

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

Свичкарь Алексей Сергеевич

Разработка многомерной и многосвязной автоматизированной системы управления
процессами транспортировки нефти

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7M07101 – Автоматизация и роботизация

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт Автоматики и информационных технологий

УДК 681.5(075.32)

На правах рукописи

Свичкарь Алексей Сергеевич

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации	Разработка многомерной и многосвязной автоматизированной системы управления процессами транспортировки нефти
Направление подготовки	7M07101 – Автоматизация и роботизация

Научный руководитель
ассоц. профессор

 Ширяева О. И.

(подпись)

« 2 » июня 2025 г.

Рецензент

канд. техн. наук, доцент
ведущ. науч. сотр.

 Юничева Н. Р.

(подпись)

« 16 » июня 2025 г.

Нормоконтроль
магистр техн. наук

 Манатов К. А.

(подпись)

« ___ » _____ 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой АиУ
канд. техн. наук

_____ Сарсенбаев Н.С.

(подпись)

« ___ » _____ 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт Автоматики и информационных технологий
Кафедра Автоматизации и управления

7M07101 – Автоматизация и роботизация

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой АиУ
канд. техн. наук

_____ Сарсенбаев Н.С.
(подпись)

« ___ » _____ 2025 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Свичкарь А. С.

Тема Разработка многомерной и многосвязной автоматизированной системы управления процессами транспортировки нефти

Утверждена приказом Б. Жаутикова № 548-П/Ө от «04» декабря 2023 г.

Срок сдачи законченной работы « ___ » _____ 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: исходные данные магистрального насоса НМ 7000-210-3.

Производительность насоса – 7000 м³/ч.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) анализ существующих систем управления процессами транспортировки нефти;
- б) разработка многомерной и многосвязной системы управления;
- в) разработка тренажера для обучения операторов.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): *часть нефтепровода, отображенная в системе SCADA.*

Рекомендуемая основная литература:

1 Иванов Д.А., Петров В.Б. «Автоматизация управления процессами транспортировки нефти» - Москва: Нефть и газ, 2020. – 401 с.

2 Смирнов А.В., Кузнецов С.П. "Оптимизация логистических процессов в нефтяной индустрии" - Санкт-Петербург: Энергия, 2021. – 278 с.

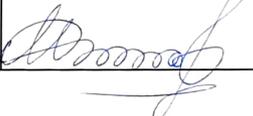
3 Лебедев К.Н. "Информационные технологии в транспортировке нефти" - Москва: Нефть и газ, 2019. – 326 с.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологический раздел Анализ существующих систем управления процессами транспортировки нефти	13.02.2025 г.	
Расчетный раздел Разработка многомерной и многосвязной системы управления	06.03.2025 г.	
Расчетный раздел Разработка тренажера для обучения операторов	28.05.2025 г.	

Подписи

консультантов и нормоконтролёра на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

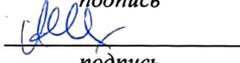
Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Технологический раздел	О. И. Ширяева ассоц. профессор	2.06.25	
Расчетный раздел	О. И. Ширяева ассоц. профессор	2.06.25	
Нормоконтролер	К. А. Манатов магистр техн. наук	13.06.25	

Научный руководитель


подпись

Ширяева О. И.

Задание принял к исполнению обучающийся


подпись

Свичкарь А. С.

Дата

20 12 2023 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию
Свичкарь Алексея Сергеевича
7M07101 – Автоматизация и роботизация

На тему: Разработка многомерной и многосвязной автоматизированной системы управления процессами транспортировки нефти

Выполнено:

- а) презентация на 16 слайдах
- б) пояснительная записка на 53 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Диссертационная работа, представленная на рецензирование, посвящена актуальной теме разработке многомерной и многосвязной автоматизированной системы управления процессами транспортировки нефти. Диссертационная работа состоит из введения, заключения и трех разделов.

В первом разделе проведен анализ существующих систем управления процессами транспортировки нефти. Также особое внимание уделено оценке эффективности существующих систем.

Во втором разделе была разработана многомерная и многосвязная система управления. Был определен объект управления, выведены и проанализированы передаточные функции исследуемого объекта. К объекту управления был подобран ПИД регулятор. Написан программный код на Simatic Step 7 и разработаны графические экраны WinCC.

В третьем разделе показана разработка тренажерных комплексов для обучения обслуживающего персонала. Отражена роль тренажерных комплексов для эффективного управления технологическим процессом.

Практическая значимость работы подтверждена разработанным кодом на языке SCL в среде STEP 7, а также реализацией человеко-машинного интерфейса в WinCC. Дополнительно в работе представлен имитационный тренажерный комплекс на базе UniSim для подготовки операторов и отработки аварийных ситуаций, что расширяет область применения результатов.

Результаты моделирования и тестирования показаны на графиках, построенных в MATLAB. Отдельного внимания заслуживает блок, посвященный оценке устойчивости, откликам системы и точности имитационных моделей.

Научная новизна заключается в построении многомерной математической модели объекта управления (магистрального насоса) с учетом реальных физических параметров: давления, температуры, вибрации. Используются передаточные функции и ПИД-регуляторы, синтезированные отдельно по каждому каналу, с последующим объединением в общую систему.

Результаты работы были представлены на научных конференциях, а также опубликованы в научных сборниках.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
СЭТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

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

Данная магистерская диссертация отличается проработанностью, научно-исследовательский подход и полноту изложенного теоретического материала. Приведённые исследования доказывают отличную теоретическую подготовку магистранта.

Оценка работы

Учитывая вышеизложенное, считаю, что магистерская диссертация заслуживает оценки « 85 » (хорошо), а магистрант Свичкарь Алексей Сергеевич присвоения академической степени магистра технических наук по специальности 7М07101 – Автоматизация и роботизация.

Рецензент

доцент, канд.техн.наук,
ведущий научный сотрудник РГП на ПВХ
«Институт информационных и вычислительных технологий»
КН МОН РК

Юничева Н. Р.

«16» июня 2025 г.



АНДАТПА

Бұл магистрлік диссертация мұнай тасымалдау процестерін басқарудың инновациялық көпөлшемді және көп байланыстырылған автоматтандырылған жүйесін әзірлеуге арналған. Зерттеу озық ақпараттық технологиялар мен деректерді талдау әдістерін қолдана отырып, мұнай өнімдерін тасымалдауды басқаруды оңтайландыруға бағытталған.

Зерттеу әдістемесі жүйе талаптарын талдауды, оның архитектурасын жобалауды, бағдарламалық қамтамасыз етуді әзірлеуді және ұсынылған жүйені тестілеуді қамтиды. Негізгі назар әртүрлі көздерден алынған деректерді біріктіруге және мұнай тасымалдау процестерін: мониторинг пен аналитикадан жедел басқару шешімдерін қабылдауға дейін тұтас басқаруды қамтамасыз етуге қабілетті көп өлшемді платформаны құруға бағытталған.

АННОТАЦИЯ

Данная магистерская работа посвящена разработке инновационной многомерной и многосвязной автоматизированной системы управления процессами транспортировки нефти. Исследование направлено на оптимизацию управления транспортировкой нефтепродуктов с использованием передовых информационных технологий и методов анализа данных.

Методика исследования включает в себя анализ требований к системе, проектирование ее архитектуры, разработку программного обеспечения и тестирование предложенной системы. Основное внимание уделено созданию многомерной платформы, способной интегрировать данные из различных источников и обеспечивать целостное управление процессами транспортировки нефти: от мониторинга и аналитики до принятия оперативных управленческих решений.

ABSTRACT

This master's thesis is devoted to the development of an innovative multidimensional and multi-connected automated control system for oil transportation processes. The research is aimed at optimizing the management of petroleum products transportation using advanced information technologies and data analysis methods.

The research methodology includes analysis of system requirements, design of its architecture, software development and testing of the proposed system. The main focus is on creating a multidimensional platform capable of integrating data from various sources and providing holistic management of oil transportation processes: from monitoring and analytics to making operational management decisions.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Технологический раздел. Анализ существующих систем управления процессами транспортировки нефти	8
1.1 Классификация существующих методов управления	8
1.2 Оценка методов мониторинга и контроля за транспортировкой	9
1.3 Оценка эффективности существующих систем	13
2 Расчетный раздел. Разработка многомерной и многосвязной системы управления	18
2.1 Понятия многомерной и многосвязной системы	18
2.2 Разработка экранов в WinCC	19
2.3 Магистральный насос как объект управления	24
2.4 Характеристики объекта	26
2.5 Модель управления	28
2.6 Разработка программного кода в Simatic Manager	39
3 Разработка тренажера для обучения операторов	47
3.1 Роль тренажерных комплексов	47
3.2 Программное обеспечение Unisim как среда разработки	48
Заключение	52
Список используемой литературы	53

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире транспортировка нефти является ключевым элементом энергетической инфраструктуры. Эффективность и безопасность этого процесса напрямую влияют на экономику и экологию. В данной диссертации представлена разработка многомерной и многосвязной автоматизированной системы управления процессами транспортировки нефти, которая направлена на улучшение эффективности и безопасности перевозок.

Цель работы. Целью исследования является создание комплексной системы, способной анализировать большие объемы данных, оптимизировать маршруты и обеспечивать контроль за всеми аспектами транспортировки. Разработка основывается на современных технологиях, включая искусственный интеллект, машинное обучение, и системы больших данных.

Актуальность. Нефть остаётся одним из ключевых источников энергии в мире, и её эффективная транспортировка имеет стратегическое значение для мировой экономики. Современные системы транспортировки нефти сталкиваются с повышенной сложностью из-за многообразия маршрутов, методов транспортировки и требований к безопасности. Оптимизация маршрутов и процессов управления может значительно сократить затраты и увеличить эффективность в нефтяной индустрии.

Разработка автоматизированной системы управления магистральными насосами и линейной частью нефтепровода представляет собой актуальную научно-практическую задачу. Система должна быть многомерной и многосвязной, с возможностью анализа и прогнозирования на основе реальных производственных данных. Это требует интеграции современных технологий цифровизации, таких как SCADA-системы, цифровые двойники, искусственный интеллект и машинное обучение.

Задачи для выполнения. Основной задачей настоящего исследования является разработка комплексной многоканальной автоматизированной системы управления магистральным насосом в составе нефтепроводной линии с учётом всех критически важных параметров: давления, температуры, вибрации и расхода. Подобрать наиболее подходящий регулятор для управления системой.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ

1.1 Классификация существующих методов управления

Трубопроводная транспортировка включает управление и мониторинг систем трубопроводов, которые перекачивают нефть на большие расстояния. Особенности управления заключаются в контроле за давлением, температурой, скоростью потока и обнаружении утечек.

Морской транспорт. Управление охватывает логистику морских танкеров, маршрутизацию, контроль за загрузкой и выгрузкой нефти, а также соблюдение морских норм безопасности.

Железнодорожный транспорт. включает планирование маршрутов, расписание движения составов, загрузку и выгрузку нефтепродуктов, а также поддержание безопасности на железнодорожном транспорте.

Автомобильный транспорт: Организация и управление перевозками нефти автомобильным транспортом, включая маршрутизацию, планирование графиков доставки и обеспечение безопасности на дорогах.

По уровню автоматизации.

Ручное управление. Процессы управления осуществляются операторами вручную. Это может включать ручной контроль за маршрутами, расписанием, загрузкой и выгрузкой.

Полуавтоматическое управление сочетает элементы автоматизации с ручным контролем. Например, автоматизированные системы могут предлагать решения, которые затем утверждаются или корректируются операторами.

Полностью автоматизированное управление: Все аспекты управления осуществляются автоматически с помощью компьютерных систем, минимизируя необходимость вмешательства человека.

По характеру управления логистикой.

Централизованное управление: Все решения принимаются центральным органом управления, что обеспечивает единообразие и координацию процессов управления на всех уровнях.

Децентрализованное управление: Решения принимаются на местном уровне, что позволяет более гибко реагировать на локальные условия и изменения.

По методам оптимизации.

Эвристические методы: используются опыт и интуиция для принятия решений. Это может быть эффективно в условиях, где необходим быстрый отклик и нет четких алгоритмических решений.

Алгоритмические методы: применяются математические и алгоритмические подходы для оптимизации процессов. Они обеспечивают большую точность и предсказуемость.

Методы машинного обучения: анализируют большие объемы данных для автоматического улучшения процессов управления и принятия решений.

По подходам к обеспечению безопасности:

Проактивные системы: предполагают предварительный анализ рисков и меры по их минимизации для предотвращения аварийных ситуаций.

Реактивные системы: Сфокусированы на быстром реагировании на возникшие инциденты и устранении их последствий.

По типу используемых информационных технологий:

Традиционные ИТ-системы: Основаны на стандартном программном обеспечении и базах данных, используются для базовых задач управления и мониторинга.

Современные ИТ-решения: включают применение передовых технологий, таких как искусственный интеллект, большие данные, облачные вычисления, для повышения эффективности и автоматизации процессов.

Эта детализация помогает глубже понять специфику и возможности каждого подхода, что является ключевым для определения наиболее подходящих методов управления в контексте транспортировки нефти [1].

1.2 Оценка методов мониторинга и контроля за транспортировкой

Оценка методов мониторинга и контроля за транспортировкой нефти является критически важной для обеспечения безопасности и эффективности всей транспортной системы. В этом контексте различные методы и технологии применяются для каждого типа транспорта.

Для трубопроводного транспорта ключевым является использование систем датчиков, которые контролируют давление, температуру и поток нефти в трубопроводах. Эти системы помогают обнаруживать утечки и аномалии, предотвращая аварийные ситуации. Кроме того, автоматические системы управления используются для оптимизации работы трубопроводов, что повышает их эффективность и безопасность.

В морском транспорте важную роль играет система автоматической идентификации судов (AIS), которая позволяет отслеживать местоположение и маршруты танкеров в реальном времени. Также значительное внимание уделяется контролю за процессами загрузки и выгрузки нефти в портах, чтобы минимизировать риски разливов и обеспечить безопасность морской среды.

Для железнодорожного транспорта используются GPS-трекеры для мониторинга местоположения вагонов. Это обеспечивает контроль за соблюдением графика движения и повышает безопасность перевозок. Важными аспектами являются также меры безопасности для предотвращения аварий и утечек нефти.

В автомобильных перевозках ключевую роль играет GPS-мониторинг, который позволяет отслеживать маршруты и времена в пути. Это важно для планирования маршрутов и оптимизации графиков доставки, а также для обеспечения безопасности на дорогах.

Интеграция данных из различных источников позволяет создать комплексную систему управления, которая обеспечивает эффективный контроль над всеми процессами транспортировки. Использование искусственного интеллекта и анализа больших данных способствует улучшению принятия решений и предсказанию потенциальных рисков. Также применяются дроны и спутниковые системы для мониторинга труднодоступных участков трубопроводов [2].

В целом, методы мониторинга и контроля должны соответствовать современным законодательным и экологическим стандартам, что способствует повышению безопасности и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Эффективный мониторинг и контроль за транспортировкой нефти имеют решающее значение для предотвращения аварий, минимизации рисков и повышения общей эффективности транспортной системы.

Современные технологии позволяют перейти от реактивных методов управления к более проактивным, что означает возможность предсказывать и предотвращать потенциальные проблемы до их возникновения. Например, анализ данных с помощью машинного обучения и искусственного интеллекта может выявлять закономерности, указывающие на возможные неполадки в системе или риски утечек, что позволяет предпринять меры заранее.

Важным аспектом является также обеспечение цифровой интеграции между различными видами транспорта и системами управления. Это означает создание единой информационной среды, где данные от разных транспортных средств и инфраструктурных объектов собираются и анализируются в реальном времени. Такой подход позволяет повысить общую координацию и эффективность управления транспортными потоками нефти.

Кроме того, уделяется внимание обеспечению экологической безопасности. Это включает в себя мониторинг состояния окружающей среды в районах транспортировки нефти и разработку мер по минимизации негативного воздействия. Важным становится использование "зеленых" технологий, направленных на снижение выбросов и предотвращение загрязнения.

Также следует отметить, что в условиях усиливающихся глобальных изменений и политической нестабильности, системы мониторинга и контроля должны быть гибкими и адаптивными. Это означает способность систем быстро реагировать на изменения в международной политике, экономических санкциях, изменениях торговых путей и других внешних факторах.

В итоге, комплексный и многоуровневый подход к мониторингу и контролю за транспортировкой нефти обеспечивает не только эффективность и безопасность процессов, но и способствует повышению экологической устойчивости и оперативной адаптации к меняющимся условиям [2].

Дополнительно к оценке методов мониторинга и контроля за транспортировкой нефти, важно подчеркнуть роль усовершенствованных коммуникационных технологий и систем управления данными. Развитие сетей

связи, включая спутниковую и мобильную связь, расширяет возможности для непрерывного мониторинга и оперативного реагирования на любые изменения или аварийные ситуации. Это особенно критично для удаленных и труднодоступных участков трубопроводов или морских маршрутов.

Системы управления данными, интегрирующие информацию с различных источников, играют ключевую роль в оптимизации процессов принятия решений. Это включает сбор данных не только от датчиков и трекеров, но и из внешних источников, таких как метеорологические службы, портовые управления и другие участники транспортной инфраструктуры. Интеграция и анализ этих данных позволяют создать более полную картину текущей ситуации и прогнозировать возможные риски.

Кроме того, важным аспектом является разработка надежных систем резервного копирования и восстановления данных, чтобы обеспечить их сохранность и доступность в случае технических сбоев или кибератак. В условиях увеличивающейся угрозы кибербезопасности, системы мониторинга и контроля должны быть защищены от внешних воздействий, что требует постоянного обновления защитных механизмов и протоколов безопасности.

Учитывая глобальный характер транспортировки нефти, важно также рассмотреть международные стандарты и регулирование в этой области. Сотрудничество между странами и компаниями в разработке и внедрении общих стандартов и лучших практик может значительно повысить эффективность и безопасность международных транспортных маршрутов.

В заключение, комплексный подход к мониторингу и контролю за транспортировкой нефти, включающий передовые технологии, интеграцию данных, обеспечение кибербезопасности и соблюдение международных стандартов, является необходимым для гарантии надежности и устойчивости глобальной нефтяной индустрии.

В данной работе будет рассмотрен магистральный метод транспортировки нефти. Республика Казахстан довольно-таки большая страна, поэтому осуществлять транспортировку нефти через трубопроводы необходимо на огромные расстояния. Поэтому самый эффективный метод мониторинга за транспортировкой нефти является SCADA-базированный мониторинг. SCADA системы предоставляют возможность автоматизированного сбора данных, контроля, анализа и управления процессами в реальном времени, что особенно актуально для сложных промышленных операций, таких как транспортировка нефти. Эти системы могут включать функции мониторинга давления, температуры, скорости потока и других критически важных параметров трубопроводов и транспортных сетей.

SCADA (Система Контроля и Аквизиции Данных) – это комплексное решение, используемое для эффективного управления и мониторинга промышленных процессов. Она обеспечивает автоматический сбор данных с датчиков и устройств на производственных объектах, что позволяет операторам наблюдать за текущим состоянием процессов в реальном времени через графические интерфейсы. SCADA также дает возможность управлять

производственными процессами, регулируя параметры оборудования и вмешиваясь при необходимости для корректировки или аварийного отключения. Кроме того, система анализирует собранные данные для оптимизации процессов, прогнозирования неисправностей и составления отчетов об эффективности работы. SCADA применяется в множестве сфер, включая энергетику, водоснабжение, нефтегазовую промышленность и транспорт, где требуется комплексное управление и контроль производственных процессов.

SCADA системы играют важную роль в автоматизации и упрощении управления сложными промышленными процессами. Они позволяют снизить вероятность человеческой ошибки и улучшить эффективность операций за счет точного мониторинга и быстрого реагирования на изменения процессов. Дополнительно, SCADA обеспечивает более эффективное использование ресурсов и снижение затрат, поскольку позволяет оптимизировать рабочие процессы и предотвратить ненужные простои оборудования.

В контексте безопасности, SCADA системы способствуют предотвращению аварий и инцидентов на производстве. Системы мониторинга и контроля в SCADA могут обнаруживать аномалии и потенциально опасные условия, такие как утечки или перегрузки, и предупреждать об этом операторов, что позволяет предпринять необходимые действия для обеспечения безопасности.

Для поддержания постоянной температуры нефти, между участками расположены пункты подогрева нефти. Проходя через такие пункты подогрева, нефть подогревается и не замерзает в трубопроводе.

Обычно трубопровод делят на участки. Например, как представлено выше – участок 0.6км, участок 17км и так далее. На всех таких участках расположены датчики и задвижки для эффективного мониторинга и управления каждым участком нефтепровода.

Как видно из рисунка 1.1, через систему SCADA можно мониторить показания датчиков давления, температура и расхода нефти. А также управлять задвижками, открывать или закрывать их, регулируя тем самым давление в трубопроводе. Также в случае возникновения какой-либо аварии, это будет видно на экране диспетчера, что позволит предпринять все необходимые меры для ее устранения.

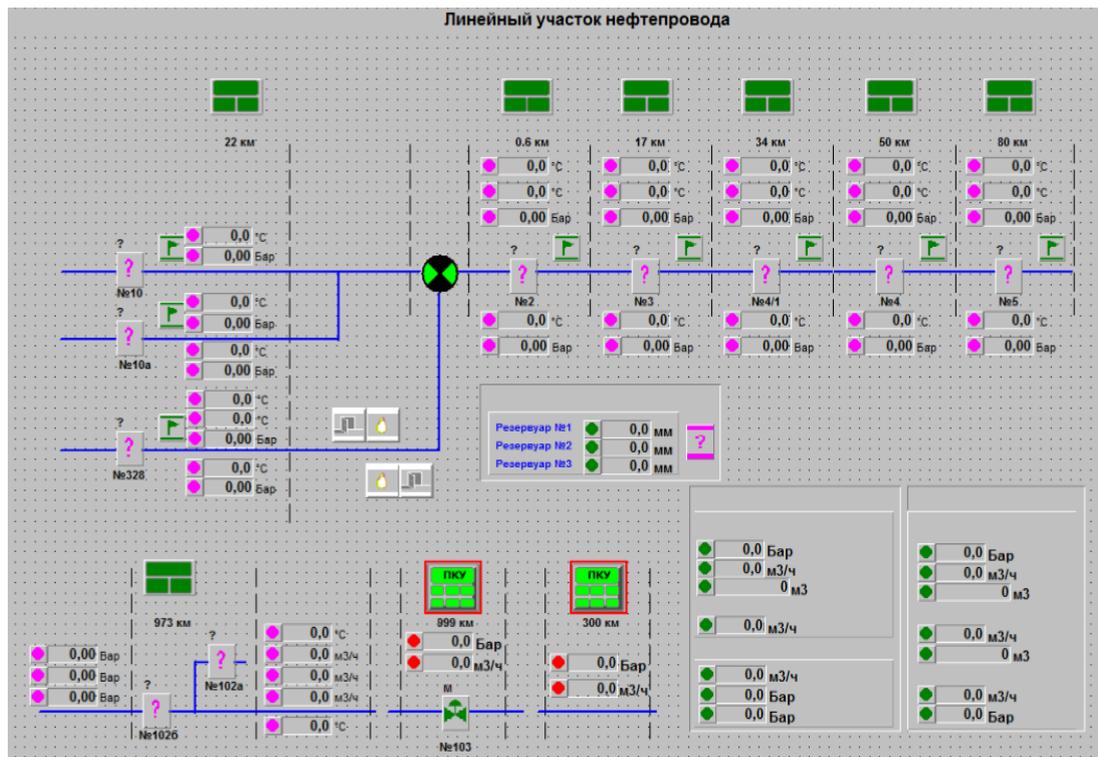


Рисунок 1.1 – Часть нефтепровода, отображенная в системе SCADA

Процесс транспортировки нефти постоянный, поэтому существует две смены диспетчеров и операторов. Одна смена работает днем, другая ночью.

Диспетчер осуществляет общее руководство и обычно он находится в офисе компании, которая и занимается транспортировкой нефти. Оператор находится непосредственно на нефтяной станции, где сосредоточены магистральный и подпорные насосные станции. Также транспортируемую нефть необходимо где-то хранить. Хранение осуществляется в специальных резервуарах. Оператор также, как и диспетчер следит за показаниями датчиков, насосов и резервуаров. При возникновении аварии именно оператор, по месту, устраняет аварию. Автоматика выполняет функцию защиты. К примеру, при возникновении аварии на нефтепроводе, необходимо в срочном порядке отключить магистральные и подпорные насосы.

1.3 Оценка эффективности существующих систем

Оценка эффективности существующих систем управления процессами транспортировки нефти является многогранным процессом, включающим комплексный анализ различных аспектов функционирования этих систем. Этот анализ начинается с оценки пропускной способности и скорости транспортировки, где ключевым фактором является способность системы обрабатывать и перемещать заданные объемы нефти в оптимальные сроки. Это включает анализ времени транспортировки, а также эффективность логистических цепочек от добычи до потребителя. Особое внимание уделяется

надежности и безопасности систем. В этом контексте анализируется не только физическое состояние транспортных средств и инфраструктуры, но и эффективность систем раннего обнаружения и реагирования на потенциальные аварии или утечки. Гибкость и адаптивность систем также подвергаются тщательной оценке, поскольку важно, чтобы система управления могла адаптироваться к меняющимся условиям, таким как колебания в объемах добычи, изменение маршрутов или внешние политические и экономические факторы.

Экономическая эффективность системы оценивается путем сравнения затрат на управление, обслуживание и модернизацию с получаемым экономическим эффектом. Это включает анализ операционных расходов, износа и потребности в техническом обновлении инфраструктуры. Важно также учитывать экологическое воздействие систем транспортировки, оценивая степень влияния на окружающую среду и принимая меры для минимизации негативных последствий, таких как загрязнение и выбросы вредных веществ. Соответствие действующим законодательным требованиям и международным стандартам также является важной частью оценки, поскольку обеспечивает соблюдение правил безопасности и экологических норм. Анализ интеграции и координации между различными элементами транспортной системы позволяет определить, насколько эффективно различные виды транспорта (такие как трубопроводы, железнодорожный и морской транспорт) работают вместе для обеспечения непрерывности и эффективности процессов.

Наконец, удовлетворенность пользователей и операторов системы представляет собой важный индикатор эффективности. Отзывы от тех, кто непосредственно использует или управляет системами транспортировки, могут предоставить ценную информацию о проблемах, требующих внимания, и потенциальных улучшениях. В целом, эта оценка помогает выявить ключевые области для оптимизации и улучшения в существующих системах управления процессами транспортировки нефти, а также определяет потребности в внедрении новых технологий и подходов для повышения их эффективности, безопасности и экологической устойчивости.

Расширяя оценку эффективности существующих систем управления процессами транспортировки нефти, стоит также учитывать влияние этих систем на широкий спектр социально-экономических и экологических аспектов. С точки зрения социально-экономического влияния, важно оценивать, как системы транспортировки влияют на местные сообщества и экономику в целом. Это включает анализ создания рабочих мест, вклада в местный и национальный ВВП, а также социальных последствий, таких как переселение сообществ или изменение ландшафта. Кроме того, следует учитывать воздействие на цены на энергоресурсы и их доступность для конечных потребителей.

С экологической точки зрения, помимо уже упомянутого воздействия на окружающую среду, важно оценить долгосрочные последствия эксплуатации и развития транспортных систем. Это включает потенциальное воздействие на

биоразнообразии, изменение климата и устойчивое использование природных ресурсов. Также важно рассмотреть возможности для интеграции возобновляемых источников энергии и более экологичных технологий в инфраструктуру транспортировки нефти. Учитывая растущее внимание к вопросам устойчивого развития, оценка эффективности систем управления транспортировкой нефти должна также включать анализ их соответствия глобальным экологическим инициативам и целям устойчивого развития. Это подразумевает не только минимизацию негативного воздействия на окружающую среду, но и стремление к созданию более чистых, безопасных и эффективных транспортных решений.

В итоге, комплексная оценка эффективности систем управления транспортировкой нефти должна учитывать широкий спектр факторов, от операционной эффективности и безопасности до социально-экономического и экологического воздействия, а также соответствие глобальным стандартам устойчивого развития.

2 РАЗРАБОТКА МНОГОМЕРНОЙ И МНОГОСВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ

2.1 Понятия многомерной и многосвязной системы

Многомерная автоматизированная система управления (МАСУ) представляет собой интегрированную платформу, способную эффективно управлять различными аспектами и процессами в организации или промышленном предприятии. Она объединяет в себе несколько измерений или аспектов управления, таких как операционная деятельность, технические процессы, финансовая деятельность, ресурсное планирование и т.д., в одну согласованную и автоматизированную систему.

МАСУ объединяет данные из различных источников и систем, таких как базы данных, датчики, IoT-устройства, системы мониторинга и другие, для обеспечения единого источника информации для управленческих решений.

Многомерные системы управления автоматизируют выполнение рутинных операций и задач, что позволяет сотрудникам сконцентрироваться на более стратегических и аналитических задачах. МАСУ оснащены инструментами анализа данных и отчетности, которые помогают выявлять тенденции, прогнозировать результаты, а также делать информированные управленческие решения на основе данных. Эти системы обладают гибкой архитектурой, позволяющей легко настраивать и масштабировать функциональность и возможности в соответствии с потребностями организации. МАСУ обеспечивают централизованное управление различными аспектами бизнеса или производства, что способствует повышению эффективности и снижению издержек.

Многосвязная автоматизированная система управления (МСАСУ) представляет собой комплексное решение, которое объединяет в себе несколько взаимосвязанных систем управления для координации и оптимизации работы организации или производственного процесса. Основным принципом МСАСУ является интеграция различных функциональных областей и систем в единое целое с целью повышения эффективности управления и ресурсоиспользования.

МСАСУ объединяет в себе различные системы управления, такие как системы управления производством, складскими операциями, логистикой, управлением персоналом, финансами и другими, чтобы обеспечить единую платформу для управления всеми аспектами бизнеса. Эти системы обеспечивают связь и обмен данными между различными функциональными областями, что позволяет автоматизировать и оптимизировать процессы, связанные с передачей информации и выполнением задач.

Многомерная многосвязная система управления (ММСУ) представляет собой интегрированную и комплексную систему, которая объединяет в себе несколько измерений (или "мер") управления, а также устанавливает связи между ними для координации и оптимизации работы организации или

производственного процесса. Эта концепция позволяет учитывать различные аспекты управления и взаимодействие между ними для достижения гармоничной работы всей системы [5].

На рисунке 2.1 изображена структурная схема автоматизированной системы управления насосной установкой. Имеется выходная переменная, входной сигнал, сумматор, а также задание, то есть желаемое значение управляемой переменной.

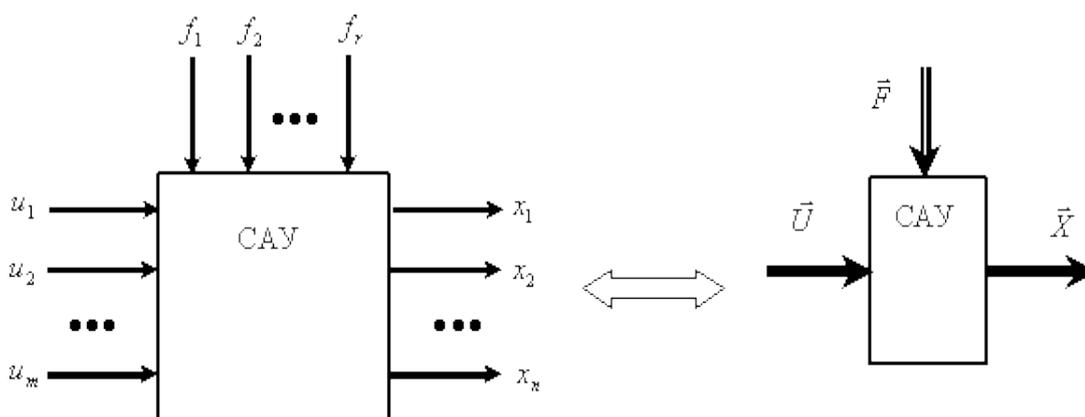


Рисунок 2.1 – Блок схема многомерной, многосвязной системы

ММСУ объединяет несколько измерений управления, таких как операционная деятельность, финансовый учет, управление персоналом, маркетинг и другие, в единую систему для комплексного анализа и управления. Эти системы определяют взаимосвязи и зависимости между различными аспектами управления, что позволяет учитывать влияние одного измерения на другие и принимать комплексные управленческие решения. ММСУ предоставляют возможность создания нескольких модулей управления для каждого измерения, что позволяет адаптировать систему под конкретные потребности и требования организации. Эти системы обеспечивают возможность централизованного мониторинга и управления всеми аспектами бизнеса или производственного процесса, что обеспечивает более эффективное принятие решений и координацию действий на всех уровнях.

Многомерная и многосвязная система управления транспортировкой нефти представляет собой интегрированную и комплексную платформу, способную управлять различными аспектами и процессами, связанными с транспортировкой нефти, а также устанавливать взаимосвязи между ними для оптимизации всей системы. Многомерная и многосвязная система управления транспортировкой нефти объединяет в себе несколько измерений управления, таких как мониторинг транспорта, контроль качества нефти, управление логистикой и маршрутизацией, планирование обслуживания и ремонта транспортных средств и другие, для комплексного анализа и управления. Эти системы определяют взаимосвязи и зависимости между различными аспектами управления транспортировкой нефти, что позволяет учитывать влияние одного

аспекта на другие и принимать комплексные управленческие решения. Эти системы обеспечивают возможность централизованного мониторинга и управления всеми аспектами транспортировки нефти, что обеспечивает более эффективное принятие решений и координацию действий на всех уровнях. Применение многомерных и многосвязных систем управления транспортировкой нефти может существенно повысить эффективность операций, обеспечить безопасность транспортировки, уменьшить издержки и риски, а также сделать процессы более прозрачными и контролируруемыми. Это особенно важно в контексте нефтяной промышленности, где даже малейшие отклонения могут привести к серьезным последствиям для окружающей среды и здоровья человека [4].

На рисунке 2.2 показаны три уровня автоматизированной системы управления. От самых простых и элементарных до самых сложных.

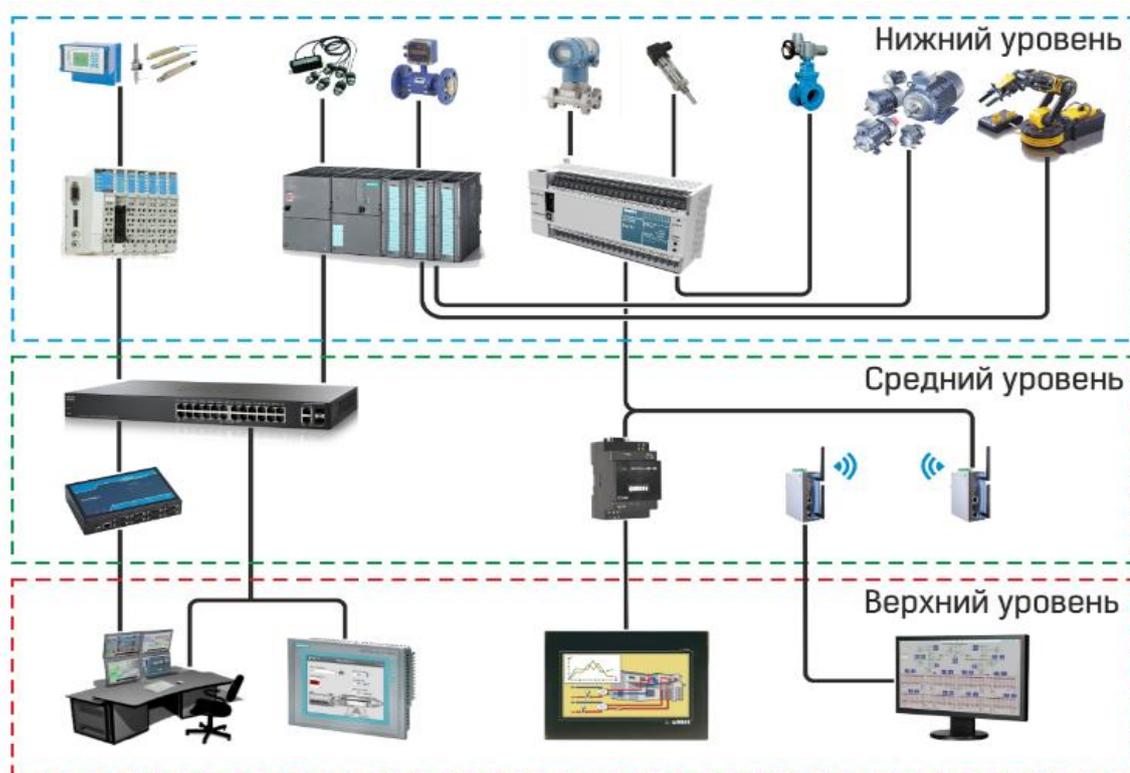


Рисунок 2.2 – Три уровня автоматизированной системы управления

На нижнем уровне, или уровне оборудования (Input/Output-level), располагаются датчики, измерительные устройства и исполнительные механизмы, которые играют ключевую роль в контроле и регулировании параметров процесса транспортировки нефти. Датчики собирают информацию о различных параметрах, таких как давление, температура, уровень заполнения резервуаров и другие. Полученные данные передаются на устройства управления, где происходит их анализ и согласование с заданными параметрами. Затем, с помощью исполнительных устройств, производится регулирование процесса транспортировки, например,

изменение скорости подачи нефти или открытие/закрытие клапанов.

Средний уровень, или уровень управления оборудованием (Control level), представлен контроллерами, такими как Программируемые Логические Контроллеры (PLC). PLC получает информацию от датчиков о текущем состоянии процесса и в соответствии с заранее заданными алгоритмами управления выдает команды исполнительным механизмам. Здесь осуществляется логическое управление процессом транспортировки, опираясь на данные с датчиков.

Верхний уровень представляет собой промышленный сервер, сетевое оборудование, а также операторские и диспетчерские станции. Этот уровень обеспечивает контроль и мониторинг процесса транспортировки нефти. Система SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) играет здесь важную роль, позволяя визуализировать данные о процессе на операторских панелях и мониторах. Оператор, через человеко-машинный интерфейс (HMI), может контролировать и управлять процессом, а также реагировать на возникающие ситуации, получая уведомления о любых отклонениях или аварийных ситуациях. Таким образом, обеспечивается эффективное управление и контроль технологическим процессом транспортировки нефти на всех уровнях.

2.2 Разработка экранов в WinCC

WinCC, или "Windows Control Center", представляет собой программное обеспечение для визуализации и управления процессами в промышленных системах. Разработанный компанией Siemens, WinCC является частью семейства продуктов, предназначенных для автоматизации и контроля в промышленности.

Экраны WinCC представляют собой важную часть системы SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), используемой для визуализации и управления процессами в промышленных системах. WinCC (Windows Control Center) - это программное обеспечение, разработанное компанией Siemens, которое предоставляет средства для создания графических интерфейсов пользователей (HMI - Human Machine Interface) для мониторинга и управления производственными процессами [10].

Экраны WinCC представляют собой визуальные интерфейсы, которые отображают информацию о состоянии процессов, параметрах оборудования, данными с датчиков и другую важную информацию, необходимую операторам для принятия решений и управления производством. Они могут содержать различные элементы управления, такие как кнопки, переключатели, графики, таблицы и текстовые поля, которые позволяют операторам взаимодействовать с системой и управлять ею.

Экраны WinCC обладают широкими возможностями конфигурации и настройки, что позволяет адаптировать их под конкретные потребности и

требования производства. Операторы могут создавать различные экранные макеты для различных операций и ситуаций, а также настраивать их внешний вид и функциональность в соответствии с требованиями производства.

Благодаря экранам WinCC операторы могут легко мониторить состояние производственных процессов, оперативно реагировать на изменения и события, а также принимать управленческие решения на основе актуальной информации. Это существенно повышает эффективность и безопасность работы производства, а также улучшает контроль над технологическими процессами [8].

Разработка системы управления любого технологического процесса начинается с отрисовки графических экранов и схем. На основе технологического задания, чертежей, схем и прочей документации в системе SCADA отрисовываются графические экраны. В качестве системы SCADA был выбран программный пакет WinCC версии 7.4 от компании Siemens.

На рисунке 2.3 показана схема из двух магистральных насосов. Магистральные насосы — это насосы, предназначенные для перемещения больших объемов жидкости по трубопроводам.

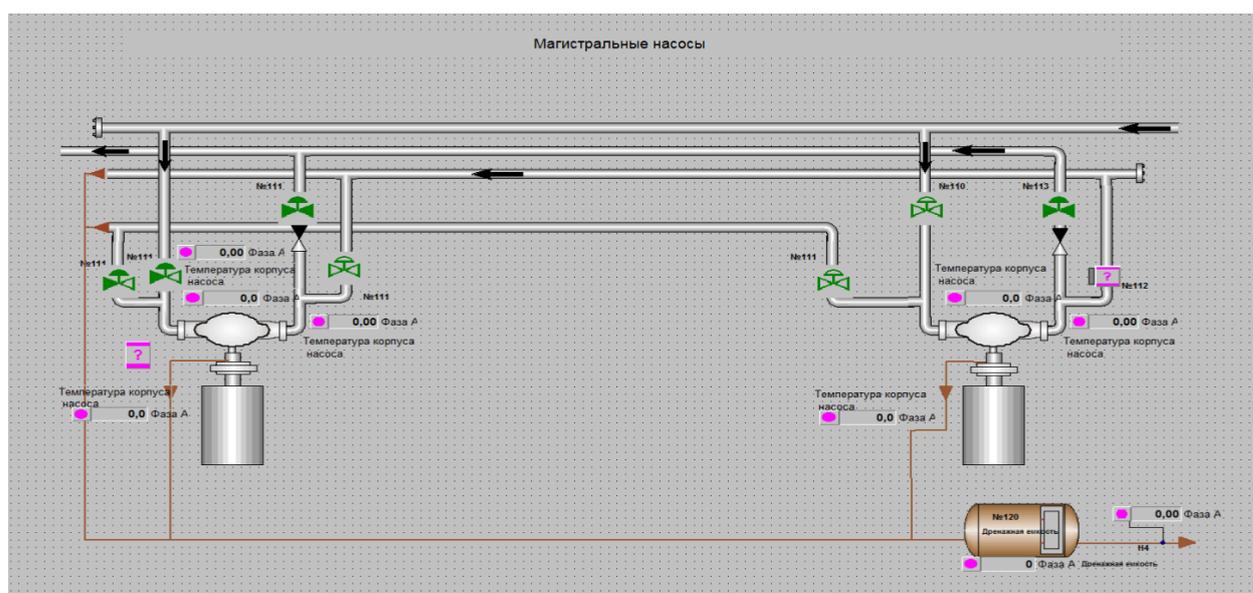


Рисунок 2.3 – Схема магистральных насосов

Они широко используются в различных отраслях, включая нефтяную, газовую и водопроводную промышленность. Магистральные насосы обычно являются центробежными, то есть используют вращение ротора с лопатками для создания центробежной силы, которая перемещает жидкость. Они способны перекачивать большие объемы жидкости на значительные расстояния и с высоким давлением. Изготавливаются из материалов, устойчивых к коррозии и износу, таких как нержавеющая сталь или специальные сплавы, чтобы выдерживать агрессивные среды и высокое давление. Магистральные

насосы часто оснащаются технологиями для снижения энергопотребления, так как они должны работать непрерывно и эффективно.

На предоставленной мнемосхеме изображена система магистральных насосов, используемая для перемещения жидкости между различными участками процесса. Имеется также дренажная емкость, которая необходима для сбора и временного хранения жидкости, которая может быть откачана из различных частей процесса или системы. Дренажные емкости используются для сбора жидкости, которая может вытекать из системы из-за утечек, конденсата или переполнения.

Задвижки — это тип трубопроводной арматуры, который используется для перекрытия или регулирования потока жидкости или газа в трубопроводе. Они могут быть полностью открыты или закрыты, обеспечивая таким образом полный пропуск или полное перекрытие потока. Задвижки работают путём подъёма или опускания затвора (клина), который герметично входит в корпус задвижки, тем самым блокируя или разрешая поток. Изготавливаются из различных материалов, включая сталь, чугун, бронзу и другие сплавы, что позволяет их использовать в различных условиях — от обычной воды до агрессивных химических веществ.

Имеются также датчики давления (нарисованы у насосов и труб). Следят за давлением в системе, что важно для безопасной и эффективной работы насосов и предотвращения аварийных ситуаций. При предельных показателях датчиков давления аварийно останавливаются насосы. Температурные датчики измеряют температуру жидкости и насоса, что критично для контроля состояния процесса и предотвращения перегрева [2].

На рисунке 2.4 показан резервуарный парк, состоящий из трех резервуаров, датчиков уровня, температуры и расходомеров.

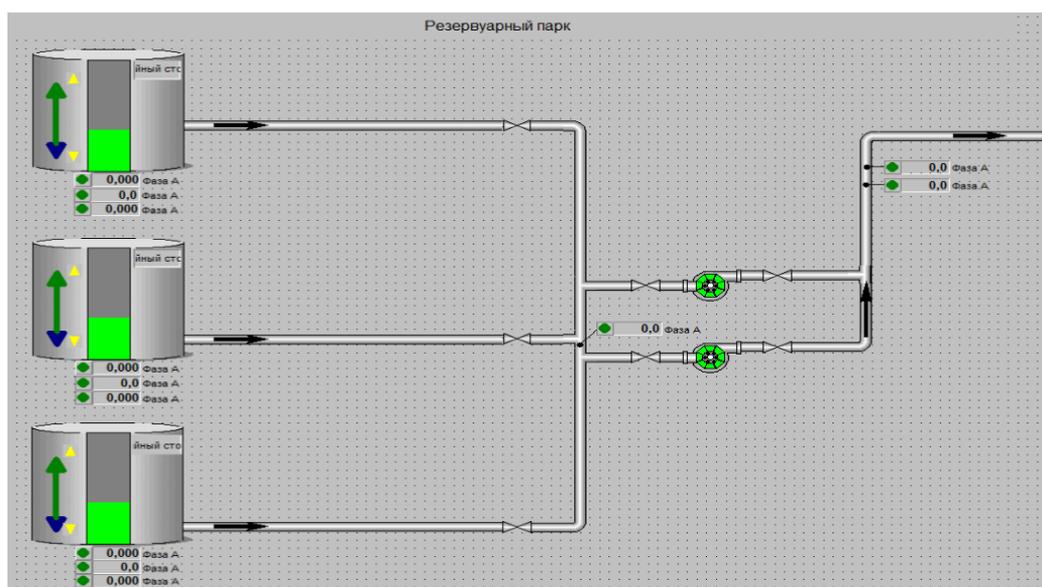


Рисунок 2.4 – Резервуарный парк

Резервуарный парк в контексте транспортировки нефти играет критическую роль, обеспечивая промежуточное хранение сырой нефти, конечных продуктов её переработки или промежуточных фракций в процессе очистки и переработки. После добычи сырая нефть транспортируется к резервуарным паркам, где она хранится до переработки или дальнейшей транспортировки. Резервуары позволяют синхронизировать потоки между добычей, переработкой и транспортировкой, уменьшая операционные риски. Датчики уровня необходимы для мониторинга уровня резервуара. Если уровень резервуара критически большой, то его заполнение немедленно прекращается, но в данной мнемосхеме управление уровнем резервуаров осуществляется с помощью ручных задвижек. Ручные задвижки управляются непосредственно операторами в самом резервуарном парке. В диспетчерский пункт приходят данные с датчиков расхода. Они позволяют прогнозировать скорость наполнения или опустошения резервуаров.

На рисунке 2.5 показана схема линейной части нефтепровода.

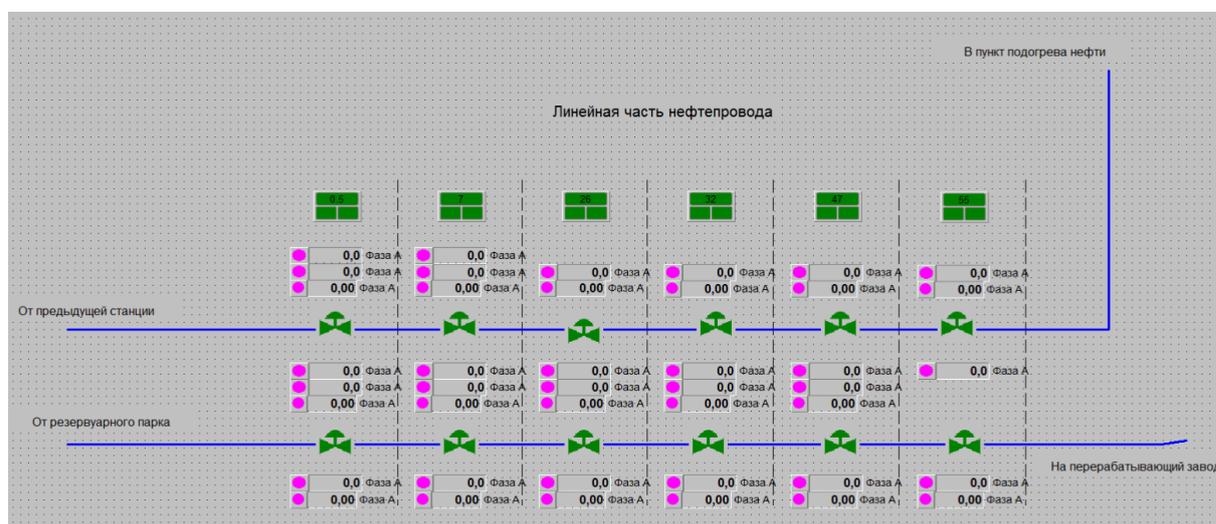


Рисунок 2.5 – Линейная часть нефтепровода

Линейная часть нефтепровода — это ключевой сегмент трубопроводной системы, отвечающий за непосредственную транспортировку нефти между различными пунктами, такими как добывающие месторождения, резервуарные парки, и нефтеперерабатывающие заводы. Основной элемент, через который происходит транспортировка нефти. Трубы изготавливаются из высокопрочной стали, способной выдерживать высокое давление и агрессивные условия эксплуатации. Расположены на определенных интервалах вдоль трубопровода для поддержания необходимого давления в системе. Это помогает перемещать нефть на большие расстояния и преодолевать перепады высот. Оборудованы датчиками и измерительными приборами для мониторинга таких параметров, как давление, температура, расход и качество нефти. Это важно для обеспечения безопасности и

эффективности транспортировки. Линейная часть нефтепровода является жизненно важной для всей системы нефтедобычи и переработки, так как именно она обеспечивает основной транспорт нефти на значительные расстояния, соединяя все ключевые элементы инфраструктуры. Эффективность и надежность этой части системы напрямую влияют на общую производительность и безопасность транспортировки нефти.

На рисунке 2.6 показан магистральный насос с датчиками температуры, давления и прочими приборами.

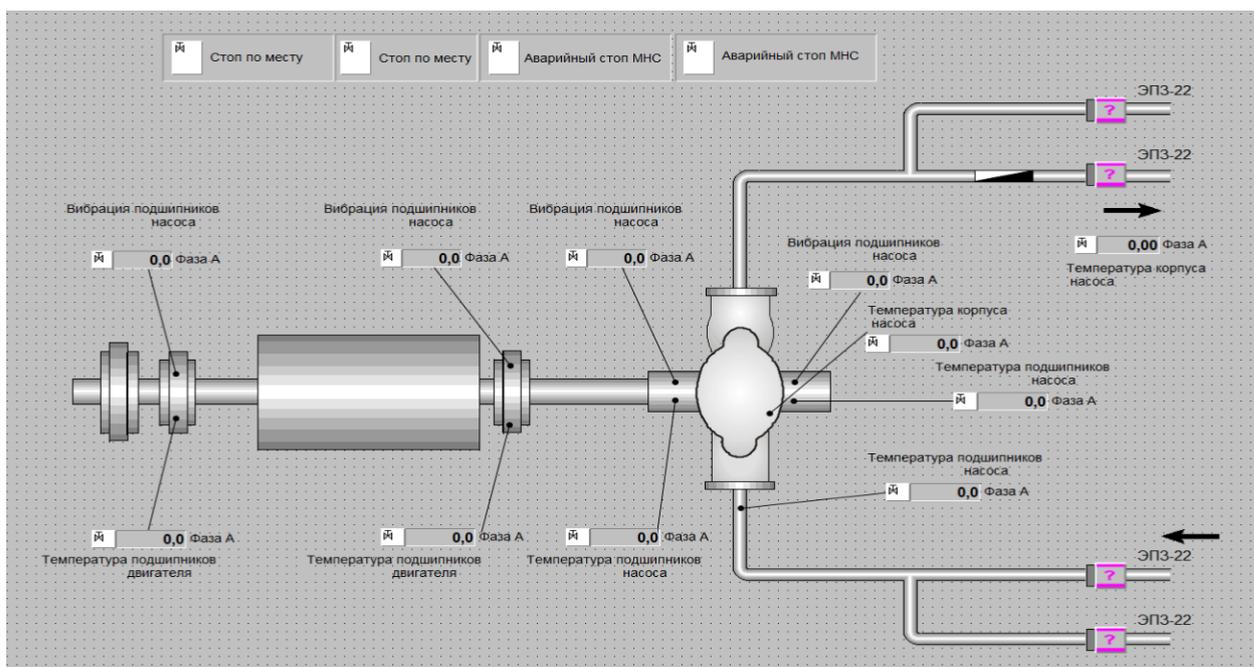


Рисунок 2.6 – Магистральный насос

На мнемосхеме представлена система магистрального насоса, обеспечивающая контроль ключевых параметров его работы с использованием датчиков и управляющих элементов.

Температура подшипников двигателя.

Датчики температуры расположены на двух сторонах двигателя, фиксируют нагрев подшипников, что важно для контроля износа и предотвращения перегрева.

Температура подшипников двигателя.

Датчики на обеих сторонах насоса измеряют температуру подшипников, указывая на их состояние и возможные отклонения при перегрузках или износе.

Температура подшипников насоса.

Показатели температуры корпуса насоса снимаются в двух точках. Это помогает контролировать общий тепловой режим оборудования и выявлять аномалии в процессе работы.

Вибрация подшипников насоса.

Датчики вибрации установлены на обеих сторонах насоса. Они фиксируют изменения уровня вибрации, что может указывать на

неисправности подшипников, дисбаланс вала или другие механические проблемы.

Фаза А.

Все датчики передают значения в режиме реального времени, которые в текущем отображении равны 0,0. Параметры фиксируются для оценки нормального состояния системы.

Задвижки ЭПЗ-22.

На входе и выходе насоса расположены задвижки с маркировкой ЭПЗ-22. Они управляют потоком рабочей среды и могут находиться в открытом или закрытом положении в зависимости от режима работы насоса.

Кнопки управления.

В верхней части схемы расположены кнопки:

Стоп по месту – ручная остановка насоса с местного пульта управления.

Аварийный стоп МНС – аварийная остановка магистрального насоса в случае критических ситуаций.

Потоки рабочей среды.

Стрелки на схеме указывают направление потока жидкости через магистральный насос, который регулируется задвижками и контролируется датчиками давления и температуры.

Таким образом, мнемосхема отражает систему мониторинга и управления магистральным насосом, где контролируются критически важные параметры: температура подшипников двигателя и насоса, температура корпуса, вибрация подшипников, а также управление потоками через задвижки.

2.3 Магистральный насос как объект управления

Магистральный насос как объект управления в системе транспортировки нефти является критическим компонентом, обеспечивающим поддержание необходимого потока и давления в трубопроводе. Давление на входе и выходе основные параметры, которые необходимо контролировать для обеспечения стабильной работы насоса.

Для управления магистральным насосом требуется управлять многими параметрами, поэтому система будет многомерная и многосвязная. Передаточная функция для многомерной и многосвязной системы, такой как система насосов в процессе транспортировки нефти, требует учёта взаимодействия между разными переменными процесса и многочисленными петлями обратной связи. Представим систему, где входными параметрами являются скорость насоса и давление на входе, а выходными — давление на выходе и расход.

Для анализа магистрального насоса как объекта управления многомерной и многосвязной системы, разработаем передаточные функции, связывающие

входные воздействия и выходные параметры: давление у задвижек, вибрация подшипников, температура корпуса.

Система включает два входных параметра (управляющие воздействия):

- 1) Частота вращения насоса ($n(t)$);
- 2) Направляющее воздействие на задвижки $u_{in}(t)$ и $u_{out}(t)$.

Выходные параметры:

- 1) Давление на входе ($P_{in}(t)$) и выходе ($P_{out}(t)$);
- 2) Вибрация подшипников ($V(t)$);
- 3) Температура корпуса ($T(t)$).

Передаточная функция давления

На входное давление ($P_{in}(t)$) влияет частота вращения насоса ($n(t)$) и степень открытия входной задвижки ($u_{in}(t)$):

$$P_{in}(s) = K_{P_{in}} * n(s) + K_{u_{in}} * u_{in}(s) \quad (2.1)$$

где $K_{P_{in}} = 0.8$;
 $K_{u_{in}} = 0.7$.

Передаточная функция вибрации

Вибрация подшипников ($V(t)$) зависит от частоты вращения насоса ($n(t)$):

$$V(s) = K_V * n(s) \quad (2.2)$$

где $K_V = 0.05$.

Передаточная функция температуры

Температура корпуса ($T(t)$) зависит от частоты вращения насоса и вибрации:

$$T(s) = K_{Tn} * n(s) + K_{TV} * V(s) \quad (2.3)$$

где $K_{Tn} = 0.02$;
 $K_{TV} = 1.5$.

Получение общих передаточных функций

Давление на входе:

Подставляем входные воздействия:

$$P_{in}(s) = 0.8 * n(s) + 0.5 * u_{in}(s) \quad (2.4)$$

Давление на выходе:

$$P_{out}(s) = 1.2 * n(s) + 0.7 * u_{out}(s) \quad (2.5)$$

Вибрация:

$$V(s) = 0.05 * n(s) \quad (2.6)$$

Температура:

$$T(s) = 0.02 * n(s) + 1.5 * (0.05 * n(s)), \quad (2.7)$$

$$T(s) = 0.02 * n(s) + 0.075 * n(s), \quad (2.8)$$

$$T(s) = 0.095 * n(s) \quad (2.9)$$

Передаточные функции образуют многосвязную систему, где влияние частоты вращения насоса ($n(t)$) распространяются на все выходы:

$P_{in}(t)$ и $P_{out}(t)$ зависят от задвижек (u_{in}, u_{out})
 $V(t)$ и $T(t)$ связаны с $n(t)$

Общий вид системы:

$$\begin{bmatrix} P_{in}(s) \\ P_{out}(s) \\ V(s) \\ T(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.5 & 0 & 0 \\ 1.2 & 0 & 0.7 & 0 \\ 0.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0.095 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} n(s) \\ u_{in}(s) \\ u_{out}(s) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Данная матрица описывает многосвязную систему с выходами P_{in}, P_{out}, V, T , где входы n, u_{in}, u_{out} влияют на различные параметры.

2.4 Характеристики объекта

Для управления всей системой, срабатывания аварийных защит необходимо прописать логику. Нужно разработать программный код. Среда разработки программного кода был выбран Simatic Manager.

В качестве магистрального насоса была выбрана модель НМ 7000-210-3.

НМ 7000-210-3 — это типовой магистральный насос, широко применяемый на нефтеперекачивающих станциях в России и СНГ. Он соответствует всем требованиям для перекачки нефти и нефтепродуктов на большие расстояния в составе магистральных трубопроводов.

Ключевые характеристики:

Производительность насоса – 7000 м³/ч;

Напор – до 21 Мпа;

Частота вращения - 2980 об/мин;
Температура перекачиваемой среды: до 80 °С;
Мощность электропривода: до 5000 кВт;
Кавитационный запас: не менее 3,5 м;
Тип: горизонтальный, секционный, многоступенчатый;
Материал проточной части: легированная сталь, стойкая к коррозии;
Возможность установки в системе с частотным регулированием;
Данная модель имеет некоторые преимущества:
Подходит для тяжелых условий магистральной транспортировки;
Совместим с типовыми ПЛК Siemens и системами визуализации WinCC;
Хорошо документирован, доступна техническая поддержка;
Устойчив к вибрационным и температурным перегрузкам;
Насос сертифицирован по ГОСТ, имеет взрывозащищенное исполнение, что позволяет использовать его в опасных зонах;

Полностью адаптирован для интеграции с системами автоматизации на базе Siemens (Step 7, WinCC). Имеет стандартные сигнальные интерфейсы для подключения датчиков температуры, вибрации и давления.

Выбор НМ 5000-210-5 обоснован его техническими характеристиками, соответствием требованиям нефтеперекачивающих станций, совместимостью с системами автоматизации и высоким качеством исполнения.

К магистральному насосу также необходим электропривод.

В качестве электропривода был выбран ВАУ 630-6УХЛ4. Он обладает мощностью 5000 кВт. Соответствует максимальной потребности насоса НМ 5000-210-5, с запасом для тяжёлых режимов и обеспечения надежного пуска под нагрузкой. Напряжение питания 6000В. Работает от стандартной промышленной сети среднего напряжения на магистральных насосных станциях. Частота вращения 1000 об/мин. Тип двигателя асинхронный с короткозамкнутым ротором. Простой в эксплуатации, надежен, легко интегрируется с частотными преобразователями и системами автоматизации Siemens. Имеет взрывозащищенное исполнение, УХЛ4. Подходит для установки в условиях повышенной пожарной и взрывоопасности (в нефтеперекачивающих станциях). Охлаждается при помощи воздушно-масляного теплообменника. Обеспечивает стабильную работу даже в условиях перегрева и запылённости. Поддерживает интеграцию с системами ПЧ (частотных преобразователей) от Siemens (SINAMICS), управление через PROFIBUS / PROFINET, легко адаптируется в Step 7 и WinCC.

ВАУ 630-6УХЛ4 идеально подходит как штатный электропривод к насосу НМ 5000-210-5 по всем параметрам: мощность, надежность, промышленное исполнение и полная совместимость с автоматизированной системой управления.

2.5 Модель управления

Объект управления — магистральный насос — представляет собой сложную динамическую систему с несколькими входами и выходами (ММО-система). Основная цель модели управления — обеспечение устойчивой и оптимальной работы агрегата при изменяющихся нагрузках, внешних воздействиях и аварийных ситуациях.

Входные воздействия системы:

— $u_1(t)$ — положение входной задвижки (в процентах открытия)

— $u_2(t)$ — положение выходной задвижки

— $u_3(t)$ — частота вращения ротора насоса (через частотный преобразователь)

— $u_4(t)$ — подача охлаждающего масла

Выходные параметры:

— $y_1(t)$ — давление на входе насоса;

— $y_2(t)$ — давление на выходе насоса;

— $y_3(t)$ — вибрация подшипников;

— $y_4(t)$ — температура корпуса насоса;

Система описывается в виде передаточных функций или в пространстве состояний.

Динамическая модель в виде передаточных функций расписана ниже.

Давление на входе (входная задвижка и скорость вращения):

$$G_{11}(s) = \frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{K_{11}}{T_{11}s+1}, G_{13}(s) = \frac{Y_1(s)}{U_3(s)} = \frac{K_{13}s}{(T_{13}s+1)(T_{21}+1)} \quad (2.11)$$

Давление на выходе (функция от выходной задвижки и скорости):

$$G_{22}(s) = \frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{K_{22}}{T_{22}s+1}, G_{23}(s) = \frac{Y_2(s)}{U_3(s)} = \frac{K_{23}s}{(T_{23}s+1)^2} \quad (2.12)$$

Вибрация подшипников (влияние оборотов и давление);

$$G_{33}(s) = \frac{Y_3(s)}{U_3(s)} = \frac{K_{33}(T_v s+1)}{(T_{v1}s+1)(T_{v2}s+1)}, G_{31}(s) = \frac{Y_3(s)}{U_1(s)} = \frac{K_{31}s}{(T_{31}s+1)^2} \quad (2.13)$$

Температура корпуса (влияние подачи масла и вращения):

$$G_{44}(s) = \frac{Y_4(s)}{U_4(s)} = \frac{-K_{44}}{T_{44}s+1}, G_{43}(s) = \frac{Y_4(s)}{U_3(s)} = \frac{K_{43}s}{(T_{43}s+1)^2} \quad (2.14)$$

Пусть вектор состояний:

$$x(t) = \begin{bmatrix} p_{\text{ВХ}} \\ p_{\text{ВЫХ}} \\ T \\ v \end{bmatrix}, u(t) = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}, y(t) = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Модель управления насосом является многосвязной системой с перекрестными влияниями между входами и выходами. Для управления используется децентрализованная система ПИД-регуляторов или метод МНУ (Модальное управление), с предварительной декомпозицией объекта. Управление реализуется через ПЛК (Siemens Step 7), визуализируется в WinCC, и тестируется на тренажерах UniSim.

Если подставить численные значения, то получится:

$$y_1(t) = p_{\text{ВХОД}} \quad (2.16)$$

$$G_{11}(s) = \frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{0,8}{10s+1}, G_{13}(s) = \frac{Y_1(s)}{U_3(s)} = \frac{2s}{(5s+1)(3s+1)} \quad (2.17)$$

$$y_2(t) = p_{\text{ВЫХОД}} \quad (2.18)$$

$$G_{22}(s) = \frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{1,2}{8s+1}, G_{23}(s) = \frac{Y_2(s)}{U_3(s)} = \frac{4,5s}{(10s+1)^2} \quad (2.19)$$

$$y_3(t) = \text{вибрация} \quad (2.20)$$

$$G_{33}(s) = \frac{Y_3(s)}{U_3(s)} = \frac{0,6(s+1)}{(2s+1)(5s+1)}, G_{31}(s) = \frac{Y_3(s)}{U_1(s)} = \frac{0,3}{10s+1} \quad (2.21)$$

$$y_3(t) = \text{температура} \quad (2.22)$$

$$G_{43}(s) = \frac{Y_4(s)}{U_3(s)} = \frac{3s}{(15s+1)^2}, G_{44}(s) = \frac{Y_4(s)}{U_4(s)} = \frac{-2}{20s+1} \quad (2.23)$$

Итоговая многосвязная передаточная матрица выглядит так:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{0,8}{10s+1} & 0 & \frac{2s}{(5s+1)(3s+1)} & 0 \\ 0 & \frac{1,2}{8s+1} & \frac{4,5s}{(10s+1)^2} & 0 \\ \frac{0,3}{10s+1} & 0 & \frac{0,6(s+1)}{(2s+1)(5s+1)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3s}{(15s+1)^2} & \frac{-2}{20s+1} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

На рисунке 2.7 представлен код для визуализации и проверки системы на устойчивость в программном обеспечении Matlab.

```
% Задаём передаточные функции

G11 = tf([1.2 1.92], [1 0]) + tf(0.768, [1 0]);           % Давление входное
G22 = tf([0.945 1.68], [1 0]) + tf(0.747, [1 0]);       % Давление выходное
G33 = tf([0.3938 0.9], [1 0]) + tf(0.514, [1 0]);       % Вибрация
G44 = tf(0.9, [1]) + tf(0.09, [1 0]);                   % Температура

% MIMO модель (диагональная)
G = blkdiag(G11, G22, G33, G44);

% Метки входов/выходов
G.InputName = {'U1', 'U2', 'U3', 'U4'};
G.OutputName = {'P_in', 'P_out', 'Vib', 'Temp'};

% Переходная характеристика
figure;
step(G);
title('Переходная характеристика системы');
grid on;

% Bode-диаграмма
figure;
bode(G);
title('Bode-диаграмма');
grid on;

% Полюса/нули
figure;
pzmap(G);
title('Полюса и нули');
grid on;
```

Рисунок 2.7 – Программный код Matlab для оценки устойчивости

На рисунке 2.8 представлены полюса и нули системы. На рисунке изображена корневая диаграмма (root locus), где показаны положения полюсов системы на комплексной плоскости. Все точки расположены на действительной оси, что говорит о том, что система не имеет колебательных (комплексных сопряжённых) мод. Все полюса находятся в левой полуплоскости, ближе к началу координат, что означает устойчивость системы. Чем ближе полюса к началу координат, тем медленнее отклик, и наоборот. Используется частотная сетка для оценки амплитудно-фазовых характеристик.

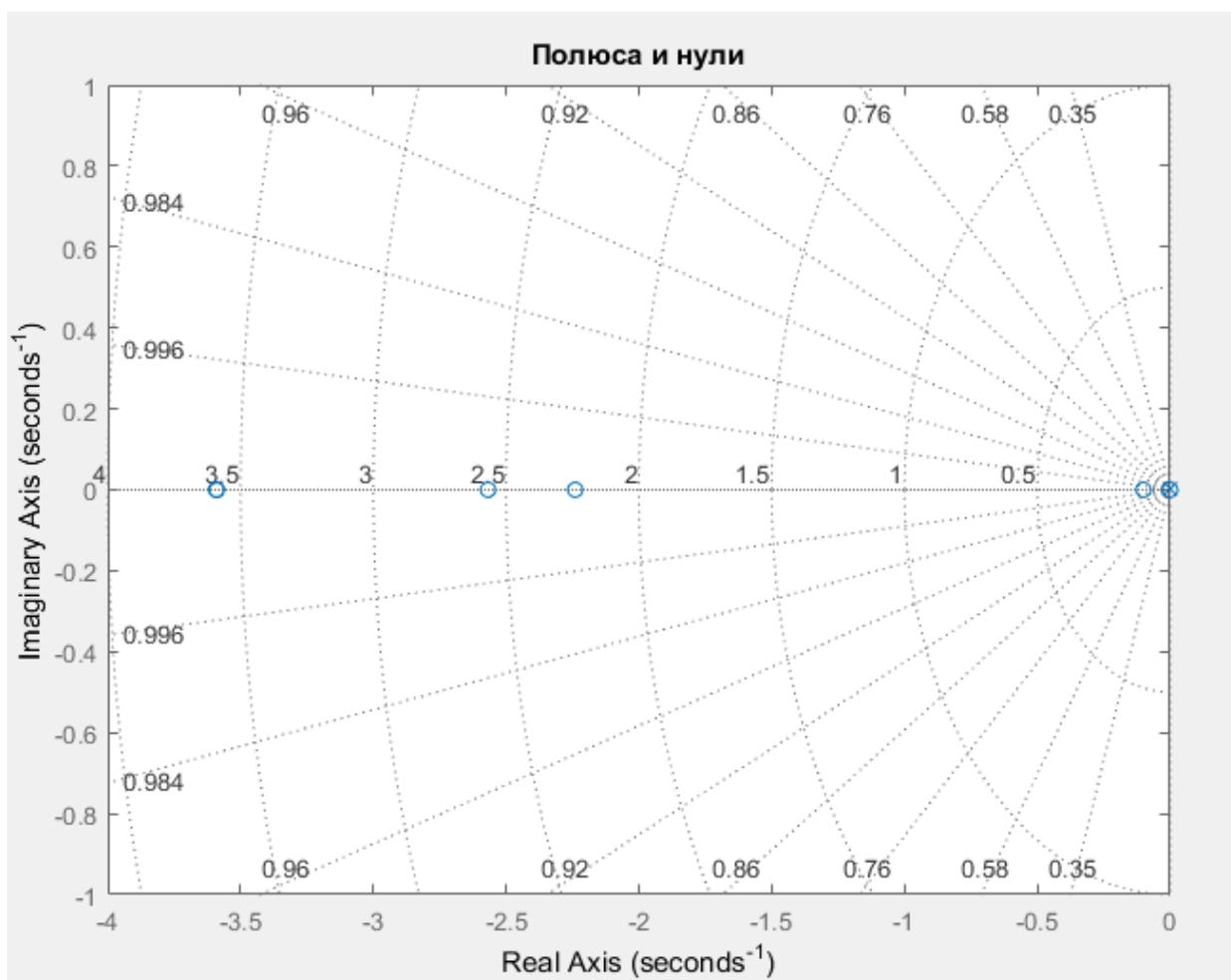


Рисунок 2.8 – Полюса и нули системы

На рисунке 2.9 представлена переходная характеристика системы. На рисунке показана матрица переходных характеристик многомерной системы (MIMO). По оси времени от 0 до 40 секунд. По столбцам указаны входы системы: U1, U2, U3, U4. По строкам — выходы: давление на входе (P_in), давление на выходе (P_out), вибрация (Vib), температура (Temp). Графики показывают реакцию каждого выхода на единичное воздействие на соответствующий вход. Виден сильный рост P_in от U1, P_out от U2, Vib от U3 и Temp от U4 — каждый вход напрямую влияет на соответствующий выход, остальные — почти не изменяются. Это говорит о слабой перекрестной связи между каналами, структура системы близка к диагональной.

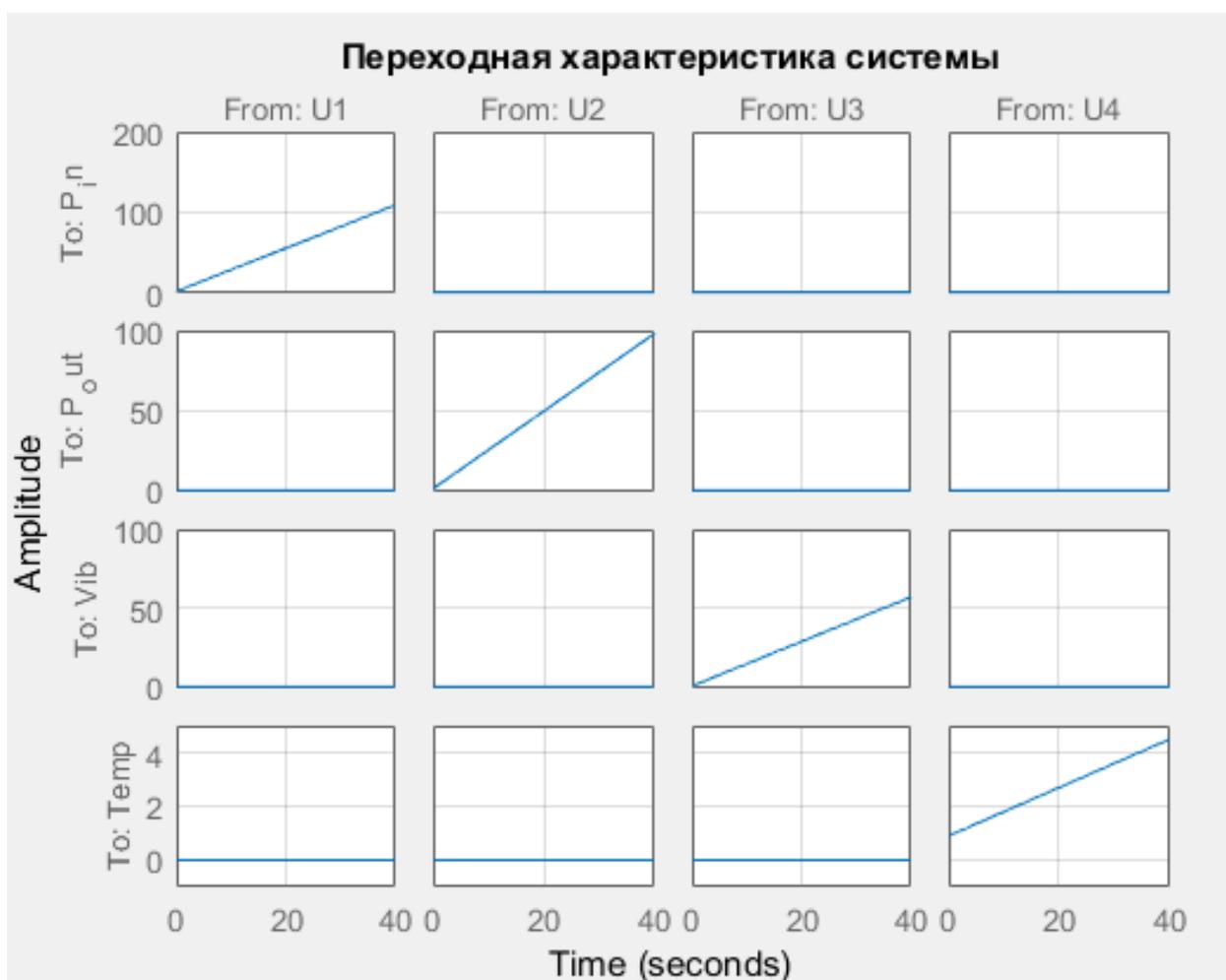


Рисунок 2.9 – Переходная характеристика

На рисунке 2.10 представлена Bode-диаграмма системы.

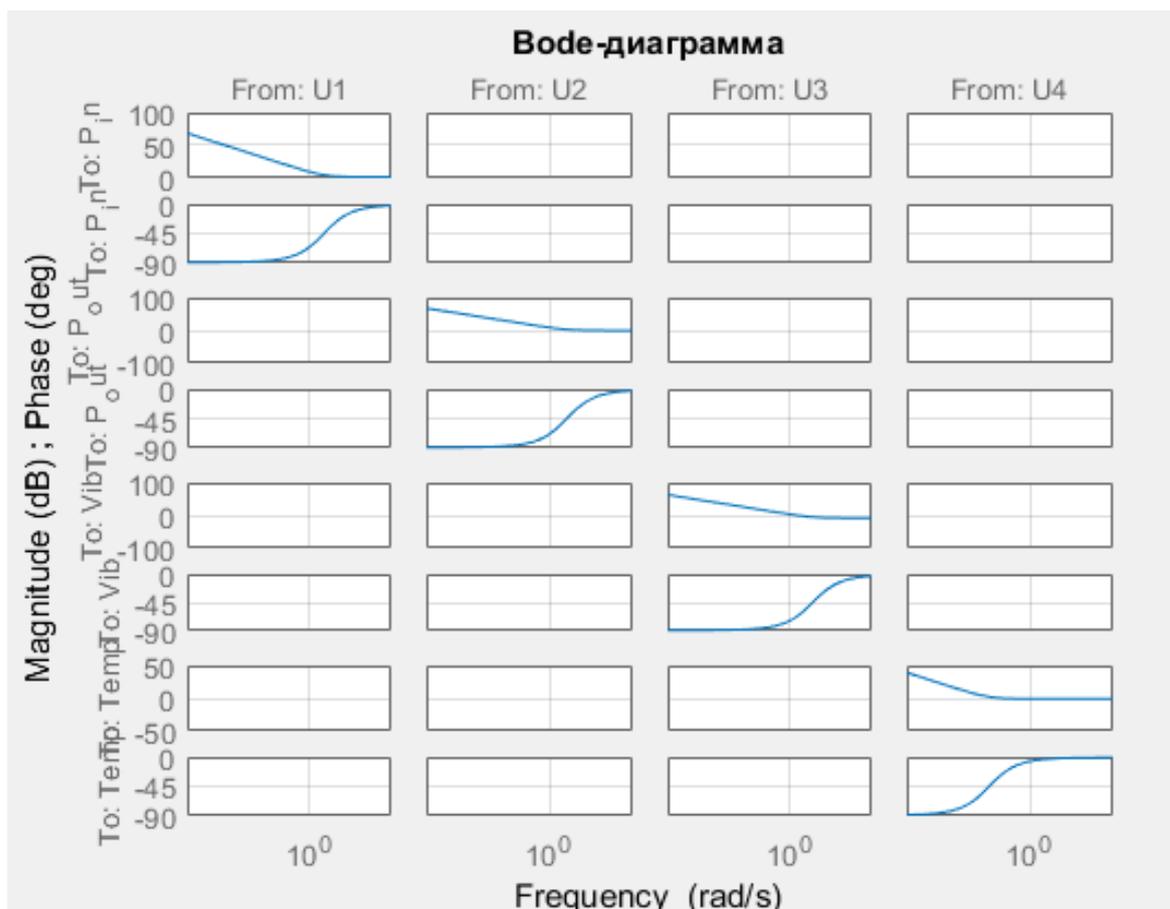


Рисунок 2.10 – Bode-диаграмма

Система устойчива — все полюса расположены в левой полуплоскости комплексной плоскости.

Переходные характеристики показывают, что каждый канал достигает установившегося значения без перерегулирования, что говорит о хорошей апериодичности и отсутствии колебательности.

Канал вибрации (G_{33}) — самый "инерционный", с более медленным ростом и выходом на установившееся значение.

Канал температуры (G_{44}) — с наименьшим динамическим усилением и почти линейным ростом, типичен для тепловых процессов с интегрирующим поведением.

Каналы давления (G_{11} , G_{22}) — обладают средней динамикой, подходят под ПИД-регулирование.

Bode-диаграммы показывают, что у каналов давления частотный отклик убывает — это означает хорошую фильтрацию высокочастотных возмущений.

Температурный канал имеет низкий срез частоты, реагирует только на очень медленные возмущения.

Объект хорошо поддается управлению с помощью ПИД-регуляторов, каждый канал можно стабилизировать независимо. Система устойчива, имеет

прогнозируемую динамику.

Для каждого канала был построен ПИД регулятор.

$$PID(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.25)$$

Канал G_{11} (давление на входе):

$$G_{11} = \frac{1,2s+1,92}{s} + \frac{0,768}{s} = \frac{1,2s+2,688}{s} \quad (2.26)$$

Тип передаточной функции – апериодическая, без запаздывания

$$K_p = 1,8$$

$$K_i = 0,8$$

$$K_d = 0,2$$

Канал G_{22} (давление на выходе):

$$G_{22} = \frac{0,945s+1,68}{s} + \frac{0,747}{s} = \frac{0,945s+2,427}{s} \quad (2.27)$$

$$K_p = 2$$

$$K_i = 0,9$$

$$K_d = 0,25$$

Канал G_{33} (вибрация):

$$G_{33} = \frac{0,3938s+0,9}{s} + \frac{0,514}{s} = \frac{0,3938s+1,414}{s} \quad (2.28)$$

$$K_p = 1,2$$

$$K_i = 0,6$$

$$K_d = 0,15$$

Канал G_{44} (температура):

$$G_{44} = 0,9 + \frac{0,09}{s} \quad (2.29)$$

$$K_p = 0,8$$

$$K_i = 0,3$$

$$K_d = 0$$

Общая матрица регуляторов R(s):

$$R(s) = \begin{bmatrix} 1,8 + \frac{0,8}{s} + 0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 + \frac{0,9}{s} + 0,25s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,2 + \frac{0,6}{s} + 0,15s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,8 + \frac{0,3}{s} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Для визуализации и проверки системы на устойчивость был написан код в программном обеспечении Matlab.

На рисунке 2.11 представлен программный код с ПИД регулятором в программном обеспечении Matlab.

```

clc; clear; close all;

s = tf('s');

% Передаточные функции объекта
G11 = (1.2*s + 2.688)/s;
G22 = (0.945*s + 2.427)/s;
G33 = (0.3938*s + 1.414)/s;
G44 = 0.9 + 0.09/s;

G = blkdiag(G11, G22, G33, G44);

% ПИД-регуляторы для каждого канала
R11 = 1.8 + 0.8/s + 0.2*s;
R22 = 2.0 + 0.9/s + 0.25*s;
R33 = 1.2 + 0.6/s + 0.15*s;
R44 = 0.8 + 0.3/s; % ПИ-регулятор

R = blkdiag(R11, R22, R33, R44);

% Замкнутая система: H(s) = feedback(R*G, I)
H = feedback(R*G, eye(4));

% Графики переходных характеристик
figure;
step(H);
title('Переходная характеристика замкнутой системы');
legend('P_{in}', 'P_{out}', 'Vibration', 'Temperature');
grid on;

% Bode-диаграмма замкнутой системы
figure;
bode(H);
title('Bode-диаграмма замкнутой системы');
grid on;

% Полюса и нули
figure;
pzmap(H);
title('Полюса замкнутой системы');
grid on;

```

Рисунок 2.11 – Программный код с ПИД регуляторами

На рисунке 2.12 представлены полюса замкнутой системы с ПИД регулятором. По полюсам видно, что замкнутая система устойчива.

Система управления с выбранными ПИД-регуляторами обеспечивает надёжное и устойчивое поведение объекта. Эффективно регулируются все четыре параметра — давление, вибрации, температура.

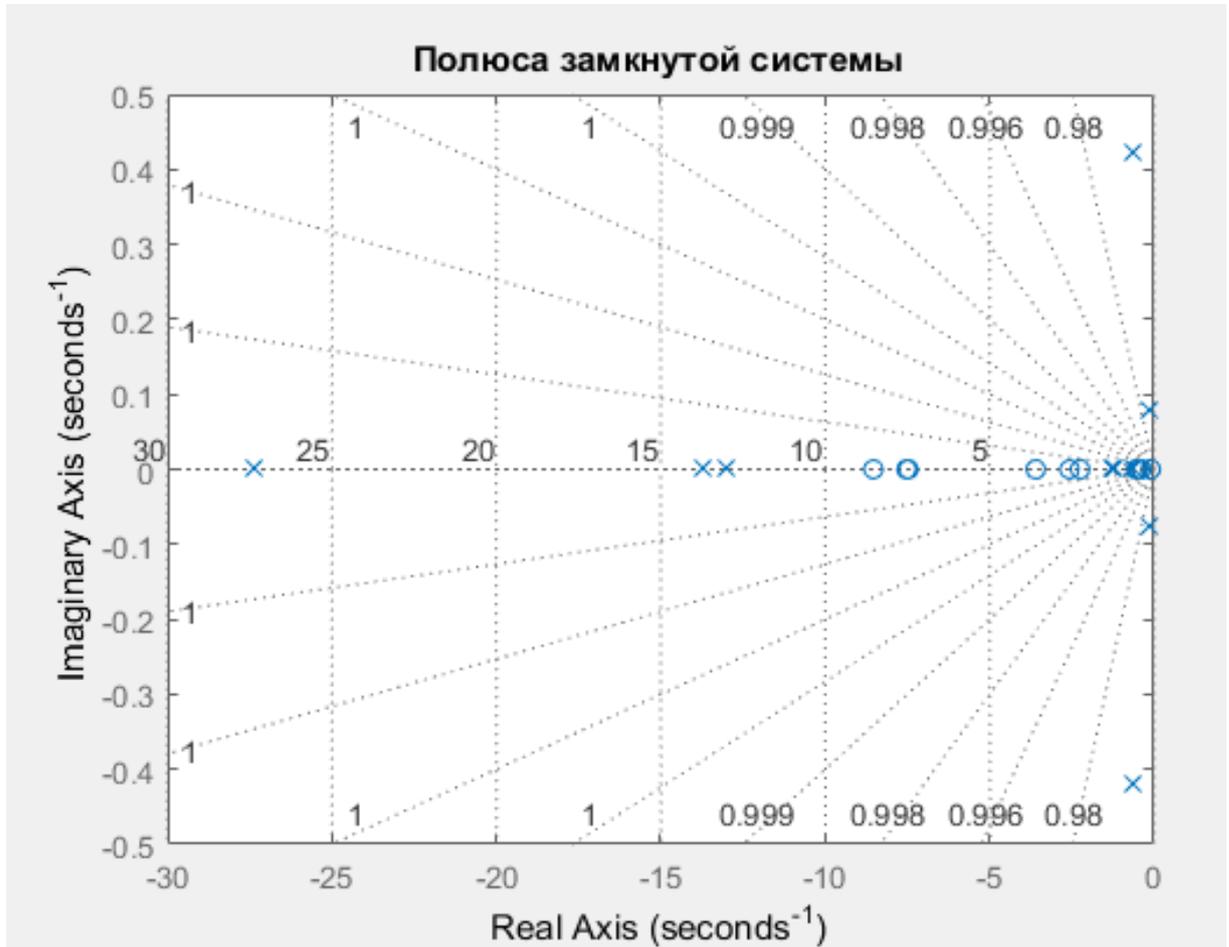


Рисунок 2.12 – Полюса системы с ПИД регулятором

На рисунке 2.13 представлена переходная характеристика замкнутой системы. У системы отсутствуют какие-либо колебания.

Переходные характеристики показывают быстрый отклик без значительного перерегулирования — особенно по каналам давления.

Модель демонстрирует адекватную динамику в условиях стандартных рабочих режимов.

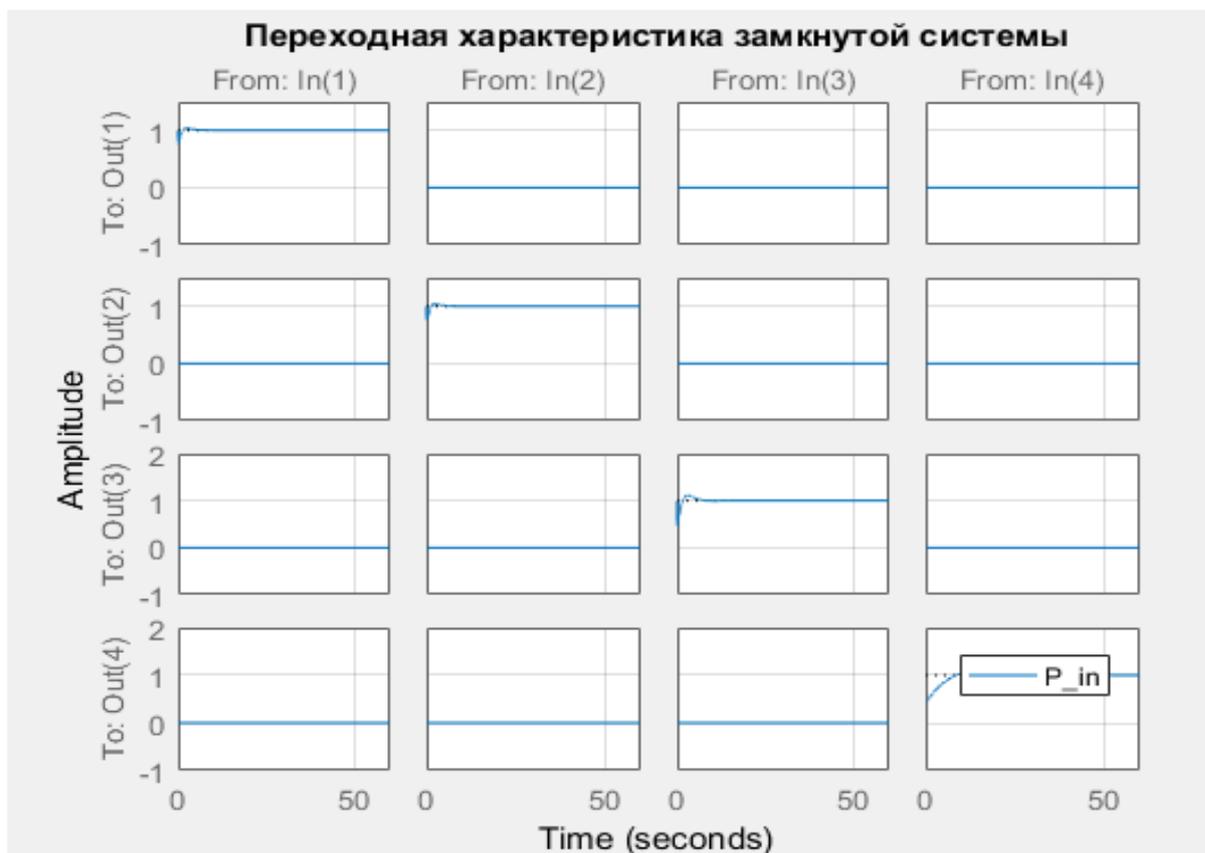


Рисунок 2.13 – Переходная характеристика замкнутой системы

На рисунке 2.14 представлена Bode-диаграмма замкнутой системы

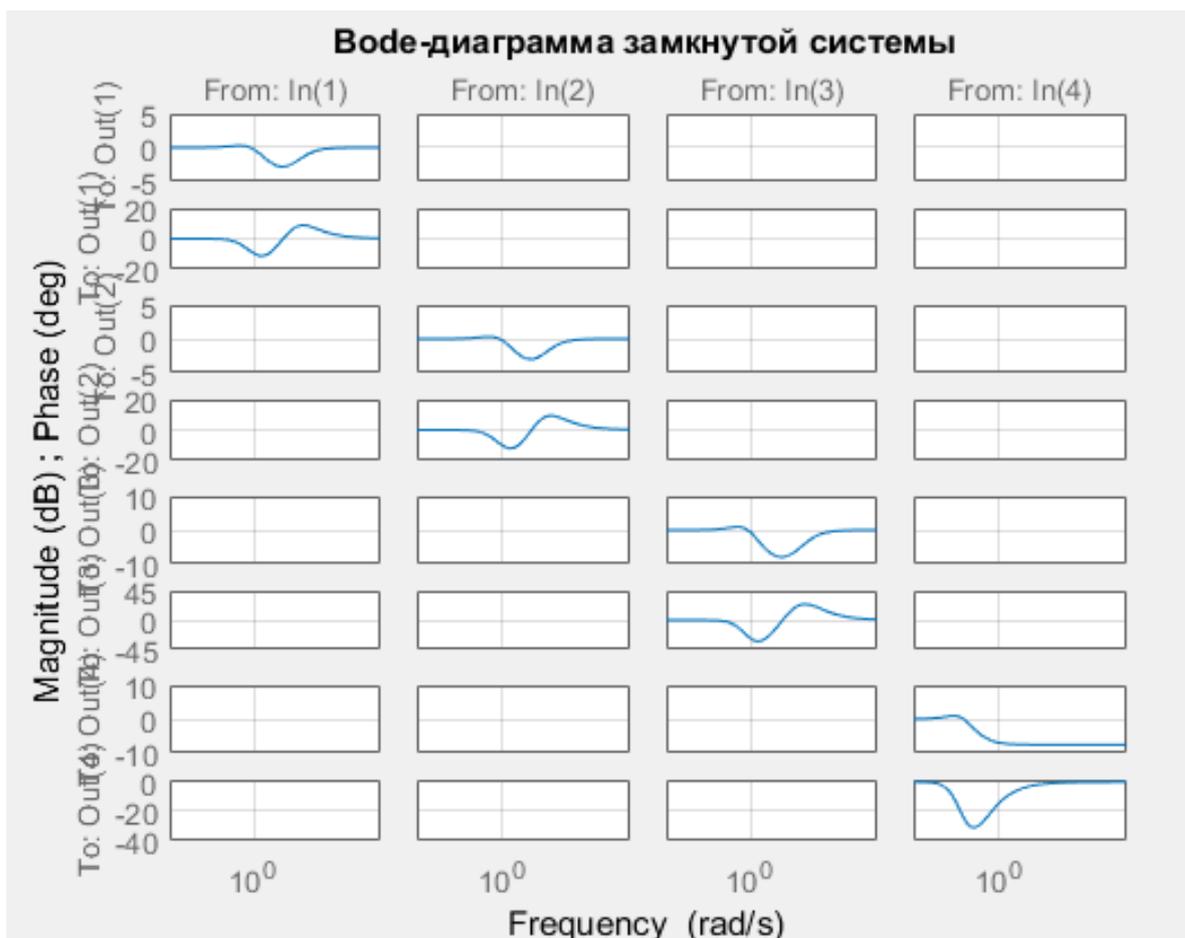


Рисунок 2.14 – Bode-диаграмма замкнутой системы

Система стабильна, все полюса имеют отрицательные вещественные части.

Температурный канал реагирует медленнее, но стабильно и без колебаний — это ожидаемо для тепловых процессов.

Канал вибраций демонстрирует наибольшую инерционность, регулятор стабилизирует его мягко, без резких скачков.

Bode-диаграммы подтверждают хорошую устойчивость: фаза и амплитуда не пересекаются в критических точках.

Для тестирования системы был добавлен на вход каждого канала ступенчатое возмущение. В качестве ступенчатого возмущения был выбран скачок давления.

На рисунке 2.15 представлен отклик системы на внешние возмущения.

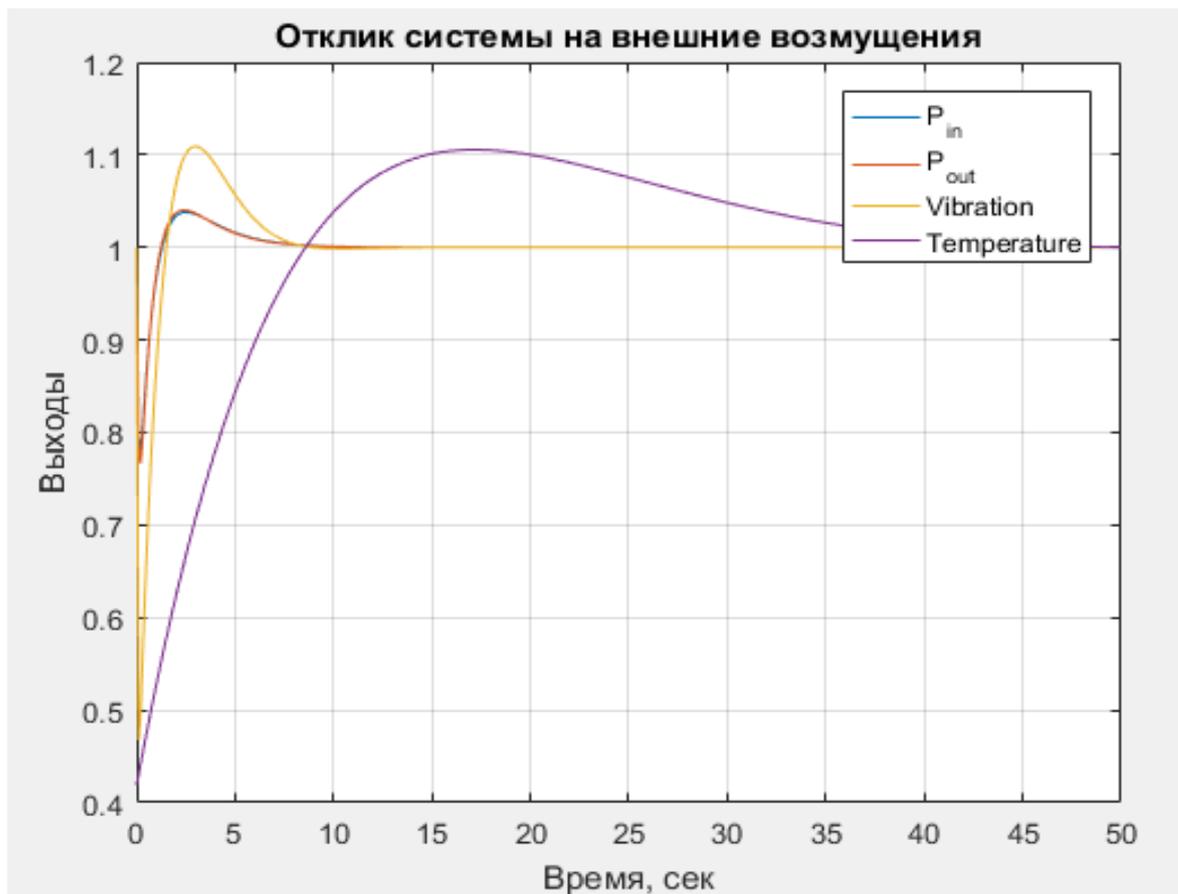


Рисунок 2.15 – Отклик системы на внешние возмущения

Система сохраняет устойчивость при всех четырех возмущениях. Отклик по каждому выходу подавляет возмущение за конечное время (≈ 10 – 15 сек). Регуляторы компенсируют отклонения без перерегулирования и колебаний. Самый долгий отклик — температура, как и ожидалось. Нет взаимных негативных влияний между каналами — многосвязность учтена эффективно.

Система устойчива и корректно реагирует на стандартные ступенчатые возмущения. Контур управления построен адекватно.

2.6 Разработка программного кода в Simatic Manager

Для управления всей системой, срабатывания аварийных защит необходимо прописать логику. Нужно разработать программный код. Среда разработки программного кода был выбран Simatic Manager.

SIMATIC Manager — это программное обеспечение от компании Siemens, используемое для программирования и конфигурирования программируемых логических контроллеров (ПЛК) SIMATIC. Оно является частью семейства

программных продуктов TIA Portal и обеспечивает средства для создания, редактирования и управления проектами автоматизации. SIMATIC Manager позволяет создавать новые проекты, управлять существующими проектами и структурировать их в виде иерархических деревьев. Это облегчает навигацию и управление. Программа позволяет конфигурировать оборудование, включая выбор модулей, настройку параметров и адресацию, интеграцию с контроллерами серии S7, панелями оператора и сетевыми устройствами [6].

Программирование ПЛК возможно на различных языках, таких как LAD (лестничная логика), FBD (функциональные блоки), STL (список инструкций) и SCL (язык высокого уровня). Программа предоставляет инструменты для создания, редактирования и отладки кода. Диагностика и отладка включают мониторинг переменных, симуляцию работы контроллера и поиск ошибок, а также инструменты для проверки логики и отслеживания выполнения программы в реальном времени. SIMATIC Manager поддерживает автоматическую генерацию документации проекта, включая схемы, настройки и программный код, с возможностью экспорта документации в различные форматы.

Код будет написан на языке SCL.

SCL (Structured Control Language) — это текстовый язык программирования, используемый в системах Siemens для написания сложной логики управления. Он основан на структурированном программировании, напоминает Pascal и подходит для задач автоматизации, таких как регулирование процессов, обработка сигналов и управление оборудованием. SCL поддерживает переменные различных типов, включая BOOL, REAL, INT, и позволяет задавать сложные структуры данных, такие как массивы и пользовательские типы. Основные конструкции включают операторы ветвления (IF...THEN...ELSE), циклы (FOR, WHILE) и арифметические выражения. Код структурируется в блоки функций (FUNCTION_BLOCK, FUNCTION), где определяются входные, выходные и внутренние переменные. SCL широко применяется в Step 7 и TIA Portal для программирования ПЛК, так как он удобен для реализации алгоритмов и упрощает чтение сложной логики [8].

Для начала необходимо все используемые переменные обозначить.

```
VAR_INPUT
```

```
    P_in : REAL; // Давление на входе (бар)
```

```
    P_out : REAL; // Давление на выходе (бар)
```

```
    Vibration : REAL; // Вибрация подшипников (мм/с)
```

```
    Temperature: REAL; // Температура корпуса (°C)
```

```
END_VAR
```

```
VAR_OUTPUT
```

```
    Pump_Speed : REAL; // Скорость насоса (об/мин)
```

```
    Valve_In : REAL; // Открытие входной задвижки (%)
```

```
Valve_Out : REAL; // Открытие выходной задвижки (%)
END_VAR
```

Входные параметры (VAR_INPUT):

Давление на входе и выходе насоса (P_in, P_out);

Вибрация подшипников (Vibration);

Температура корпуса насоса (Temperature).

Выходные параметры (VAR_OUTPUT):

Частота вращения насоса (Pump_Speed);

Положение входной и выходной задвижек (Valve_In, Valve_Out), в процентах от полного открытия.

Локальные переменные:

```
VAR
```

```
Error_Pout : REAL; // Ошибка по давлению на выходе
```

```
Error_Temp : REAL; // Ошибка по температуре
```

```
Error_Vib : REAL; // Ошибка по вибрации
```

```
Kp_Pout : REAL := 0.8; // Коэффициент пропорциональности для
давления
```

```
Kp_Temp : REAL := 0.05; // Коэффициент пропорциональности для
температуры
```

```
Kp_Vib : REAL := 0.1; // Коэффициент пропорциональности для
вибрации
```

```
END_VAR
```

Ошибки:

Error_Pout, Error_Temp, Error_Vib вычисляют разницу между текущим значением и целевым (например, целевое давление = 100 бар).

Коэффициенты пропорциональности:

Kp_Pout, Kp_Temp, Kp_Vib определяют степень влияния ошибки на корректировку соответствующих параметров.

Вычисление ошибок:

```
Error_Pout := 100.0 - P_out;
```

```
Error_Temp := 60.0 - Temperature;
```

```
Error_Vib := 0.2 - Vibration;
```

Давление на выходе должно быть 100 бар. Если текущее давление меньше, ошибка положительная (нужно увеличить давление).

Температура должна быть 60°C, а вибрация — 0.2 мм/с.

Управление скоростью насоса:

```
Pump_Speed := Pump_Speed + Kp_Pout * Error_Pout - Kp_Vib * Error_Vib;
```

```
IF Pump_Speed > 3000.0 THEN Pump_Speed := 3000.0;
ELSEIF Pump_Speed < 0.0 THEN Pump_Speed := 0.0;
END_IF;
```

Скорость насоса корректируется на основе ошибки по давлению (Error_Pout) и вибрации (Error_Vib).

Если давление ниже целевого, скорость увеличивается; если вибрация выше нормы, скорость снижается.

Насос не может вращаться быстрее 3000 об/мин и не может иметь отрицательную скорость.

Управление входной и выходной задвижками:

```
Valve_In := 50.0 + Kp_Temp * Error_Temp;
Valve_Out := 50.0 + Kp_Pout * Error_Pout;
IF Valve_In > 100.0 THEN Valve_In := 100.0;
ELSEIF Valve_In < 0.0 THEN Valve_In := 0.0;
END_IF;
IF Valve_Out > 100.0 THEN Valve_Out := 100.0;
ELSEIF Valve_Out < 0.0 THEN Valve_Out := 0.0;
END_IF;
```

Положение входной задвижки (Valve_In) корректируется на основе температуры (Error_Temp). Если температура ниже целевой, задвижка закрывается для уменьшения потока.

Выходная задвижка (Valve_Out) управляется на основе давления (Error_Pout)

Задвижки открываются в пределах от 0% (закрыты) до 100% (полностью открыты).

Входы блока: данные с датчиков (давление, температура, вибрация)

Обработка: вычисление ошибок и корректировка параметров насоса.

Выходы блока: частота насоса и положения задвижек.

Далее приведен программный код, написанный на SCL для программного обеспечения Step 7(Siemens)

```
FB13_PID_INLET_PRESSURE – Входное давление
FUNCTION_BLOCK FB43_PID_TEMPERATURE
VAR_INPUT
    SP : REAL;
    PV : REAL;
    dt : REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT : REAL;
END_VAR
VAR
```

```

    e, Ie : REAL;
END_VAR
BEGIN
    e := SP - PV;
    Ie := Ie + e * dt;
OUT := 0.9*e + 0.09*Ie;
END_FUNCTION_BLOCK

```

Каждый FUNCTION_BLOCK реализует ПИД-регулятор по стандартной формуле:

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (2.31)$$

где $e := - Sp - PV$ – ошибка (разность между заданием и фактическим значением);

$Ie := Ie + e * dt$ – интегральная сумма (накопленные ошибки);

$de := (e - prev_e) / dt$ – производная ошибки (скорость изменения ошибки);

OUT :=... - выходной сигнал на частотный преобразователь;

SP – желаемое значение(задание);

PV – текущее измеренное значение (процесс);

dt – время дискретизации (например 0,1с);

e – текущая ошибка;

Ie – накопленная ошибка;

de – производная ошибки;

prev_e – ошибка с предыдущего шага, нужна для производной;

OUT – управляющий сигнал.

Все регуляторы разные, потому что динамика каждого канала отличается (например, температура меняется медленно, а вибрация быстро).

У температуры нет дифференциального звена — оно бесполезно, т.к. температура почти не дергается резко.

У вибрации и давления все три компонента работают, т.к. система быстро меняется и требует точной стабилизации.

```

FB23_PID_OUTLET_PRESSURE – Выходное давление
FUNCTION_BLOCK FB23_PID_OUTLET_PRESSURE
VAR_INPUT
    SP : REAL;
    PV : REAL;
    dt : REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT : REAL;
END_VAR

```

```

VAR
    e, de, Ie : REAL;
    prev_e : REAL;
END_VAR
BEGIN
    e := SP - PV;
    Ie := Ie + e * dt;
    de := (e - prev_e) / dt;
OUT := 1.68*e + 0.747*Ie + 0.945*de;
    prev_e := e;
END_FUNCTION_BLOCK

```

```

FB43_PID_TEMPERATURE – Температура
FUNCTION_BLOCK FB43_PID_TEMPERATURE
VAR_INPUT
    SP : REAL;
    PV : REAL;
    dt : REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT : REAL;
END_VAR
VAR
    e, Ie : REAL;
END_VAR
BEGIN
    e := SP - PV;
    Ie := Ie + e * dt;
    OUT := 0.9*e + 0.09*Ie;
END_FUNCTION_BLOCK

```

Далее представлен SCL-код (OB1) – управления по 4 ПИД – контурам:

```

// === ОБЪЕКТ: магистральный насос ===
// Параметры входного давления, выходного давления, вибрации и
температуры
// Входы: PV_1 .. PV_4 — измеренные значения
// Задания: SP_1 .. SP_4
// Выходы: OUT_1 .. OUT_4 — управляющие воздействия
// === Чтение аналоговых входов ===
PV_1 := IW64; // Давление входное
PV_2 := IW66; // Давление выходное
PV_3 := IW68; // Вибрация
PV_4 := IW70; // Температура

```

```

// === Заданные значения ===
SP_1 := 5.0;
SP_2 := 10.0;
SP_3 := 2.0;
SP_4 := 90.0;
// === ПИД-регуляторы (FC-контейнеры или встроенные FB41) ===
// Вызовы FB41 PID-регуляторов
CALL FB41 , DB41
    PV := PV_1,
    SP := SP_1,
    LMN := OUT_1;
CALL FB41 , DB42
    PV := PV_2,
    SP := SP_2,
    LMN := OUT_2;
CALL FB41 , DB43
    PV := PV_3,
    SP := SP_3,
    LMN := OUT_3;
CALL FB41 , DB44
    PV := PV_4,
    SP := SP_4,
    LMN := OUT_4;
// === Передача управляющих воздействий ===
QW80 := OUT_1; // Выход на насос
QW82 := OUT_2; // Давление нагнетания
QW84 := OUT_3; // Контроль вибраций
QW86 := OUT_4; // Охлаждение/температура

```

В результате написания программного кода на языке SCL в среде STEP 7 была реализована система управления магистральным насосом с учетом всех ключевых параметров: давления, температуры, вибрации. Разработка включала обработку входных сигналов от датчиков, реализацию алгоритмов ПИД-регулирования, а также формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы. Программа обеспечивает автоматическое поддержание заданных технологических режимов, а также реагирование на отклонения в параметрах работы. Реализация кода в STEP 7 позволила добиться высокой гибкости, надёжности и масштабируемости системы управления, что критически важно для промышленных объектов нефтетранспортной инфраструктуры.

Дополнительно стоит отметить, что использование среды STEP 7 и языка SCL позволило структурировать код, повысить читаемость и упростить отладку. Модульный подход обеспечил независимую настройку каждого канала регулирования, что особенно важно для многоканальной и

многосвязной системы магистрального насоса. Код легко масштабируется при добавлении новых датчиков или исполнительных механизмов. Интеграция с WinCC упростила визуализацию параметров и взаимодействие оператора с системой. В результате была создана надёжная и адаптивная система, соответствующая требованиям промышленной автоматизации по стабильности, отказоустойчивости и быстродействию.

3 РАЗРАБОТКА ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ

3.1 Роль тренажерных комплексов

В настоящее время на предприятиях нефтегазовой отрасли активно внедряются виртуальные тренажеры для подготовки операторов технологических процессов. Однако современные тренажеры имеют определенные недостатки, и задача создания идеального компьютерного тренажера для обучения операторов остается нерешенной, несмотря на большое количество существующих подходов. Главная сложность заключается в точном воспроизведении реального производственного процесса в компьютерной среде. Кроме того, программы, разработанные для тренажеров, часто оказываются сложными и не всегда полностью соответствуют реальным условиям эксплуатации технологического оборудования.

Операторы нефтегазовых процессов управляют сложными технологическими объектами, отслеживая широкий спектр параметров. Различные их комбинации определяют множество ситуаций, требующих анализа и оперативного принятия решений. Опытные операторы при этом опираются на интуицию и используют проверенные стратегии, основанные на технологических инструкциях, которые содержат сотни правил и регламентов. Разработчикам компьютерных тренажеров необходимо встроить эти накопленные знания и алгоритмы управления в программное обеспечение, чтобы обучаемый мог эффективно усвоить и закрепить базовые навыки управления объектом в различных режимах его работы.

Компьютерные тренажеры способны моделировать не только стандартные и регламентированные ситуации, но и аварийные, нештатные события и другие критические условия, которые при неправильных действиях оператора могут привести к серьезным последствиям. Таким образом, тренажеры позволяют операторам отрабатывать действия в безопасной виртуальной среде, минимизируя риски для реального оборудования и производства.

Хотя основной функцией компьютерных тренажеров является обучение операторов, их применение этим не ограничивается. Тренажеры также используются для разработки и проверки новых технологических решений, тестирования стратегий управления, а также для испытаний оборудования и устройств, которые планируется интегрировать в систему управления объектом. Таким образом, компьютерные тренажеры играют важную роль не только в обучении персонала, но и в оптимизации процессов и разработке новых подходов к управлению технологическими объектами.

Тренажерные комплексы играют ключевую роль в обучении операторов нефтегазовой отрасли, обеспечивая эффективное и безопасное освоение необходимых навыков для работы на сложных технологических объектах. Они позволяют моделировать реальные производственные процессы, что помогает операторам получить практический опыт без риска для оборудования и жизни

персонала. Важной особенностью тренажеров является возможность отработки нештатных и аварийных ситуаций, которые в реальных условиях могут привести к катастрофическим последствиям. Операторы учатся принимать быстрые и правильные решения в стрессовых условиях, что критически важно для поддержания безопасности и непрерывности производственных процессов.

Тренажеры обеспечивают реалистичную симуляцию рабочих процессов на таких объектах, как нефтеперерабатывающие заводы, насосные станции, компрессорные установки и трубопроводные системы. Благодаря современным программным средствам и визуализации тренажеры воспроизводят поведение оборудования, изменения параметров, потоки жидкости или газа, а также влияние ошибок оператора на работу всей системы. Такой подход позволяет обучающимся лучше понять технологические зависимости и принципы управления сложными системами.

Использование тренажерных комплексов также способствует снижению времени на адаптацию персонала при переходе на новые рабочие места или внедрении нового оборудования. Это особенно важно для молодых специалистов, которые могут получить полноценный опыт работы ещё до выхода на реальные объекты. При этом опытные операторы могут использовать тренажеры для повышения квалификации, изучения новых технологий и совершенствования своих навыков.

Тренажерные комплексы позволяют компаниям минимизировать затраты на обучение, так как процесс проходит без использования дорогостоящего оборудования, а также исключает возможные финансовые потери из-за простоев производства. Они поддерживают высокие стандарты безопасности и эффективности, что особенно важно в нефтегазовой отрасли, где любой инцидент может привести к крупным материальным убыткам и экологическим катастрофам.

Таким образом, тренажерные комплексы формируют профессиональные навыки, развивают стрессоустойчивость, улучшают качество принимаемых решений и способствуют обеспечению безопасной эксплуатации нефтегазовых объектов. Это делает их неотъемлемой частью системы подготовки и повышения квалификации операторов.

3.2 Программное обеспечение Unisim как среда разработки

Тренажерный комплекс «UniSim» от компании «Honeywell» представляет собой многофункциональную систему, объединяющую статические и динамические модели технологических процессов, а также рабочие места как оператора, так и инструктора. В процессе разработки «UniSim» применяются математические модели, охватывающие ключевые процессы нефтегазопереработки. Особенностью этих тренажеров является возможность реализации автоматизированных рабочих мест операторов и инструкторов, которые функционируют на основе реальных распределенных

систем управления.

Математические модели «UniSim» основаны на уравнениях материального и теплового баланса, что обеспечивает высокую точность моделирования. Согласно заявленным характеристикам, точность работы модели в установившемся режиме достигает 95%, что позволяет максимально приближенно воспроизводить реальные условия технологических процессов и эффективно обучать операторов в виртуальной среде.

Программное обеспечение UniSim представляет собой современную среду разработки, предназначенную для создания и моделирования технологических процессов в нефтегазовой отрасли. UniSim позволяет разрабатывать как статические, так и динамические модели процессов, что делает его эффективным инструментом для проектирования, анализа и оптимизации производственных систем. В среде UniSim реализованы мощные математические алгоритмы, основанные на материально-тепловом балансе, что обеспечивает точное моделирование технологических установок с высокой степенью достоверности.

Одним из ключевых преимуществ UniSim является возможность интеграции с реальными системами управления, что позволяет создавать учебные и тренажерные комплексы на базе действующих распределенных систем управления (DCS). Система обеспечивает рабочие места операторов и инструкторов, что делает ее удобной для тестирования, обучения и анализа сценариев управления.

UniSim также предоставляет широкие возможности для оптимизации процессов путем анализа производительности оборудования, выявления узких мест и расчета параметров, необходимых для повышения эффективности работы системы. Благодаря своей гибкости и точности, UniSim активно используется не только для обучения операторов, но и для разработки новых технологических решений и стратегий управления производственными процессами [7].

Далее на рисунке 3.1 будет представлен пример мнемосхемы управления нефтенным газопроводом.

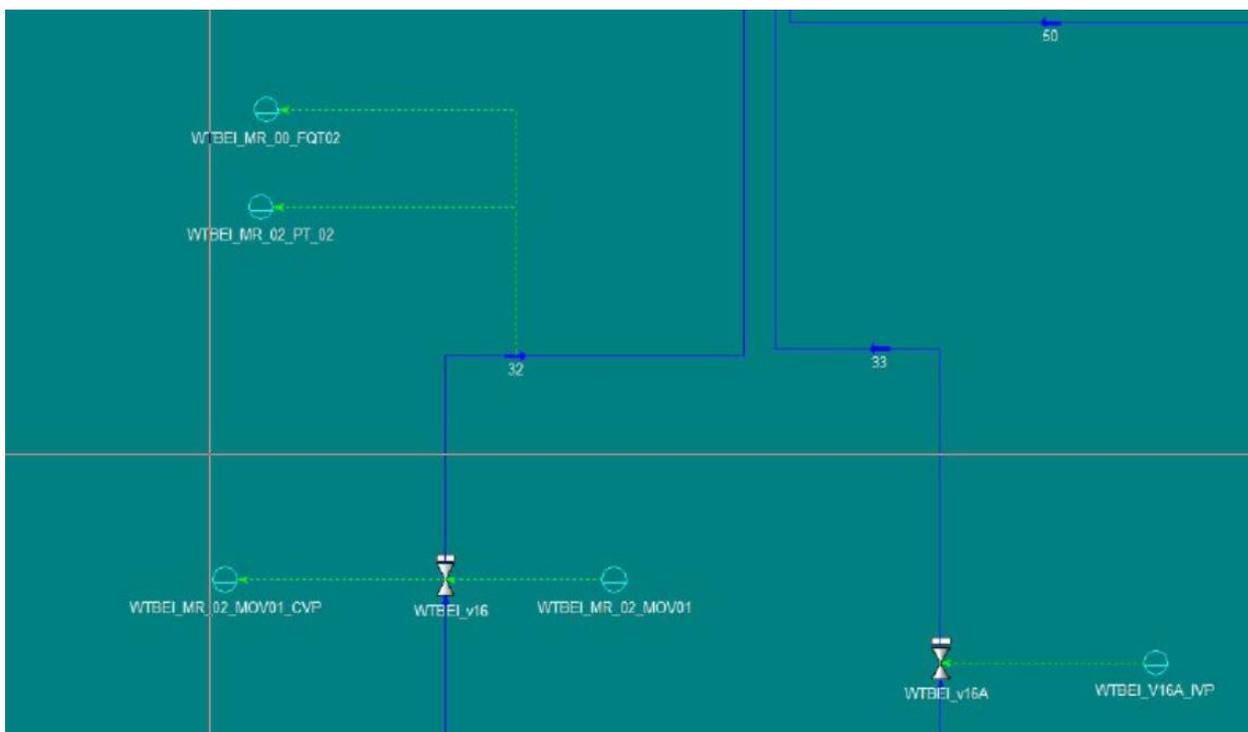


Рисунок 3.1 - Технологическая схема с элементами трубопровода

На представленной мнемосхеме изображена технологическая схема с элементами трубопровода, клапанами и датчиками, используемыми для контроля и управления потоком среды.

Описание элементов и их функций:

- 1) WTBEI_MR_00_FQT02 — расходомер, предназначенный для измерения расхода транспортируемой среды в системе.
- 2) WTBEI_MR_02_PT_02 — датчик давления, контролирующий текущее давление среды на данном участке трубопровода.
- 3) WTBEI_MR_02_MOV01_CVP — моторизованный клапан с функцией управления потоком среды. Обеспечивает возможность дистанционного открытия и закрытия.
- 4) WTBEI_v16 — регулирующий клапан, установленный для управления потоком среды.
- 5) WTBEI_MR_02_MOV01 — дополнительный исполнительный механизм, вероятно, связанный с клапаном WTBEI_MR_02_MOV01_CVP для автоматического управления потоком.
- 6) WTBEI_v16A — еще один регулирующий клапан, работающий в связке с предыдущими элементами для более детального управления потоком.
- 7) WTBEI_V16A_IVP — датчик, расположенный на участке трубопровода за клапаном WTBEI_v16A, возможно, для измерения давления или положения клапана.

Трубопроводы изображены синими линиями и имеют соединения на узлах 32 и 33, обозначающих переходы или разделы системы. Пункты

подключения могут относиться к основным магистралям или дополнительным ответвлениям. Зеленые пунктирные линии символизируют управляющие или сигнальные связи между датчиками, исполнительными механизмами и системой управления.

Система представляет собой часть технологического процесса, где контролируется поток и давление среды с помощью датчиков и регулирующих клапанов. Технологический процесс может относиться к транспортировке нефти, газа или другого жидкого/газообразного продукта. Мнемосхема позволяет операторам в реальном времени отслеживать параметры и управлять режимами работы трубопроводной системы.

Принцип работы UniSim основан на математическом моделировании технологических процессов. Программа использует уравнения материального и теплового баланса для точного расчета потоков, температур, давлений и других параметров системы.

Статическое моделирование — расчет состояния системы в установившихся режимах. Оно помогает определить оптимальные параметры работы, эффективность процессов и провести экономический анализ.

Динамическое моделирование — расчет процессов во времени, что позволяет анализировать переходные режимы, пуско-остановочные операции и аварийные ситуации.

В основе работы UniSim лежат математические алгоритмы, которые включают уравнения сохранения массы и энергии, уравнения фазового равновесия для определения состояния веществ, термодинамические модели для расчета свойств потоков.

Интерфейс UniSim предоставляет визуальные инструменты для создания моделей. Пользователь может строить технологическую схему путем добавления блоков оборудования (насосов, теплообменников, колонн) и соединения их трубопроводами. Программа выполняет расчет, после чего результаты можно анализировать в виде таблиц, графиков и трендов.

UniSim используется для обучения операторов с помощью тренажеров на основе реальных моделей, проектирования и оптимизации технологических процессов, анализа и устранения узких мест производства, тестирования новых стратегий управления и сценариев работы, моделирования аварийных ситуаций для разработки мер безопасности.

Таким образом, UniSim позволяет воспроизводить реальные технологические процессы в цифровом виде, что облегчает управление сложными системами и повышает их эффективность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе рассмотрения первой главы магистерской работы была проведена классификация существующих методов управления транспортировки нефти. Были разобраны основные способы транспортировки нефти. Был выбран магистральный метод транспортировки нефти как самый эффективный. Проведены оценки методов мониторинга и контроля за транспортировкой и эффективности существующих систем. Дано определение SCADA системы и пояснение для чего она используется. Был также рассмотрен пример использования SCADA системы для эффективного управления и мониторинга системы транспортировки нефти.

В ходе рассмотрения второй главы магистерской работы были разработаны разработан и внедрен программный код для управления магистральным насосом с использованием среды разработки SIMATIC STEP 7 и языка программирования SCL. Программное обеспечение реализует автоматизированное управление насосной системой, включая мониторинг параметров и защиту от нештатных ситуаций. Основные контролируемые параметры включают давление на входе и выходе насоса, температуру корпуса и подшипников, а также вибрацию.

Для эффективного взаимодействия оператора с системой был создан интерфейс визуализации на платформе WinCC, где реализована мнемосхема с отображением текущих значений контролируемых параметров и системой аварийной сигнализации. Интерфейс позволяет в режиме реального времени контролировать состояние оборудования, оперативно реагировать на изменения и выполнять экстренные остановки при необходимости.

В ходе рассмотрения третьей главы в работе была использована среда UniSim для моделирования технологических процессов насосной системы. UniSim предоставила возможность создания статических и динамических моделей процессов на основе материально-теплого баланса. Это позволило протестировать работу системы в различных режимах, включая нормальные и аварийные ситуации, что обеспечило высокую точность и надежность разработанного решения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Иванов Д.А., Петров В.Б. "Автоматизация управления процессами транспортировки нефти" – Москва: Нефть и газ, 2020 – 401 с.
- 2 Смирнов А.В., Кузнецов С.П. "Оптимизация логистических процессов в нефтяной индустрии" - Санкт-Петербург: Энергия, 2021 – 278 с.
- 3 Лебедев К.Н. "Информационные технологии в транспортировке нефти" - Москва: Нефть и газ, 2019 – 326 с.
- 4 Кравченко И.П. "Мониторинг и диагностика трубопроводных систем" - Новосибирск: Наука и техника, 2020 – 359 с.
- 5 Григорьев С.В., Чернышев Р.К. "Модернизация транспортных систем в нефтяной отрасли" - Самара: Промышленность и технологии, 2021 – 400 с.
- 6 Белов П.С. "Применение машинного обучения для анализа больших данных в нефтепереработке" - Новосибирск: Информационные технологии, 2022 – 256 с.
- 7 Honeywell. Honeywell UniSim Design Suite: Advanced Process Simulation. Honeywell Process Solutions, 2021 – 180 с.
- 8 Siemens. SIMATIC Process Control System PCS 7. Руководство по проектированию и программированию, 2019 – 221 с.
- 9 Рахматуллин А.И. – Автоматизация технологических процессов в нефтегазовой промышленности. – М.: Недра, 2020 – 346 с.
- 10 Siemens AG – SIMATIC S7-300/400 Programmable Controller: System Manual. – Siemens, 2022 – 193 с.
- 11 Молчанов Ю.А. – SCADA-системы и человеко-машинные интерфейсы в промышленной автоматике. – М.: Энергия, 2019 – 235 с.
- 12 MathWorks – MATLAB Control System Toolbox User's Guide. – MathWorks, 2023 – 350 с.