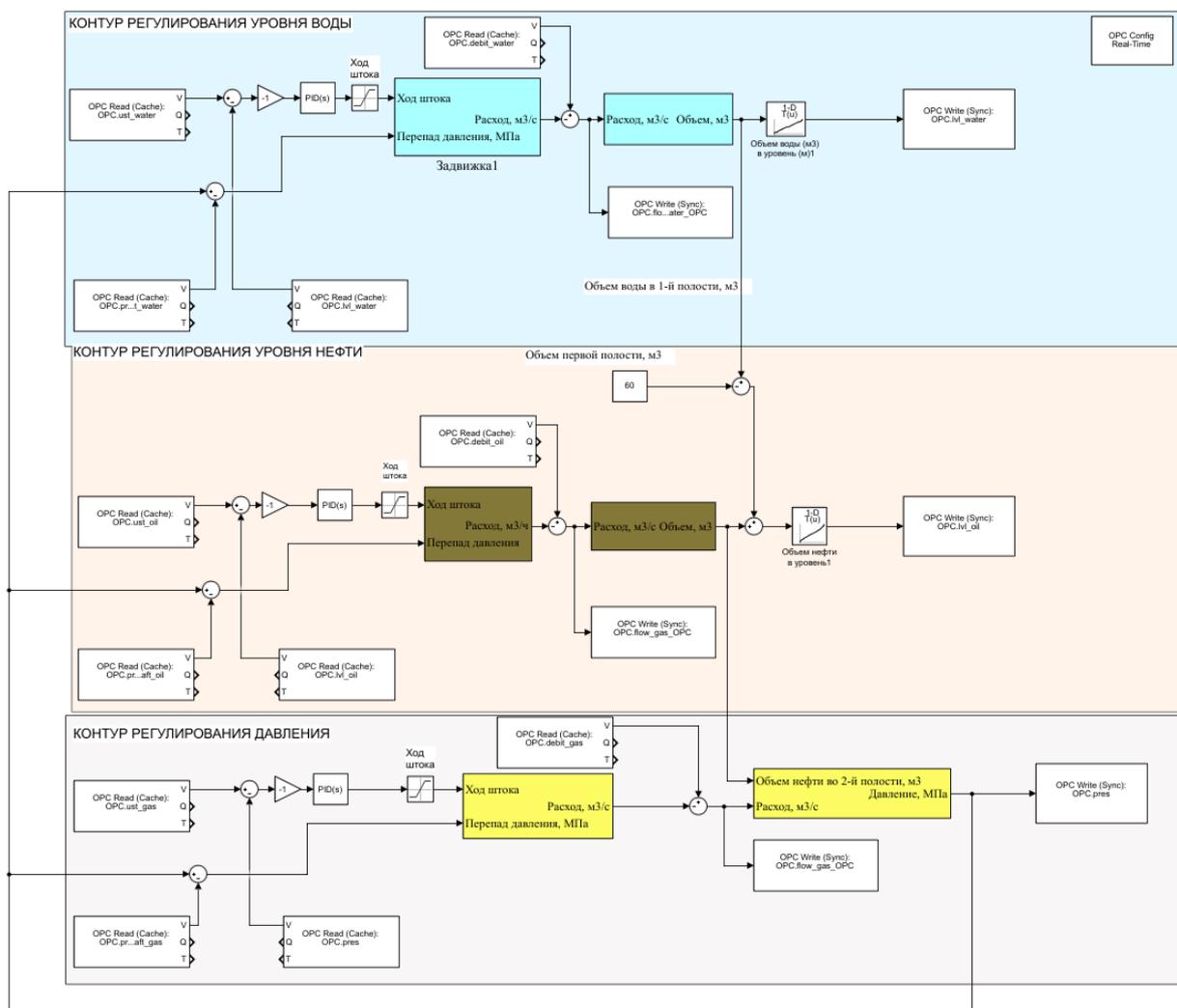


Рисунок 31 – Математическая модель с блоками OPC Write и OPC Read

3.5.4 Разработка экранных форм

Для удобной работы с цифровым двойником была разработана SCADA-система, позволяющая переключаться между режимом управления и мониторинга реального процесса, и режимом цифрового двойника.

Во вкладке «Физический процесс» представлены все основные параметры реального физического процесса. Также там можно задавать уставки.

Во вкладке «Цифровой двойник», представленной на рисунке 32, можно управлять математической моделью, созданной в Matlab. Здесь можно выбирать вручную значения давления, температуры и уровня, которые будут использоваться системой для моделирования процесса. Также можно брать эти значения с реального технологического процесса. Значения расходов, уровня

нефти и воды, давления газа, а также степени открытия задвижек поступают с моделируемой системы.

Также имеется вкладка для просмотра информации с базы данных, эта информация может использоваться для того, чтобы посмотреть, как протекал процесс в определенное время.

Во вкладке «Тренды» отслеживается динамика технологического процесса.

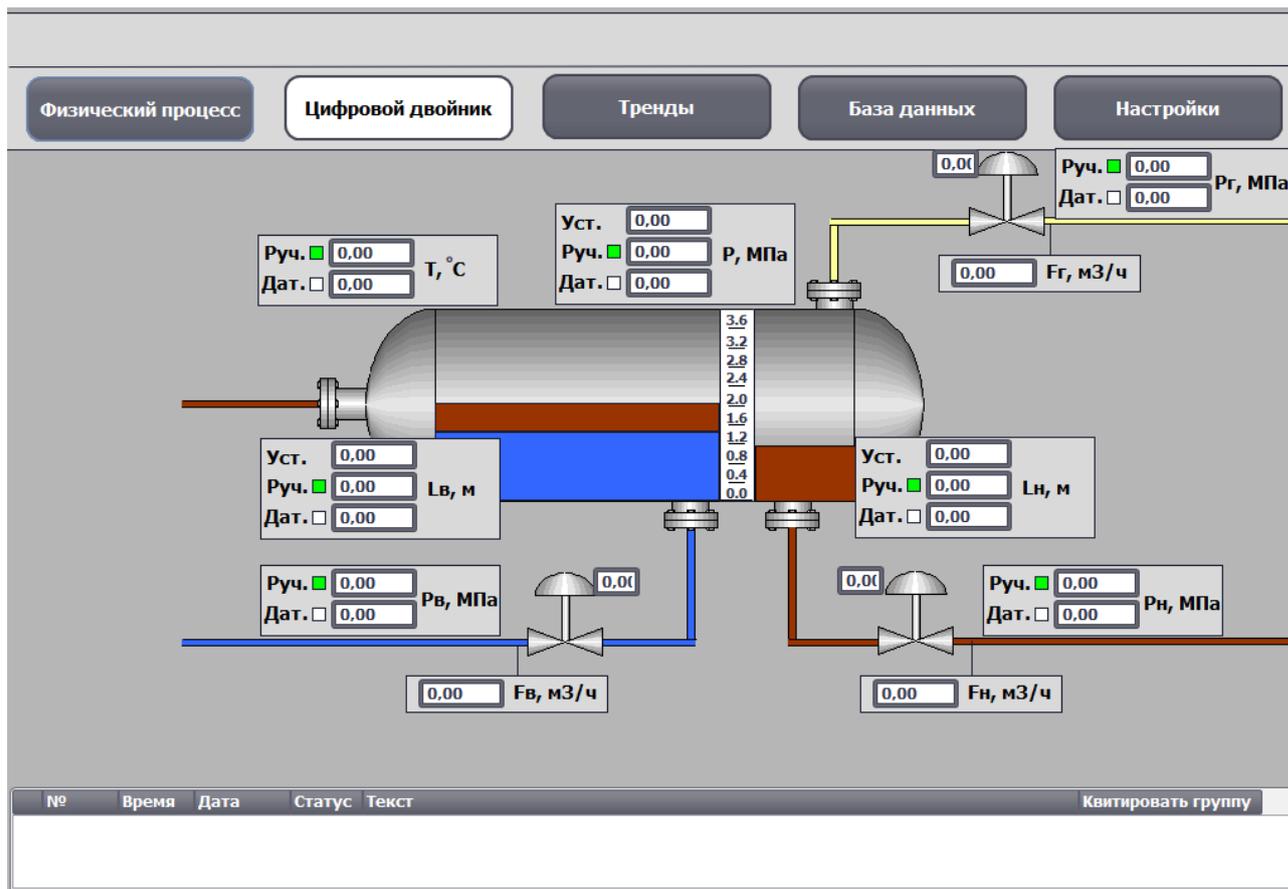


Рисунок 32 – Экранная форма

3.5.5 Применение цифрового двойника для модернизации системы управления

Для уменьшения возмущений и выбросов продуктов, используется принцип регулирования по возмущению. Если внешние возмущения, воздействующие на объект управления, можно измерять до того, как они пройдут на выход системы, тогда вводятся коррективы в алгоритм управления по результатам этих измерения, которые компенсировали бы данные возмущениями. На кустовой площадке устанавливается автоматизированная

групповая замерная установка (АГЗУ), которая периодически отбирает пробы с добываемой в скважинах нефти. АГЗУ осуществляет сепарацию отобранной эмульсии и определяет содержание в ней нефти. Если брать эту информацию, то можно предугадать изменение содержания нефти в эмульсии, поступающий в трехфазный сепаратор. Также на АГЗУ можно анализировать содержание воды и газа в эмульсии, информацию о котором тоже можно использовать.

В связи с этим в контур добавляется компенсирующая цепь, представленная на рисунке 33.

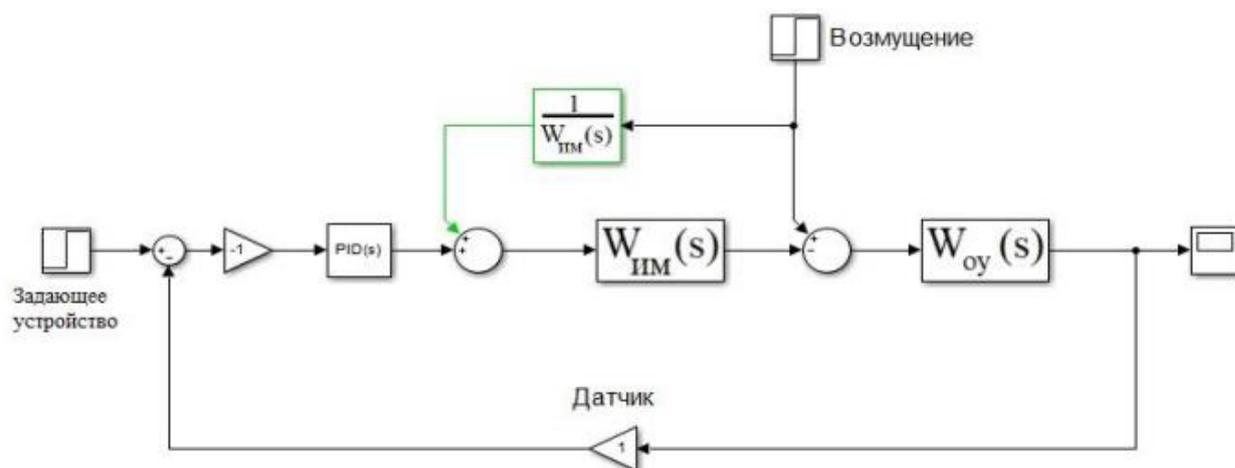


Рисунок 33 – Компенсация по возмущению

Таким образом полная математическая модель трехфазного сепаратора с компенсацией по возмущению будет выглядеть следующим образом:

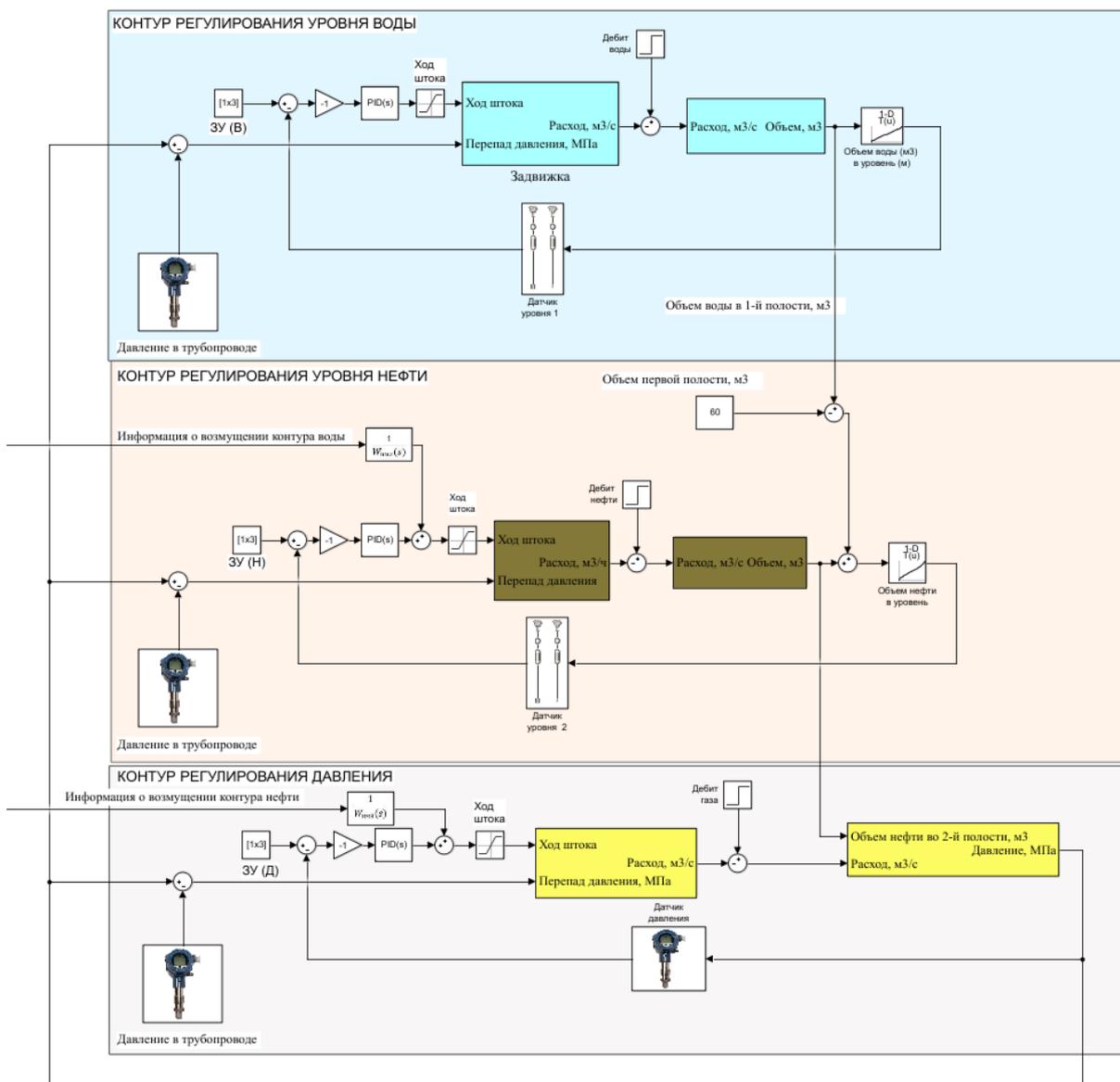


Рисунок 34 – Модель с компенсированием по возмущению

Компенсация по возмущения по давлению не была выполнена так как влияние давления на остальные контуры слишком мало и им можно пренебречь. Строится компенсация по возмущению уровня воды следующим образом: возмущение, возникающее в контуре регулирования уровня воды, поступает в контур регулирования уровня нефти, поэтому после ПИД-регулятора ставится сумматор и совершаются структурные преобразования. Так как в контуре регулирования есть интегратор, соответственно в прямой связи (компенсирующая цепь) ставится дифференциатор. Переходные процессы изменяются следующим образом:

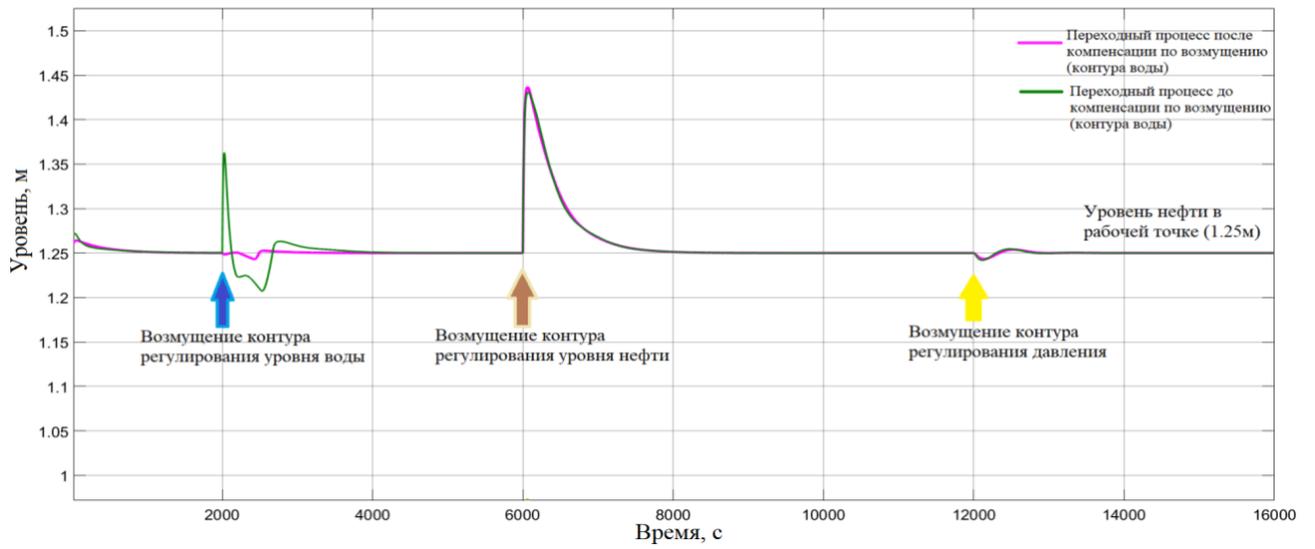


Рисунок 35 – Компенсация возмущения контура уровня воды

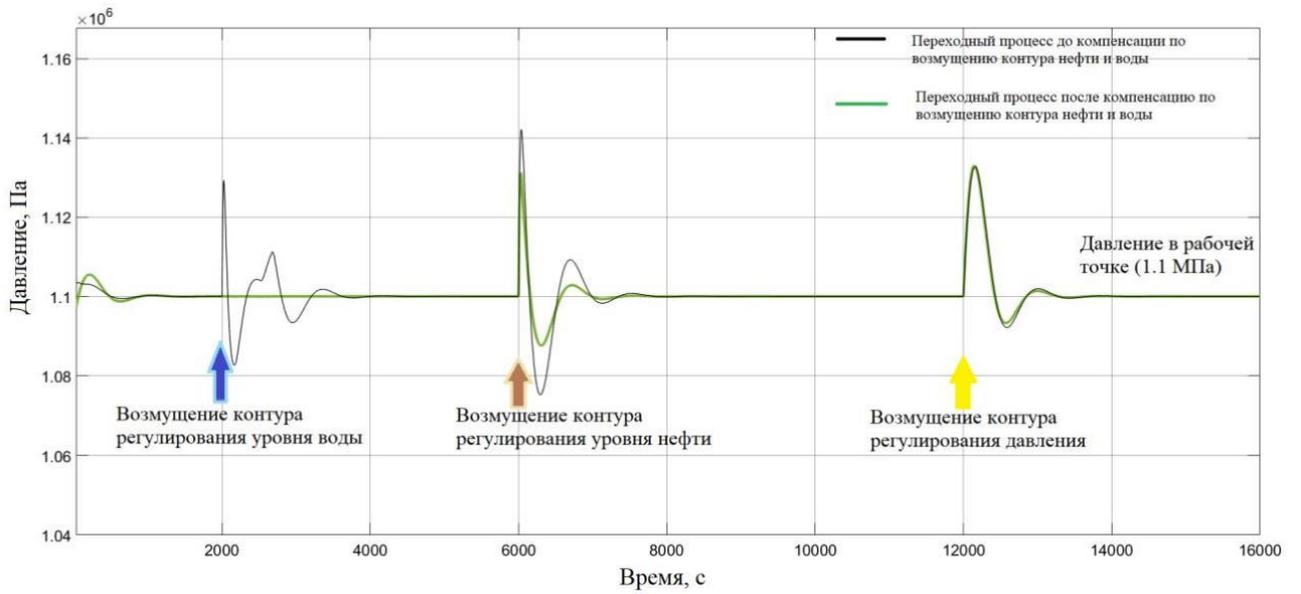


Рисунок 36 – Компенсация возмущения контуров уровня нефти и давления

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время такое понятие как коммерческая ценность разработки является одним из важнейших факторов, определяющим насколько перспективно и ценно будет научное исследование на первых этапах жизненного цикла. Именно коммерческая ценность выступает необходимым условием при поиске финансирования для проведения различных испытаний и внедрения разработки в производство.

Главной целью создания раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы

4.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

Для реализации проекта необходимы два исполнителя – научный руководитель (НР), инженер (И) – в его роли действует исполнитель НИР (ВКР). Разделим выполнение дипломной работы на этапы, представленные в таблице 7.

Таблица 7 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Выбор темы ВКР	НР, И	НР – 100% И – 30%
Составление и утверждение технического задания	НР, И	НР – 100% И – 20%
Подбор и изучение материалов по теме	НР, И	НР – 20% И – 100%
Календарное планирование работ	НР, И	НР – 100% И – 10%
Описание технологического процесса	И	И – 100%

Окончание таблицы 7 - Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Разработка функциональной схемы автоматизации по ГОСТ и ANSI/ISA	И	И – 100%
Создание математической модели в среде Simulink MatLab	НР, И	НР – 20% И – 100%
Настройка OPC сервера	И	И – 100%
Программирование в среде TIA Portal	И	И – 100%
Создание графического интерфейса пользователя	И	И – 100%
Разработка базы данных	И	И – 100%
Соединение базы данных с TIA Portal	НР, И	НР – 20% И – 100%
Написание раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	И	И – 100%
Написание раздела «социальной ответственности»	И	И – 100%
Проверка работы с руководителем	НР, И	НР – 100% И – 10%
Составление пояснительной записки	НР, И	НР – 30% И – 100%
Подготовка презентации дипломного проекта	И	И – 100%

4.1.1 Продолжительность этапов работ

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min i} + 2 \cdot t_{\max i}}{5}, \quad (21)$$

где t_{\min} – минимальная трудоемкость i -ой работы, чел/дн.;

t_{\max} – максимальная трудоемкость i -ой работы, чел/дн.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ($T_{РД}$) ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д}, \quad (22)$$

где $t_{ож}$ – продолжительность работы, дн.,

$K_{ВН}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, примем данный коэффициент $K_{ВН} = 1$;

$K_{Д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ (примем $K_{Д} = 1,1$).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К}, \quad (23)$$

где $T_{КД}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях,

$T_{К}$ – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле:

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (24)$$

где $T_{КАЛ}$ – календарные дни,

$T_{ВД}$ – выходные дни,

$T_{ПД}$ – праздничные дни.

Рассчитаем коэффициент календарности для пятидневной рабочей недели:

$$T_k = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{366}{366 - 118} = 1,47. \quad (25)$$

В таблице 8 приведены продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. Стоит отметить, что величины трудоемкости этапов по исполнителям $T_{\text{кд}}$ позволяют построить линейный график осуществления проекта, представленный на рисунке 37.

Таблица 8 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.-дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
Выбор темы ВКР	НР, И	2	4	2,8	3,1	0,9	4,5	1,4
Составление и утверждение технического задания	НР, И	3	5	3,8	4,2	0,8	6,1	1,2
Подбор и изучение материалов по теме	НР, И	6	8	6,8	1,5	7,5	2,2	11,0
Календарное планирование работ	НР, И	2	3	2,4	2,6	0,3	3,9	0,4
Описание технологического процесса	И	4	6	4,8	0,0	5,3	0,0	7,8
Разработка функциональной схемы автоматизации по ГОСТ и ANSI/ISA	И	3	5	3,8	0,0	4,2	0,0	6,1
Создание математической модели в среде Simulink MatLab	НР, И	9	12	10,2	2,2	11,2	3,3	16,5
Настройка OPC сервера	НР	5	7	5,8	0,0	6,4	0,0	9,4
Программирование в среде TIA Portal	И	6	9	7,2	0,0	7,9	0,0	11,6
Создание графического интерфейса пользователя	И	7	9	7,8	0,0	8,6	0,0	12,6

Окончание таблицы 8 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.-дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
Разработка базы данных	И	5	7	5,8	0,0	6,4	0,0	9,4
Соединение базы данных с ТИА Portal	НР, И	4	6	4,8	1,1	5,3	1,6	7,8
Написание раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	И	3	5	3,8	0,0	4,2	0,0	6,1
Написание раздела «Социальной ответственности»	И	2	3	2,4	0,0	2,6	0,0	3,9
Проверка работы с руководителем	НР, И	2	3	2,4	2,6	0,3	3,9	0,4
Составление пояснительной записки	НР, И	5	7	5,8	1,9	6,4	2,8	9,4
Подготовка презентации дипломного проекта	И	2	4	2,8	0,0	3,1	0,0	4,5
Итого				83,2	19,3	81,3	28,3	119,5

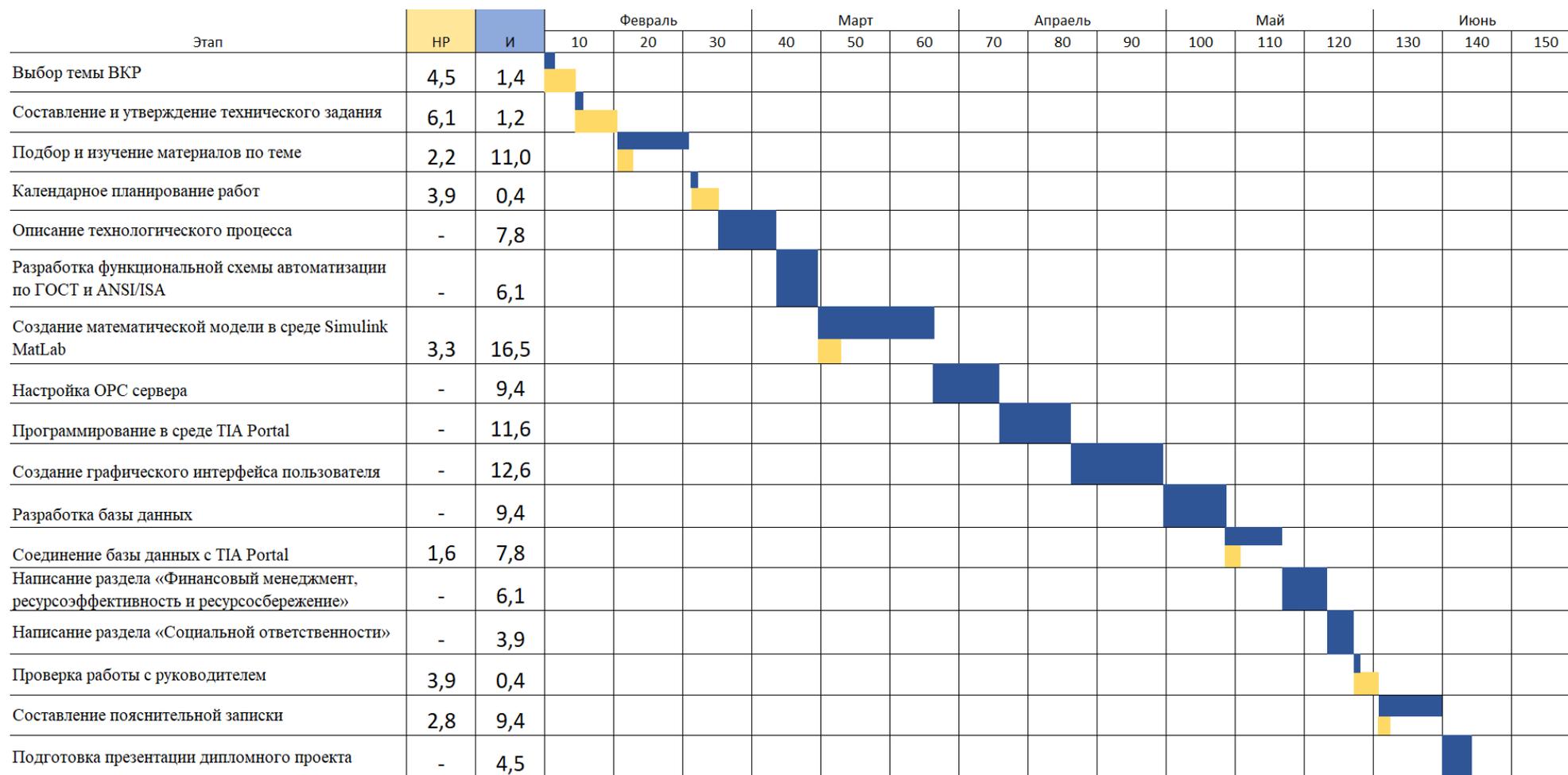


Рисунок 37 – Линейный график осуществления проекта

4.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные) расходы.

4.2.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Кроме того, статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы. Примем их как 10% от отпускной цены закупаемых материалов. Затраты на материалы сведены в таблице 9.

Таблица 9 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Лицензионное ПО MatLab	5600	1 экз.	5600
Лицензионное ПО Microsoft Office 2019	3200	1 экз.	3200
Лицензионное ПО TIA Portal	14600	1 экз.	14600

Продолжение таблицы 9 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	210	1 уп.	210
Картридж для принтера	1900	1 шт.	1900
Ручки, карандаши и маркеры	170	2 уп.	340
Итого			25850

Расходы на материалы с учетом ТЗР будут равны: $C_{\text{мат}} = 25850 * 1,1 = 28435$ руб.

4.2.2 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = MO/20,6, \quad (26)$$

учитывающей, что в году 248 рабочих дней и, следовательно, в месяце в среднем 20,6 рабочих дня (при пятидневной рабочей неделе).

Расчеты затрат на полную заработную плату приведены в таблице 10. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 8. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{\text{ПР}} = 1,1$; $K_{\text{доп.ЗП}} = 1,113$; $K_{\text{р}} = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент $K_{\text{и}} = 1,1 * 1,113 * 1,3 = 1,6$. Данные значения взяты для пятидневной рабочей недели.

Таблица 10 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/п., руб.
НР	33 664	1634	20	1,6	52 288
И	13 500	655	82	1,6	85 936
Итого					138 224

4.2.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30% от полной заработной платы по проекту, т.е. $C_{\text{соц.}} = C_{\text{зп}} * 0,3$.
Итак, в нашем случае $C_{\text{соц.}} = 138\ 224 * 0,3 = 41\ 467,2$ руб.

4.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{Э}}, \quad (27)$$

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

$Ц_{\text{Э}}$ – тариф на 1 кВт·час,

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

Для ТПУ $Ц_{\text{Э}} = 6,59$ руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 8 для инженера ($T_{\text{рд}}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов:

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} * K_t, \quad (28)$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{\text{рд}}$, примем данный коэффициент равным 0,7.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном.}} * K_C, \quad (29)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность оборудования, кВт, $K_C \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности $K_C = 1$.

Расчет затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{об}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{об}}$, кВт	Затраты $\Delta_{\text{об}}$, руб.
Персональный компьютер	656*0,7	0,3	907,8
Струйный принтер	3	0,1	2
Итого			909,8

4.2.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта.

Используется формула:

$$C_{\text{ам}} = \frac{N_A * C_{\text{об}} * t_{\text{рф}} * n}{F_{\text{д}}}, \quad (30)$$

где N_A – годовая норма амортизации единицы оборудования,

$C_{\text{об}}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР,

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из фактического режима его использования в текущем календарном году,

$t_{\text{рф}}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта,

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Для определения N_A следует обратиться к фрагменту из постановления правительства РФ «О классификации основных средств, включенных в

амортизационные группы». Оно позволяет получить рамочные значения сроков амортизации (полезного использования) оборудования (СА). Для ПК это $2 \div 3$ года. Необходимо задать конкретное значение СА из указанного интервала, примем это значение 2 года. Далее определяется N_A как величина обратная СА, в данном случае это 0,5. Аналогичное значение будет для принтера.

Рассчитаем C_{AM} для ПК. Стоимость ПК 65000 руб., время использования 656 часа, $N_A = 0,5$, $F_D = 248 \cdot 8 = 1984$ часов (для пятидневной рабочей недели):

$$C_{AM} = \frac{0,5 \cdot 65000 \cdot 656 \cdot 1}{1984} = 10\,746 \text{ руб.} \quad (31)$$

Рассчитаем C_{AM} для принтера. Стоимость принтера 5400 руб., время использования 3 часа, $N_A = 0,5$, $F_D = 300$ часов:

$$C_{AM} = \frac{0,5 \cdot 5400 \cdot 3 \cdot 1}{300} = 27 \text{ руб.} \quad (32)$$

Итого начислено амортизации 10 773 руб.

4.2.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных документов

К данному пункту можно отнести плату за услуги интернет-связи за 5 месяцев (февраль-июнь) при ежемесячной плате 340 рублей. Таким образом, $C_{нп} = 340 \cdot 5 = 1700$ руб.

4.2.7 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$C_{проч.} = (C_{мат} + C_{зп} + C_{соц} + C_{эл.об.} + C_{ам} + C_{нп}) \cdot 0,1 = (28\,435 + 138\,224 + 41\,467,2 + 909,8 + 10\,773 + 1700) \cdot 0,1 = 22\,150,9 \text{ руб.} \quad (33)$$

4.2.8 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта.

Таблица 12 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	Смат	28 435
Основная заработная плата	Сзп	138 224
Отчисления в социальные фонды	Ссоц	41 467,2
Расходы на электроэнергию	Сэл.	909,8
Амортизационные отчисления	Сам	10 773
Непосредственно учитываемые расходы	Снр	1700
Прочие расходы	Спроч	22 150,9
Итого		243 659,9

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 243\ 659,9$ руб.

4.2.9 Расчет прибыли

В связи с тем, что мы не располагаем данными для определения точной величины прибыли примем данное значение как 17% от полной себестоимости проекта. Таким образом, прибыль составляет 41 422,18 руб.

4.2.10 Расчет НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это:

$$\text{Ц}_{\text{НДС}} = (243\ 659,9 + 41\ 422,18) * 0,2 = 57\ 020,42 \text{ руб.} \quad (34)$$

4.2.11 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$\text{Ц}_{\text{НИР(КР)}} = 243\ 659,9 + 41\ 422,18 + 57\ 020,42 = 342\ 122,5 \text{ руб.} \quad (35)$$

4.3 Оценка экономической эффективности проекта

Актуальным аспектом качества выполненного проекта является экономическая эффективность его реализации, т.е. соотношение обусловленного ей экономического результата (эффекта) и затрат на разработку проекта. Цифровые двойники однозначно положительно сказываются на экономических показателях работы предприятия и решают следующие задачи:

- Разработка системы автоматизации не требует использования реального оборудования, большинство тестов могут проводиться на математической модели;
- Использование цифрового двойника в ходе работы предприятия позволяет предотвращать аварийные ситуации;
- Цифровой двойник позволяет предсказывать изменение технико-экономических показателей работы.

Таким образом, разработанный проект имеет возможность повысить экономические показатели работы предприятия за счет экономии на оборудовании, используемом при разработке системы, предотвращения поломок оборудования и простоя, а также снижения трудоемкости контроля технологического процесса. Учитывая все вышеперечисленные преимущества, а также то, что в настоящий момент предприятие не использует технологию с цифровыми двойниками, можно ожидать уменьшение затрат на обслуживание оборудования на 7-12%, так как сократится необходимый парк оборудования и общее время его использования.

5 Социальная ответственность

Введение

В разделе социальная ответственность рассматриваются вопросы обнаружения и анализа вредных и опасных факторов труда на рабочем месте инженера, минимизация негативных последствий проектируемой деятельности в соответствии с требованиями санитарных норм и правил, техники безопасности и пожарной безопасности.

Целью работы является разработка цифрового двойника трехфазного сепаратора, входящего в состав дожимной насосной станции. В первую очередь стоит отметить основные задачи, которые будут решены при помощи введения цифрового двойника в систему автоматизированного управления:

- Повышение эффективности технологического процесса;
- Уменьшение человеческого фактора управления производством;
- Получение дополнительных данных используемых для принятия решений в ходе работы системы.

Объектом исследования является трехфазный сепаратор, входящий в состав дожимной насосной станции. Результатом работы является создание цифрового двойника трехфазного сепаратора, графического интерфейса пользователя, а также базы данных для хранения информации о ходе технологического процесса.

5.1 Описание рабочего места

Написание выпускной квалификационной работы проходило в рамках преддипломной практики в ОАР ИШИТР НИ ТПУ. На рисунке 38 представлен план кабинета, в котором осуществлялась трудовая деятельность. Ширина кабинета составляет 5м, а длина 7м.

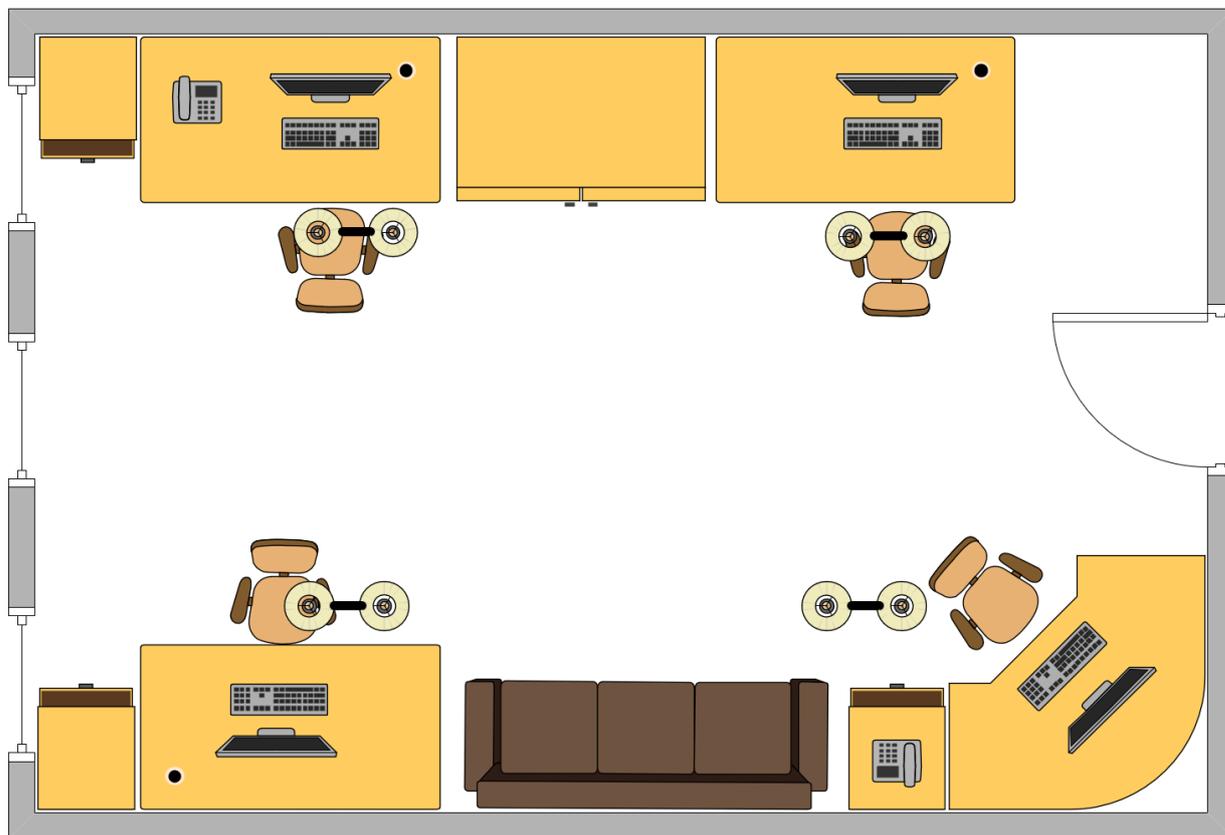


Рисунок 38 – План кабинета

В рамках выполнения ВКР было сделано следующее:

- подбор и изучение материалов по теме;
- описание технологического процесса;
- создание математической модели;
- настройка OPC сервера;
- программирование в среде TIA Portal;
- создание графического интерфейса пользователя.

5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Рабочее место должно быть организовано в соответствии с ГОСТ 12.2.032-78.

Рабочие места с персональными компьютерами по отношению к световым проемам должны располагаться так, чтобы естественный свет падал сбоку, желательно слева. Стол может быть любой конструкции, отвечающей современным требованиям эргономики. Целесообразно применение столов, имеющих отдельную от основной столешницы специальную рабочую поверхность для размещения клавиатуры. Используются рабочие столы с регулируемой и нерегулируемой высотой рабочей поверхности. При отсутствии регулировки высота стола должна быть в пределах (680 – 800) мм.

Глубина рабочей поверхности стола должна составлять 800 мм (допускаемая не менее 600 мм), ширина — соответственно 1 600 мм и 1 200 мм. Рабочая поверхность стола не должна иметь острых углов и краев, иметь матовую или полуматовую фактуру.

Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной — не менее 500 мм, глубиной на уровне колен — не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног — не менее 650 мм.

Клавиатура должна располагаться на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края, обращенного к пользователю.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии (600 – 700) мм, но не ближе 500 мм.

Для обеспечения физиологически рациональной рабочей позы, создания условий для ее изменения в течение рабочего дня применяются подъемно-поворотные рабочие стулья с сиденьем и спинкой, регулируемые по высоте и углам наклона, а также расстоянию спинки от переднего края сидения.

Конструкция стула должна обеспечивать:

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах (400-550) мм и углом наклона вперед до 15 градусов и назад до 5 градусов;
- высоту опорной поверхности спинки (300 ± 20) мм, ширину — не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости 400 мм;
- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах (0 ± 30) градусов;
- регулировку расстояния спинки от переднего края сидения в пределах (260 - 400) мм;
- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной (50 - 70) мм;
- регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах (200 ± 260) мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах (350 - 500) мм;

Рабочее место должно быть оборудовано подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20 град. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

Режим труда и отдыха предусматривает соблюдение определенной длительности непрерывной работы на ПК и перерывов, регламентированных с учетом продолжительности рабочей смены, видов и категории трудовой деятельности. При 8-часовой рабочей смене и работе на ПК регламентированные перерывы следует устанавливать через 2 часа от начала смены и через 2 часа после обеденного перерыва продолжительностью 15 минут каждый.

5.3 Производственная безопасность

В данной части работы рассматриваются вредные и опасные факторы, которые могут возникнуть во время разработки и эксплуатации системы. В соответствии с ГОСТ 12.0.002-80 вредным производственным фактором является производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях может привести к заболеванию, снижению работоспособности и (или) отрицательному влиянию на здоровье потомства, а опасным производственным фактором – фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к травме, острому отравлению или другому внезапному резкому ухудшению здоровья, или смерти.

Возможные опасные и вредные факторы сведены в таблицу 12.

Таблица 12 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ		Нормативные документы
	Разработка	Эксплуатация	
Повышенный уровень шума	+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности
Поражение электрическим током	+	+	ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
Отклонение показателей микроклимата	+	+	ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений
Повышенный уровень электромагнитных излучений	+	+	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.
Ионизирующее излучение	+	+	ГОСТ 15484-81 Излучения ионизирующие и их измерения, термины и определения

5.4 Анализ опасных и вредных факторов

5.4.1 Повышенный уровень шума

Важной характеристикой рабочего помещения является уровень шума. Шумом называют совокупность различных звуков, возникающих в процессе работы или действующих извне, которые неблагоприятно воздействуют на организм. Длительное воздействие шума может отрицательно сказаться на здоровье работника, а также на его производительность, так как может приводить к потере концентрации.

При работе в кабинете учебного корпуса, в котором отсутствует какое-либо оборудование кроме персональных компьютеров, могут действовать следующие источники шума:

- шум систем охлаждения ПК;
- уличный шум;
- бытовые шумы.

Для выполняемых работ (легкая физическая нагрузка, напряженный труд 1 степени) уровень звука не должен превышать 60дБА. Для уменьшения шумов, генерируемых персональными компьютерами, рекомендуется проводить их регулярную диагностику, выполнять чистку и устранение неисправностей. Для уменьшения уличного шума, при наличии в помещении окон, выходящих на разные стороны улицы, можно открывать их только на той стороне, где воздействие уличного шума меньше. Для устранения бытовых шумов может быть применена звукоизоляция.

5.4.2 Электробезопасность

Во время работы возможно поражение электрическим током, проходящим от сети 220 В к ПЭВМ. Электрический ток, при прохождении через тело человека может вызывать ожоги в местах прикосновения к токоведущим частям, поражение внутренних органов и остановку сердца.

Основными факторы, определяющими опасность поражения электрическим током являются:

- электрическое сопротивление тела человека;
- пути тока через тело человека;
- продолжительность воздействия электрического тока;
- величина напряжения и тока;
- род и частота электрического тока;
- условия внешней среды;
- состояние человека.

Помещение, где расположены ПЭВМ, относится к помещениям без повышенной опасности.

К основным техническим средствам защиты от поражения электрическим током относятся:

- основная изоляция токоведущих частей;
- защитное заземление или зануление;
- автоматическое отключение питания;
- защитное электрическое разделение цепей.

Перед началом работы следует убедиться в отсутствии свешивающихся со стола или висящих под столом проводов электропитания, в целостности вилки и провода электропитания, в отсутствии видимых повреждений аппаратуры и рабочей мебели.

5.4.3 Отклонение показателей микроклимата рабочей зоны

Основными показателями, характеризующими микроклимат в помещении, являются:

- температура воздуха;
- температура поверхностей;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;

- интенсивность теплового облучения.

Производственный микроклимат в помещении существенно сказывается на качестве работы и производительности труда, а также на здоровье работников. Ниже представлены оптимальные и допустимые нормы микроклимата [24].

Таблица 13 – Оптимальные и допустимые нормы микроклимата

Период года	Температура, °С				Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с		
	Оптимальная	Допустимая на рабочих местах				Оптимальная	Допустимая	Оптимальная, не более	Допустимая, не более
		Верхняя		Нижняя					
		Пост.	Не пост.	Пост.	Не пост.				
Холодный	23-24	25	26	21	18	40-60	75	0,1	0,1
Теплый	23-25	28	30	22	20	40-60	70	0,1	0,1

В помещении, где будет производиться работа, температура и влажность воздуха должны поддерживаться в соответствии с таблицей 13 путем применения следующих мероприятий: устройство систем вентиляции, кондиционирование воздуха и отопление помещения.

5.4.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Производственное освещение — неотъемлемый элемент условий трудовой деятельности человека.

При правильно организованном освещении рабочего места сохраняется зрение человека и нормальное состояние его нервной системы, а также обеспечивается безопасность в процессе производства.

Производительность труда и качество выпускаемой продукции находятся в прямой зависимости от освещения.

Рабочая зона освещается таким образом, чтобы можно было отчетливо видеть процесс работы, не напрягая при этом зрения. Осветительные приборы и

рабочее место располагаются таким образом, чтобы отсутствовало прямое попадание лучей источника света в глаза.

Уровень необходимого освещения определяется степенью точности зрительных работ. Наименьший размер объекта различения составляет 0.5 – 1 мм. В помещении присутствует естественное освещение. По нормам освещенности и отраслевым нормам, работа за ПК относится к зрительным работам средней точности для любого типа помещений. По этим условиям необходимо обеспечить следующие показатели освещенности:

- освещенность на рабочей поверхности от системы общего освещения – 300 лк;
- коэффициент пульсации не более 5%;
- для естественного бокового освещения КЕО 1,5%.

Далее приводится расчет освещенности рабочего места для кабинета 027, корпуса 10 ТПУ. Данный расчет сводится к выбору системы освещения, определению необходимого числа светильников и их типа. Искусственное освещение выполняется посредством электрических источников света: ламп накаливания и люминесцентных ламп. Люминесцентные лампы имеют ряд преимуществ: по спектральному составу света они близки естественному свету; обладают высоким КПД (в 1,5-2 раза выше, чем КПД ламп накаливания); обладают повышенной светоотдачей (в 3-4 раза выше, чем у ламп накаливания); имеют более длительный срок службы.

Основным методом расчета общего равномерного освещения при горизонтальной рабочей поверхности является метод светового потока (коэффициента использования) [27]. Необходимый световой поток $\Phi_{л}$ (лм) от одной лампы накаливания или группы ламп светильника при люминесцентных лампах рассчитывают по формуле (34):

$$\Phi_{л} = \frac{E \cdot S \cdot z \cdot k}{N \cdot v \cdot n}, \quad (34)$$

где E – нормированная минимально-допустимая освещенность (300 лк);

S – площадь освещаемого помещения (35 м^2);

z – коэффициент неравномерности освещения, который зависит от типа ламп (для ламп накаливания и дуговых ртутных ламп — 1,15, для люминесцентных ламп — 1,1);

k – коэффициент запаса, учитывающий запыление светильников и снижение светотдачи в процессе эксплуатации, зависящий от вида технологического процесса, выполняемого в помещении (согласно [27] значения коэффициента запаса k равно 1,5);

N – число светильников в помещении;

v – коэффициент затенения, который вводится в расчет только при наличии крупногабаритного оборудования, затеняющего рабочее пространство (в данном случае равняется 1);

n – коэффициент использования светового потока ламп, учитывающий долю общего светового потока, приходящуюся на расчетную плоскость, и зависящий от типа светильника, коэффициента отражения потолка $\rho_{\text{п}}$ и стен $\rho_{\text{с}}$, высоты подвеса светильников, размеров помещения, определяемых индексом i помещения.

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)}, \quad (35)$$

где S – площадь помещения, $S = 35 \text{ м}^2$;

h – расчетная высота подвеса, $h = 3,2 \text{ м}$;

A – ширина помещения, $A = 5 \text{ м}$;

B – длина помещения, $B = 7 \text{ м}$.

По имеющимся данным рассчитаем индекс помещения:

$$i = \frac{35}{3,2 \cdot (5 + 7)} = 0,91. \quad (36)$$

Согласно таблице 2.2 значений коэффициента использования светового потока светильников [27], значение коэффициента использования $n = 0,42$.

Из полученных данных находим значение светового потока F :

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{300 \cdot 35 \cdot 1,1 \cdot 1,5}{8 \cdot 1 \cdot 0,42} = 5156 \text{ Лм.} \quad (37)$$

Таким образом необходимо оснастить светильники люминесцентными лампами типа ЛБ80, световой поток которых равен 5200 Лм, что соответствует требуемым значениям

5.4.5 Электромагнитные излучения

Научно-исследовательская работа выполнялась с помощью персонального компьютера (ПЭВМ). При этом основным вредным фактором для инженера-исследователя является электромагнитное излучение, которое влияет на костные ткани, ухудшает зрение, повышает утомляемость, а также может вызвать ослабление памяти и возникновение онкологических заболеваний.

В соответствии с ГОСТ 12.1.002—84, ССБТ «Электромагнитные поля токов промышленной частоты. Общие требования безопасности», нормы допустимых уровней напряженности электромагнитных полей зависят от времени пребывания человека в контролируемой зоне. Присутствие персонала на рабочем месте в течение 8 ч допускается при напряженности, не превышающей 5 кВ/м.

Последние разработки, в области производства LCD-дисплеев, позволяют значительно снизить уровень излучений и электромагнитных полей. Используемые дисплеи соответствуют стандарту ТСО'03, гарантируя диапазоны частот меньше 2,5 кВ/м, что удовлетворяет нормам. В следствии этого применение таких защитных мер как использование экранирующих устройств или средств индивидуальной защиты не имеет необходимости.

5.4.6 Ионизирующие излучения

Ионизирующее излучение оказывает на человека неблагоприятное воздействие и может быть причиной следующих проблем:

- нарушение свертываемости крови и увеличение хрупкости кровеносных сосудов;
- торможение функций кроветворных органов;

- понижение сопротивляемости организма к инфекционным заболеваниям.

При работе за компьютером в помещении учебного корпуса основным источником ионизирующего излучения является монитор.

Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. Конструкция ПЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы мягкого рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана и корпуса не более 1 мкЗв/час (100 мкР/час).

Для защиты от внешнего облучения, возникающего при работе с дисплеем, проводятся следующие мероприятия:

- для обеспечения оптимальной работоспособности и сохранении здоровья на протяжении рабочей смены должны устанавливаться регламентированные перерывы – при 8-часовом рабочем дне продолжительностью 15 минут через каждый час работы;

- дисплей устанавливается таким образом, чтобы от экрана до сотрудника было не менее 60-70 см;

- должны использоваться дисплеи со встроенными защитными экранами.

Для мониторов рекомендуется следующее дооснащение:

- защитный фильтр для экрана, ослабляющий переменное электрическое и электростатическое поля;

- для одиночных ЭВМ или их однорядном расположении – специальное защитное покрытие на переднюю па

- при многорядном расположении ЭВМ, если соседние рабочие места располагаются близко друг к другу (на расстоянии 1,2...2,5 м) – защитное покрытие задней и боковых стенок, монтирование специальных экранирующих панелей с задней и боковых сторон монитора, установка перегородок между различными пользователями.

5.5 Экологическая безопасность

Далее проведен анализ воздействия на окружающую среду.

Современные компьютеры непосредственно практически не оказывают никакого влияния на окружающую среду, так как электромагнитные излучения, производимые техникой, ничтожно малы, вибрации и шумы также практически неощутимы. С выполнением данной работы могут быть связаны негативно влияющие на природу факторы, сопутствующие эксплуатации ПК. Многие сырье, используемое в сборке компьютеров, является токсичным.

Следовательно, когда техника выходит из строя, возникает потребность в переработке отходов. Однако многие сегодня пренебрегают этим, поэтому отходы в виде неисправной техники не исчезают, превращаясь в свалки, производя негативное влияние на гидросферу и литосферу, или перерабатываются, что также приносит вред. Помимо техники, в рабочем процессе используются другие, сопутствующие рабочему процессу, материалы, которые так же при неправильной утилизации наносят вред окружающей среде. Это могут быть батарейки, люминесцентные лампы и т.д. Также необходимо рационально использовать природные ресурсы. Большое потребление бумаги ведет к вырубке лесов. Чрезмерное потребление электроэнергии ведет к увеличению выброса парниковых газов, что влияет на изменение климатических условий. Поэтому необходимо предпринимать различные меры для того, чтобы как можно больше сократить негативное влияние на окружающую среду.

В качестве таких мер можно рассматривать:

- использование экономного режима работы электротехники;
- использовать энергосберегающие лампы для освещения помещений;
- устанавливать режим освещения, соответствующий времени года;
- правильно утилизировать отходы (компьютерный лом, газоразрядные лампы, бумага и др.);
- применять расходные материалы с высоким коэффициентом использования и возможностью их полной или частичной регенерации;

5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Рассмотрим возможные чрезвычайные ситуации на объекте. Так как работа за компьютером не связана со взрывоопасными, радиоактивными или химическими веществами, а офисное помещение имеет категорию В, чрезвычайная ситуация, которая может возникнуть – ЧС техногенного характера – пожар, произошедший в результате нарушения правил пожарной безопасности или в результате электрического замыкания.

Основными причинами возникновения пожара считаются:

- использование неисправных электроприборов;
- перегрузка сети;
- курение не в специальных местах;
- оставление электрических приборов без присмотра на долгое время.

Согласно Федеральному закону от 22.07.2013 г. №123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», для того чтобы избежать возникновения пожара, необходимо предпринимать следующие меры:

- проводить инструктажи по пожарной безопасности;
- проводить учебные тревоги, чтобы сотрудники смогли сориентироваться в случае возникновения пожара;
- обеспечить наличие плана-эвакуации для каждого из помещений;
- обеспечить наличие огнетушителей или других средств для тушения пожара;
- обеспечить помещения пожарной сигнализацией (например, адресная-опросная или адресно-аналоговая);
- соблюдать правила пожарной безопасности при установке различных электроприборов в помещении, а также при его планировке;
- проходить проверку пожарной инспекцией согласно существующему графику.

В случае возникновения пожара, необходимо следовать следующим инструкциям:

- сообщить в пожарную службу охраны;
- дать сигнал тревоги в ручном режиме для эвакуации людей, если автоматическая пожарная сигнализация еще не сработала;
- оценить обстановку, убедиться в наличии опасности и определить, откуда она исходит.

Если после оценки ситуации сделан вывод о том, что пожар не представляет большой опасности, находится на начальной стадии и его можно потушить самостоятельно, то можно воспользоваться огнетушителем. Однако это допустимо только в том случае, если пожарная охрана уже оповещена о случившемся возгорании. Если потушить пожар самостоятельно не получается, то необходимо:

- немедленно покинуть помещение;
- идти в сторону, противоположную пожару;
- двигаться в сторону не задымленной лестничной клетки или к выходу.

Выводы по разделу

В рамках раздела «социальная ответственность» были выявлены и проанализированы наиболее вероятные вредные и опасные производственные факторы, а также предложены мероприятия по снижению уровней их воздействия на работника. Была приведена аннотация с описанием рабочего места и перечнем выполненных работ. Произведен расчет освещенности рабочего места. Помимо этого, в подразделе «экологическая безопасность» рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Также рассмотрены наиболее возможные чрезвычайные ситуации на рабочем месте и алгоритм действий при их возникновении.

Заключение

Данная работа посвящена созданию полноценного набора инструментов для осуществления моделирования. В ходе исследования была разработана пошаговая инструкция по осуществлению связи между контроллером Siemens S7-1200 и программным пакетом MATLAB. Также в процессе работы была построена математическая модель трехфазного сепаратора. Для более удобного управления системой был написан графический интерфейс управления в программном пакете WinCC Professional. Самым энергозатратным процессом является реализация готового продукта, построенного с помощью компьютерного моделирования. Это связано с аспектом неточности модели, которая не может учесть всех характеристик итоговой системы.

В первом разделе работы был проведен обзор источников литературы по тематике исследования и были освещены вопросы истории развития цифровых двойников, математического моделирования, а также о реализованных продуктах по данной тематике.

Во втором разделе был осуществлен обзор данного технологического процесса, приведены требования к разработке, а также обозначены цели и задачи.

В третьем разделе осуществлена разработка цифрового двойника. Для начала были определены этапы разработки, выбрано программное обеспечение и построена схема информационных потоков. Построена модель трехфазного сепаратора, входящего в состав дожимной насосной станции. Осуществлено соединение математической модели с программным пакетом TIA Portal для получения реальных данных с объекта. Написан код для передачи данных, а также разработана SCADA-система для управления процессом сепарации и работы с цифровым двойником сепаратора. Проведена модернизация системы добавлением компенсации по возмущениям контуров контроля уровня нефти и давления в сепараторе.

Также были рассчитана стоимость реализации проекта и его экономическая эффективность, а также вредны и опасные факторы.

Список литературы

1. Digital Twin: перспективы использования цифровых двойников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nfp2b.ru/2019/01/09/digitaltwin-perspektivy-ispolzovaniya-tsifrovyyh-dvoynikov/> . – Заглавие с экрана. – Дата обращения: 14.04.2020.
2. Гончаров А. С., Саклаков В. М. [Цифровой двойник: обзор существующих решений и перспективы развития технологии](#). elibrary.ru (2018). — Статья в сборнике трудов Всероссийской научно-практической конференции. Дата обращения 28.04.2020.
3. Jack Reid and Donna Rhodes, Digital system models: An investigation of the non-technical challenges and research needs, Conference on Systems Engineering Research, Systems Engineering Advancement Research Initiative, Massachusetts Institute of Technology, 2016.
4. Сущность математического моделирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studopedia.su/8_2926_sushchnostmatematicheskogo-modelirovaniya.html . – Заглавие с экрана. – Дата обращения: 26.04.2020.
5. Советов Б. Я., Яковлев С. А. [Моделирование систем: Учеб. для вузов](#). — 3-е изд., перераб. и доп.. — М.: Высш. шк., 2001. — 343 с.
6. Комягин А. Ф., Автоматизация производственных процессов и АСУ ТП газонефтепроводов. Ленинград, 1983. – 376 с.
7. Попович Н. Г., Ковальчук А.В., Красовский Е.П., Автоматизация производственных процессов и установок. – К.: Вицашк. Головное издво, 1986. – 311с.
8. Нефтегазовые сепараторы со сбросом воды НГСВ [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.tehnoeo.ru/product/separ/separato2/> Дата обращения 20.04.2020.
9. Датчики уровня ДУУ2М [Электронный ресурс] Режим доступа: http://albatros.nt-rt.ru/images/manuals/ATS_DUUM/ATS_DUU2M_RE.pdf Дата обращения 20.04.2020.

10. Расходомеры электромагнитные Метран-150 [Электронный ресурс]
Режим доступа: http://mtnii.nt-rt.ru/images/manuals/Metran_150.pdf Дата обращения 20.04.2020
11. Фланцевый термометр сопротивления. С защитной гильзой. Модель TR10-F. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.wika.ru/upload/DS_TE6006_ru_ru_73802.pdf
12. Расходомеры электромагнитные Rosemount 8700 [Электронный ресурс] Режим доступа: http://metr-k.ru/files/products/rosemount/rosemount8700/Rosemount_8700_rashodomery_elektr_omagnitnye.pdf
13. ГОСТ 21552-84 «Средства вычислительной техники. Общие технические требования, правила приемки, методы испытаний, маркировка, упаковка, транспортирование и хранение»
14. ГОСТ 24.104-85 ЕСС АСУ «Автоматизированные системы управления. Общие требования»
15. ГОСТ 21.408-2013 «Система проектной документации для строительства (СПДС). Правила выполнения рабочей документации автоматизации технологических процессов (с Поправками)»
16. S Masaeв. [Destruction of the Resident Enterprise in the Special Economic Zone with Sanctions](#) // IEEE. — 2019.
17. ПЛК S7-1200 [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.siemens-pro.ru/docs/simatic/s7-1200/05_S7_1200_2015_rupart-1.pdf
18. OPC технология [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://opcserver.ru/services/opc-tekhnologiya/>. – Заглавие с экрана. – Дата обращения: 15.05.2020.
19. OPS Foundation. What is OPS? [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/> - Дата обращения: 15.05.2020 г
20. MATLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://matlab.ru/products/matlab>. – Заглавие с экрана. – Дата обращения: 15.05.2020.

21. Ram S. Mohan, Ovadia Shoham, 1999. Design and Development of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Compact Separators for Three-Phase Flow. In: Oil and Gas Conference – Technology Options for Producers' Survival, Dallas, Texas 28–30 June 1999. Dallas: DOE and PTTC.

22. Программное обеспечения в TIA Portal [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://new.siemens.com/ru/ru/produkty/avtomatizacia/industry-software/automation-software/tia-portal/programmnoe-obespechenie.html>. – Заглавие с экрана. – Дата обращения: 20.05.2020

23. Documentation for the Siemens S7-1200 URL: <https://new.siemens.com/fr/fr/produits/automatisation-entrainements/systemes-automatisation/industrial/plc/simatic-s7-1200.html>

24. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

25. ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений.

26. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

27. Сапронов, Ю.Г. Аттестация рабочих мест по условиям освещённости: лабораторный практикум по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности». – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2010. – 64 с.

28. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.

29. ГОСТ 15484-81 Излучения ионизирующие и их измерения, термины и определения

30. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

31. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

Приложение А

(обязательное)

Development of a digital twin of the unit of an automated control system of a booster pump station

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Гуля Владислав Васильевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Каранкевич Андрей Геннадьевич	к.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

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

2. Development requirements

2.1 Object description

Booster Pump Stations (BPS) are used when there is little reservoir energy in the reservoirs to transport oil and water to Central Processing Facility (CPF) and Preliminary Water Discharge Unit (PWDU). Preliminary separation of oil and gas is carried out at the BPS so that it can carry out uncompressed transportation of gas to the Gas Processing Plant (GPP). Oil receives additional pressure with the help of pumps and is transported to high-pressure sections through collection and preparation systems. Also, preliminary collection and preparation of produced water is carried out, and its transportation to the Cluster Pump Station (CPS).

A layout of the booster pump station is shown in Figure 1.

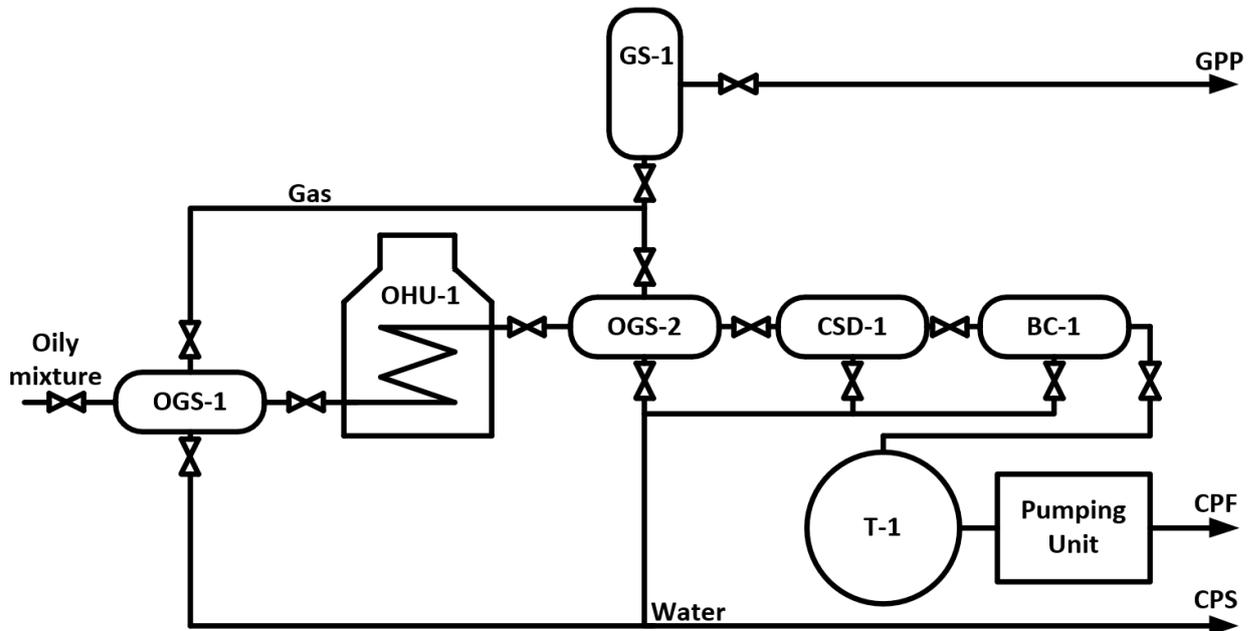


Figure 1. Technological layout of booster pump station

The oily mixture from the field bushes enters three-phase separators, where it passes the first separation stage. After that, the gas, which was separated in a three-phase separator, enters the gas separator and from there to the Gas Processing Plant.

Oil from the three-phase separator is pumped into the oil-heating unit for heating. After that, the heated oil enters the separator for the second stage of separation. After this stage, the oil is finally degassed and enters the Crude Settling Drum. Water

is separated from oil in Crude Settling Drum and pumped to the Cluster Pump Station along with the water that was obtained in the previous steps.

Oil enters the buffering capacity for final dehydration and is then pumped to the Central Processing Facility.

2.2 The main goals and objectives of the digital twin

In this paper, we consider the development of a digital twin of the unit of an automated control system of a booster pump station. This is a three-phase separator control unit in which the oil emulsion passes the first separation stage.

It includes:

- three-phase separator;
- flow meters;
- level switches;
- pressure sensors;
- level gauges;
- temperature sensor;
- actuators.

The digital twin of this unit should provide:

- imitation of the operation of the production line;
- testing of operating modes of the production process;
- fault location.

The main goals of creating a digital twin:

- reduce labor and financial costs for the modernization of the process;
- monitor trends in technological equipment failure;
- accumulate information about the process;
- increase production efficiency.

2.3 Description of the technological process of the selected unit

Figure 2 shows a diagram of the three-phase separator used. (NGSV 1,6 – 3400)

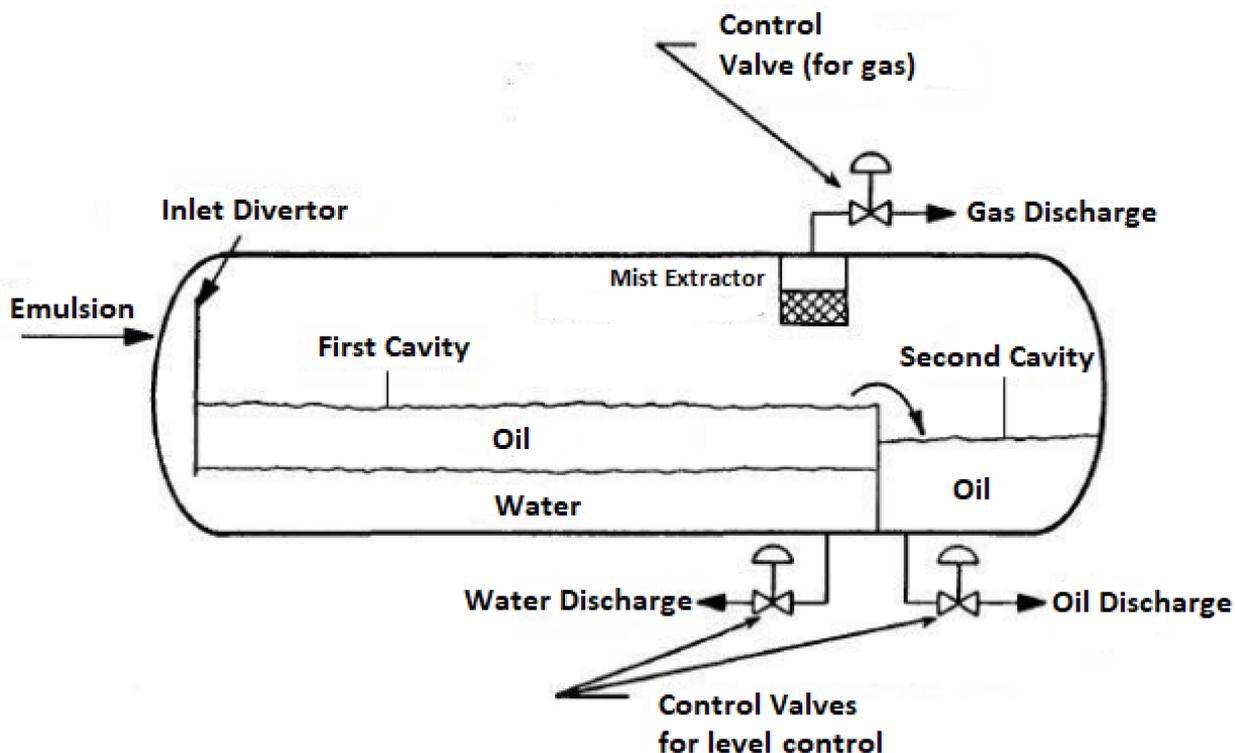


Figure 2. Three phase separator layout

The gas-liquid mixture is introduced into the separator through a fitting, which is equipped with a device for receiving a gas-liquid mixture of a cyclone type. It produces free gas. The separated gas is collected in the upper part of the apparatus, the drip liquid capture device passes and is discharged through the gas outlet fitting. The separator is divided by partitions into two cavities. The oil emulsion is dehydrated in the first cavity. Oil after separation of gas and water is collected in the second cavity. Separated water accumulates in the lower part of the first cavity and is discharged through a water outlet fitting.

The oil level in the separator is determined by a level gauge (DUU2M) and is supported by a control valve which is located on the flow line from the heat exchanger.

The gas pressure in the device is determined by a pressure sensor (Metran-150CG) and is supported by a control valve that is installed on the output line. This line delivers gas to the high-pressure gas compressor station.

The temperature in the separator is controlled by a temperature sensor (WIKA TR10-F). A low temperature alarm is provided to warn of the possibility of paraffin deposits, freezing and hydrate formation.

The exhaust gas flow rate and the oil flow rate from the separator are controlled by electromagnetic flow meters (Rosemount 8700).

A level switch (RIZUR-900) is installed on the separator to ensure process protection in emergency situations.

The parameters of the three-phase separator are shown in table 1.

Table 1. NGSV 1,6 – 3400

Full volume of the separator, m ³	100
Volume of the cylindrical part, mm	86,6
Volume of spherical bottoms, mm	13,4
Separator height, mm	3400
Oil and water performance, m ³ /h	560
Gas performance, m ³ /h	30000
Working pressure (no more), MPa	1,3

2.4 Mathematical software requirements

The mathematical support should be a combination of mathematical methods, models and information processing algorithms used in the creation and operation of the system, and allow the implementation of various components of the system using a single mathematical apparatus.

The primary signal processing functions should be implemented using standard algorithms for scaling, smoothing, filtering and linearization. Implementation of automatic control functions should be carried out using the standard PID-control algorithm.

2.5 Information software requirements

Information software - a set of data, signals (input and output), sufficient both in volume and content, to ensure stable operation of all automated functions of the

system, prompt and reliable assessment of equipment status. The organization of the human-machine interface is one of the main tasks in the development of information software.

Information software implies itself:

- the order and method of exchanging information between system components;
- input / output analog and discrete information;
- forms of various documents;
- a system organizing a real-time database and archive data.

2.6 Software documentation requirements

The set of software documentation for the software and tool should include:

- technical task;
- explanatory note;
- applications.

The documentation must be submitted in print and in electronic form in Microsoft Word format.

3. Digital Twin development

3.1 Development stages

The development of the digital twin begins with the preparation of the stages of development.

The first stage is the study of the technological process and equipment used. This will be needed in order to make the model more accurate and closer to the real system.

The second stage is the selection of software tools that will be used in the process of developing a digital twin. Firstly, we need an environment for mathematical modeling, which allows you to create dynamic models and work with them in real time. Secondly, you need to choose a software development environment for the PLC that supports working with existing equipment. And finally, you need to choose a data exchange mechanism between the mathematical modeling environment and the software development environment, which can ensure the collaboration of automation tools that operate on different hardware platforms, in different industrial networks and are produced by different companies.

At the third stage, it is necessary to develop a scheme of information flows, which shows the direction of information flows, its volume, and in what form it is presented. As well as the interfaces and protocols used in its transmission.

The fourth stage is the creation of a mathematical model. It should display the specified properties of the object with an error not exceeding the specified. Have parameters close to the parameters of a real object, be universal and economical. When creating a mathematical model, individual system contours are developed first, and then they are combined and the model is tested for various operating modes [9].

The fifth stage is the organization of communication between the created model and the upper level of the ACS.

3.2 Hardware and Software selection

To realize the possibility of modeling it is necessary to select the element base: a personal computer with operating system Windows, a programmable logic controller.

This chapter also discusses the communication between the PLC and the Matlab software package using the OPC protocol.

The selection of certain valves and sensors is not necessary because the system allows simulation using any equipment. The characteristics of the selected equipment are entered in the parameters of the corresponding blocks during the modeling.

3.2.1 Programmable Logic Controller

In modern production automation of control systems is used at all levels. To implement an automated control system in production, it is necessary to use special programmable logic controllers (PLC), such as Siemens Simatic S7-1200 (Figure 3). They are designed to perform specific tasks and are focused on real-time work.



Figure 3. Siemens S7-1200

Siemens is one of the largest developers of programmable microcontrollers that can offer consumers integrated microcontroller systems. This brand unconditionally

leads when it comes to quality and reliability. A striking example of this approach is the system of modular microcontrollers Simatic S7-1200.

Siemens S7-1200 is necessary for the construction of various kinds of automation systems (low and medium degree of complexity). The controller has a modular design and includes the following modules:

1. central processor module;
2. power supplies;
3. signal modules;
4. communication modules;
5. functional modules;
6. interface modules.

The controller design stands out for its high serviceability:

1. Each module is mounted on the S7-300 profile bus and fixed in working positions by screws. Using bus connectors, the modules are combined into one system;
2. The modules are located randomly in the mounting racks as they have removable front connectors.

The Siemens S7-300 central processor has the following characteristics:

1. Performance (one of the highest controllers on the market);
2. A large number of active communication connections;
3. CPU 3xxC, CPU 31xT-2 DP have a set of built-in analog inputs / outputs.

That is, the central processor can be used as a ready-made control unit.

Siemens S7-300 programming is implemented in accordance with IEC 61131-3 in the TIA Portal environment.

3.2.2 OPC Technology

It is necessary to ensure the connection between the PLC and the model of the system created in the MatLab software package. To do this, use Ethernet packet technology. To implement this connection scheme, you need to use an OPC server.

OPC is a set of open protocols that regulate the interaction between various automation objects, for example, SCADA systems. OPC DA (Data Access) is one of these protocols, it provides data exchange with devices or software components.

OPC server is a program that implements the relationship between the client and the server and receives data using the internal format of the client, with subsequent conversion to the server format. We can say that the OPC server is a universal model of physical equipment that provides interaction with any OPC client.

OPC client is a program or device that receives various data from the server.

SCADA must support all existing data transfer protocols that equipment uses. This is the only way to ensure the integration of equipment into the upper level of automatic control system. There is a wide variety of manufacturers and their products. Therefore, it is necessary to use standard communication protocols (Modbus, LonTalk, Profibus) to apply SCADA. But this leads to an increase in the cost of ACS. In addition, there is a possibility that there will be a problem when replacing some elements on existing objects. New elements can use new data exchange protocols, and the existing system does not support them. To solve this problem, use the OPS server.

The essence of the OPS server is as follows. The equipment manufacturer provides the user with special software that implements a closed protocol for exchanging data with individual equipment and transmits data in a unified form. OPC technology (Figure 4) is built on a client-server principle. The technology is based on a component model - COM (Component Object Model).

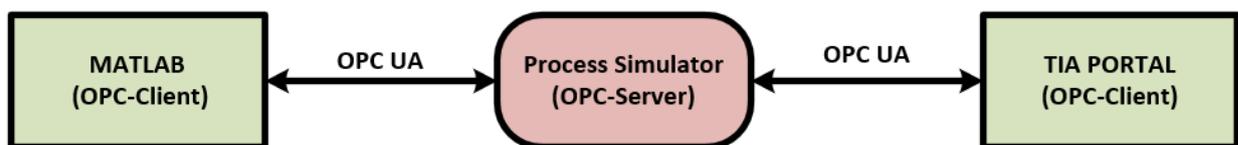


Figure 4. Block diagram of the communication of software systems for OPC

COM technology is a set of functions that a client can call to exchange data with a COM server. These functions allow you to read the number and type of variables that are registered, read their value, subscribe to these values and write the values to the OPC server.

Since the subsystems are created earlier than the final system, all interfaces that are used in the work are fixed in advance. The advantage of using OPC technology is an easy and inconspicuous modernization of applications, this is possible thanks to the use of COM technology.

OPC technology allows you to apply network integration, support, and other services that are provided by the operating system. OPC technology is both powerful and difficult to use.

3.2.3 MATLAB software package

As part of the current work, we need to perform mathematical modeling. This will require a powerful tool that can perform real-time simulation, and which has the ability to work as an OPC client. MATLAB software package is well suited for this work.

MATLAB is a high-level language and interactive environment for programming, numerical calculations and visualization of results. Using the MATLAB software package, you can analyze data, program, and also design and model.

In this work, the MATLAB Simulink package will be used. This is a graphical environment for simulation, which allows you to build dynamic models using block diagrams in the form of directed graphs. It can be discrete, continuous and hybrid, nonlinear and discontinuous systems. They will be used to model a three-phase separator.

To connect the server with MATLAB, you need to turn to the Toolbox library, which has in its arsenal a set of interfaces for working with the OPC server. All of the above allows you to establish a relationship between the MATLAB software and external hardware that communicate with it. Thus, the software package was selected and it meets the necessary requirements for the implementation of mathematical modeling.

3.2.4 SIEMENS TIA PORTAL Development Environment

TIA Portal is the primary software development environment for Siemens PLCs. It is this software package that will be used to write the control program for transmitting and receiving data from the MATLAB software package.

TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) is an integrated software development environment for process automation systems from the level of drives and controllers to the level of the human-machine interface. It is the embodiment of the concept of integrated automation and the evolutionary development of the Siemens AG family of Simatic automation systems. This software allows you to achieve the highest development efficiency of any ACS projects based on the use of SIMATIC PLC and SIMATIC HMI interface.

All TIA Portal routines use the same database. Therefore, all changes that are made to the model using any editor are saved and made available to all means without re-entering the same data.

TIA Portal integrates two main software packages:

- Simatic Step 7 - for programming S7-1500, S7-1200, S7-300, S7-400 and WinAC controllers;
- Simatic WinCC - for developing a human-machine interface (from simple keypads to complex SCADA level configurations).

Conclusion

This Appendix addresses the requirements of a system that is being developed as part of the work. The goals and objectives of developing a digital twin are indicated. Also provides an overview of the production facility and a description of the process.

The following is a description of the digital twin development process. After specifying the stages of development are described first and second stages.