

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Гаитов Тамерлан Русланович

Разработка системы регулирования насосной станцией с учетом объемов добычи и состояния резервуаров

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к дипломному проекту

6B07103 – Автоматизация и роботизация

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



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

На тему: «Разработка системы регулирования насосной станцией с учетом объемов добычи и состояния резервуаров»

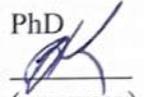
6В07103 – Автоматизация и роботизация

Выполнил

Гаитов Т.Р.

Рецензент

PhD

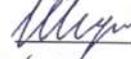
 Абжанова Л.К.

(подпись)

«13» июня 2025 г.

Научный руководитель

канд. техн. наук

 Ширяева О.И.

(подпись)

«16» 06 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

6B07103 – Автоматизация и роботизация



ЗАДАНИЕ
на выполнение дипломного проекта

Обучающемуся Гантову Т.Р.

Тема: «Разработка системы регулирования насосной станцией с учетом объемов добычи и состояния резервуаров».

Утвержден приказом Р. Ускенбаевой № 26-П/Ө от «29» января 2025 г.

Срок сдачи законченной работы: «25» мая 2025 г.

Исходные данные к проекту: передаточные функции основных элементов системы автоматического регулирования.

Перечень подлежащих к разработке в дипломном проекте вопросов:

- а) описание технологической части;
- б) разработка структурной схемы системы автоматического управления;
- в) разработка функциональной схемы автоматизации системы управления процессом;
- г) расчетная часть;
- д) разработка программы управления.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): функциональная схема автоматизации насосной станции.

Рекомендуемая основная литература:

1. Ефимов, Л. Я. Автоматизация процессов нефтегазовой промышленности : учеб. пособие / Л. Я. Ефимов, Ю. Н. Беляев. — СПб. : Профессия, 2018. — 312с.
2. Пашенко, В. П. Приборы и системы контроля уровня жидкостей : справочник / В. П. Пашенко, И. В. Смирнов. — М. : Машиностроение, 2009. — 256 с.
3. Siemens. SIMATIC S7-1500. Контроллеры нового поколения : каталог и техн. документация. — М. : ООО «Сименс», 2021. — 148 с.
4. Гольдштейн, М. А. Пневмоприводы и регулирующая арматура : теория и практика / М. А. Гольдштейн. — М. : Энергоатомиздат, 2017. — 224 с.
5. Титов, А. В. Моделирование динамики технологических объектов в MATLAB/Simulink : учеб. пособие / А. В. Титов, Е. С. Иванова. — М. : Форум, 2020. — 208 с.
6. Ким, Д. П. Теория автоматического управления / Д. П. Ким. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2016. — 352 с.

ГРАФИК
подготовки дипломного проекта

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологический раздел Описание насосной станции	13.02.2025 г.	
Технологический раздел Разработка функциональной схемы автоматизации системы насосной станции	06.03.2025 г.	
Технологический раздел Выбор оборудования	28.03.2025 г.	
Расчетный раздел Расчетная часть	14.04.2025 г.	
Расчетный раздел Создание программы управления	25.05.2025	

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченный дипломный проект с указанием относящихся к ним разделов проекта

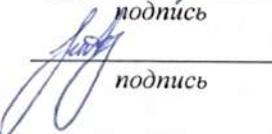
Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Технологический раздел	О. И. Ширяева канд. техн. наук	29.05	
Расчетный раздел	О. И. Ширяева канд. техн. наук	29.05	
Нормоконтролер	К. А. Манатов магистр техн. наук	11.06	

Научный руководитель


подпись

Ширяева О. И

Задание принял к исполнению обучающийся


подпись

Гаитов Т. Р

Дата

«31» января 2025 г.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жоба мұнай өндіру көлемі мен резервуарлардың жағдайын ескере отырып, насос станциясын реттеу жүйесін әзірлеуге арналған.

Жоба барысында басқарудың функционалдық схемасы жасалды, жабдықтар таңдалды, соның ішінде Siemens программаланатын логикалық контроллері, реттегіш клапан және жетекті позиционер іріктелді. Басқару логикасы объектіні автоматтандырылған басқару үшін LAD тілінде жүзеге асырылды. Сонымен қатар, реттегішті баптаудың ең тиімді әдісін анықтау үшін бірнеше әдіспен есептеулер жүргізілді.

Әр әдістен алынған деректерге сүйене отырып, реттегішті баптауға ең қолайлы әдіс таңдалды. Әзірленген насос станциясын реттеу жүйесі жоғары тұрақтылықпен және сенімділікпен ерекшеленеді және оны нақты өндірістік жағдайларда қолдануға болады.

АННОТАЦИЯ

Данный дипломный проект посвящён разработке системы регулирования насосной станцией с учетом объемов добычи и состояния резервуаров.

На этапах работы была выполнена работа по разработке функциональной схемы управления, выбор оборудования и выбором программируемого логического контроллера Siemens, регулирующего клапана и позиционера с приводом. Логика управления была реализована на языке LAD для автоматизированного управления объектом. Также были произведены расчеты по нескольким методам для определения наилучшей настройки регулятора.

Учитывая полученные данные с каждого метода, был выбран наиболее благоприятный метод для настройки регулятора. Разработанная система регулирования насосной станций отличается высокой устойчивостью и надежностью, и может быть применена в реальных условиях

ABSTRACT

This graduation project is devoted to the development of a pumping station control system, taking into account the production volumes and the condition of reservoirs.

At the stages of the work was done to develop a functional control scheme, selection of equipment and selection of programmable logic controller Siemens, control valve and positioner with actuator. The control logic was realized in LAD language for automated control of the object. Calculations were also performed using several methods to determine the best controller setting.

Considering the data obtained from each method, the most favorable method for regulator tuning was selected. The developed system of regulation of pumping station is characterized by high stability and reliability, and can be applied in real conditions

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Технологическая часть	9
1.1 Описание насосной станции	9
1.2 Области применения насосной станции	11
1.3 Описание объекта автоматизации	12
1.4 Определение точек контроля	13
1.5 Определение структуры АСУ ТП	13
2 Разработка функциональной схемы автоматизации	15
2.1 Функциональная схема автоматизации	15
2.2 Выбор оборудования	16
3 Расчетная часть	22
3.1 Постановка задачи для синтеза контура управления	22
3.2 Разработка структурной схемы	22
3.3 Анализ динамических свойств системы	23
3.4 Синтез типового регулятора	25
3.5 Выбор эмперического метода	34
4 Создание программы управления	37
4.1 Разработка алгоритма	37
4.2 Разработка программы управления уровнем в резервуаре в ТИА-portal	37
Заключение	41
Список использованной литературы	42
Приложение А	43

ВВЕДЕНИЕ

Сейчас большое значение имеет надежная работа систем, которые перекачивают и распределяют жидкости. Насосные станции в этих системах играют ключевую роль, чтобы обеспечивать подачу жидкости в нужные точки и поддерживать стабильность всего процесса. Без этого невозможно представить нормальное функционирование оборудования.

В таких системах зачастую применяются резервуары, которые помогают снизить колебания давления и компенсировать нерегулярный приток или отвод жидкости. Это имеет особое значение в случаях, когда поток жидкости характеризуется нестабильностью или периодичностью. Использование резервуаров позволяет избежать резких колебаний и обеспечивает более стабильную работу всей системы.

Для обеспечения надежной работы системы без постоянного вмешательства со стороны оператора применяется автоматическое управление. Данные системы способны контролировать уровень жидкости, адаптироваться к изменениям условий и поддерживать необходимые параметры без сбоев. В современных реалиях это становится особенно важным, учитывая возрастающие требования к безопасности, эффективности и экономичности функционирования оборудования.

Цель дипломного проекта. Состоит в создании автоматизированной системы контроля уровня нефти в резервуаре, которая будет обеспечивать стабильную и надежную работу в условиях переменного притока. Для реализации этой цели предполагается выбор необходимого оборудования, разработка математической модели и внедрение системы управления, способной поддерживать заданный уровень жидкости посредством регулирования работы клапана. Для подачи нефти используется штанговый глубинный насос.

Актуальность темы исследования. В нефтедобывающей отрасли стабильность и безопасность технологических процессов напрямую связаны с надежным мониторингом уровня жидкости в резервуарах. При колебаниях притока нефти увеличивается вероятность как переполнения, так и аварийного падения уровня, что может вызвать простой оборудования и значительные финансовые потери. Современные методы автоматизации способствуют не только увеличению точности регулирования, но и снижению влияния человеческого фактора. Они также обеспечивают устойчивость системы при изменении нагрузки и помогают сократить эксплуатационные расходы.

Общая характеристика. В данном дипломном проекте была изучена проблема автоматического контроля уровня нефти в резервуаре в качестве объекта автоматизации. Рассмотрены особенности технологического процесса, включая назначение резервуара, природу притока нефти и функцию регулирующего клапана в управлении уровнем.

Для разработки математической модели объекта была определена структура системы, которая включает пневмопривод, регулирующий клапан и резервуар. Исходя из физических характеристик этих элементов, была

сформирована передаточная функция разомкнутой системы, учитывающая их инерционные свойства.

В дальнейшем был осуществлён анализ устойчивости системы, а также проведён синтез регуляторов с использованием следующих методов: метод Циглера–Николса №1, метод Чина–Хронесса–Ресвика и метод Скогестада (SIMC). Каждый из этих методов был применён для настройки P, PI и PID-регуляторов с целью достижения оптимального переходного процесса.

Результаты настройки были сопоставлены по таким критериям, как качество регулирования, скорость отклика и устойчивость. На основании проведённого анализа был выбран оптимальный вариант, который гарантирует необходимую точность и надёжность функционирования системы.

На завершающем этапе был осуществлён выбор аппаратного обеспечения, включая датчик давления, регулирующий клапан с пневмоприводом и программируемый логический контроллер Siemens S7-1500 с требуемыми модулями. Кроме того, был разработан алгоритм управления, который обеспечивает поддержание установленного уровня нефти в резервуаре при наличии внешних возмущений.

Задачи дипломного проекта. Анализ системы автоматического регулирования уровня в резервуаре насосной станции. Синтез типового регулятора для получения наилучшей работы системы, и анализа результатов. Разработка алгоритма управления насосной станции.

1 Технологическая часть

1.1 Описание насосной станции

Резервуарное хранение нефти является центральным элементом технологических схем добычи и переработки нефти. Резервуарное хранение действует как буферная емкость, обеспечивая временное накопление сырья и сглаживая колебания расхода во время добычи и транспортировки. Использование резервуаров позволяет стабилизировать работу оборудования и избежать резких скачков давления и уровня, которые могут привести к авариям или нарушению технологического режима.

В этом проекте рассматривается система, которая автоматически регулирует уровень нефти в резервуаре. Вся работа строится на том, чтобы поддерживать уровень на заданной высоте — ни выше, ни ниже. Для этого используется регулирующий клапан, через который нефть подаётся в резервуар.

В этом проекте рассматривается система, которая автоматически регулирует уровень нефти в резервуаре. Вся работа строится на том, чтобы поддерживать уровень на заданной высоте — ни выше, ни ниже. Для этого используется регулирующий клапан, через который нефть подаётся в резервуар.

Сам по себе резервуар имеет большую ёмкость, и уровень в нём меняется довольно медленно. Это удобно, потому что даёт время системе среагировать, если что-то меняется — например, увеличился приток нефти со скважины. В системе также установлен датчик уровня, который постоянно измеряет текущий уровень жидкости и передаёт данные в контроллер. А тот уже решает, насколько нужно открыть клапан.

Для точного управления используется пневматический привод, а вся логика управления реализована на контроллере Siemens. Чтобы всё работало слаженно, в систему также входит датчик давления — он нужен для мониторинга состояния перед клапаном и срабатывания аварийной защиты, если что-то идёт не так.

Такая автоматизация помогает избежать ошибок, работает стабильно даже при колебаниях условий и почти не требует постоянного вмешательства оператора. Всё оборудование подбиралось так, чтобы оно подходило для работы с нефтью и могло интегрироваться в промышленные системы управления.

Насосная станция играет важную роль в переносе нефти из резервуара к следующему этапу переработки или хранения. Она создает нужное давление и поток, чтобы нефть могла двигаться по трубам. Обычно в состав станции входят один или несколько насосов, система с запорной арматурой, фильтрами и обратными клапанами, а также приборы для контроля давления, температуры и расхода.

Насосная станция играет важную роль в переносе нефти из резервуара к следующему этапу переработки или хранения. Она создает нужное давление и поток, чтобы нефть могла двигаться по трубам. Обычно в состав станции входят

один или несколько насосов, система с запорной арматурой, фильтрами, а также приборы для контроля давления, температуры и расхода.

Таким образом, насосная станция в автоматизированной системе не просто перекачивает жидкость, а становится ключевым элементом управления процессом, обеспечивая его бесперебойную работу и безопасность.

В данной насосной станции используется станок-качалка типа ШГН (штанговый глубинный насос), который применяется для механизированной добычи нефти из скважины. Работа ШГН основана на возвратно-поступательном движении штанг, соединённых с насосом, расположенным в нижней части скважины. За счёт движения маятникового механизма, передающего усилие через редуктор от электродвигателя, осуществляется подъём жидкости из пласта на поверхность. В данной системе установлен частотный преобразователь, с помощью которого регулируется скорость вращения электродвигателя. Это позволяет изменять частоту колебаний маятника и, соответственно, управлять объёмом добычи нефти в зависимости от текущих потребностей и состояния приёма. Благодаря такому подходу обеспечивается более гибкое и энергоэффективное управление процессом добычи. На рисунке 1.1 показана схема штангового глубинного насоса

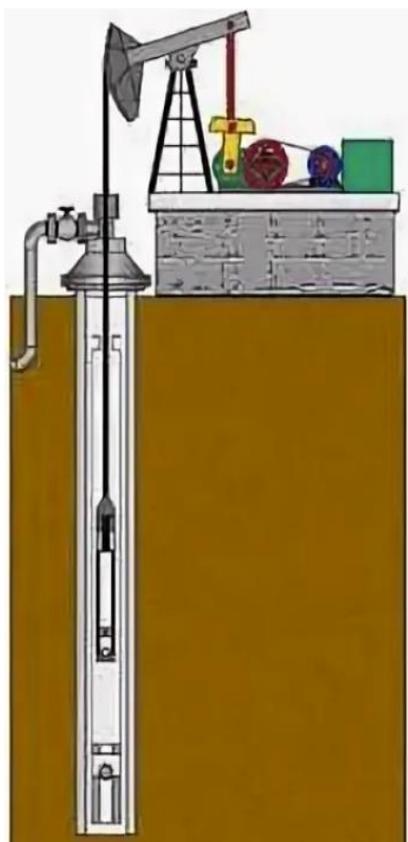


Рисунок 1.1 – Штанговый глубинный насос

1.2 Области применения насосной станции

Системы автоматического регулирования уровня жидкости находят широкое применение в самых разных отраслях промышленности. Их основная задача — поддерживать нужный уровень в резервуарах, чтобы избежать переполнения, сбоев в подаче и других аварийных ситуаций. Такие системы помогают сделать процесс более стабильным, безопасным и удобным для обслуживания.

В нефтяной и газовой промышленности они особенно важны. При добыче нефти приток жидкости в резервуары может быть неравномерным. Чтобы не допустить переполнения или резкого падения уровня, нужна система, которая будет постоянно отслеживать изменения и вовремя регулировать подачу. Это позволяет избежать потерь, остановок оборудования и упрощает контроль за технологическим процессом.

В химической и перерабатывающей промышленности тоже часто применяются такие системы. Здесь важно точно дозировать жидкости, особенно когда они участвуют в реакциях. Автоматическое регулирование уровня позволяет избежать ошибок, сохранить нужные пропорции и обеспечить устойчивую работу всего оборудования.

На предприятиях энергетики такие системы нужны для контроля воды, топлива и других рабочих жидкостей. Например, в котельных или в системах охлаждения турбин важно, чтобы уровень всегда был в пределах нормы. Это влияет и на безопасность, и на эффективность работы всей установки.

Часто системы регулирования уровня становятся частью больших автоматизированных комплексов управления. Они могут работать вместе с другими модулями, которые отвечают за давление, температуру, расход. Всё это позволяет настроить технологический процесс точно под конкретные условия.

Современные устройства, такие как пневмоприводы, контроллеры и интеллектуальные датчики, делают такие системы точными, надёжными и удобными в использовании. Благодаря им можно легко встроить управление уровнем в общую автоматизацию производства.

В целом, автоматические системы регулирования уровня — это универсальное и надёжное решение для самых разных производственных задач. Они помогают избежать сбоев, экономят ресурсы и упрощают работу персонала.

Системы автоматического регулирования уровня жидкости используются не только в основных промышленных отраслях, но и в пищевой, фармацевтической и водоочистой сферах. Например, в производстве напитков и молочной продукции важно точно следить за уровнем жидкостей в ёмкостях, чтобы соблюдать рецепты и санитарные нормы. В фармацевтике любые незначительные отклонения могут повлиять на качество лекарства, поэтому здесь автоматизация очень важна.

В системах водоснабжения и канализации правильное регулирование уровня помогает поддерживать работу насосных станций, предотвращать затопления и обеспечивать бесперебойную подачу воды. Это особенно

актуально для больших городов, где важно держать инфраструктуру в порядке и сократить расходы на ремонт.

Важно, чтобы такие системы работали быстро и точно. Современные регуляторы могут учитывать разные факторы: не только текущий уровень жидкости, но и скорость изменений, влияние внешних условий и режимы работы оборудования. Это помогает предотвратить аварии до того, как они произойдут.

Новые технологии, такие как цифровая связь (например, HART, Profibus, Modbus), позволяют подключать системы регулирования уровня к централизованным системам управления. Это даёт возможность удалённого мониторинга, хранения данных и более точной диагностики оборудования.

Автоматические системы также снижают влияние человеческого фактора. Операторы могут сосредоточиться на более сложных задачах, а рутинные проверки и регулирование проходят автоматически. Это повышает надёжность производства и уменьшает вероятность ошибок.

В итоге, автоматизация регулирования уровня - это не просто удобство, а важный элемент современных производственных систем. Она помогает обеспечить бесперебойную работу процессов, уменьшить риски, сэкономить ресурсы и соответствовать современным стандартам качества и безопасности.

1.3 Описание объекта автоматизации

В этом проекте объектом автоматизации выступает система, отвечающая за регулирование уровня нефти в резервуаре. Такой резервуар используется для накопления жидкости, поступающей с месторождения, и позволяет выравнять поток, особенно при нестабильной добыче. Это важно для того, чтобы дальше по технологической цепочке оборудование получало поток с нужными параметрами, без скачков и перебоев.

Вся система построена по классической схеме: есть измерение текущего уровня, есть управляющее воздействие — регулирующий клапан, который открывается или закрывается в нужной степени. Управление клапаном происходит не вручную, а автоматически — через пневмопривод и контроллер. Когда уровень начинает отклоняться от заданного, система корректирует подачу, стремясь вернуть его в норму.

Дополнительно в систему включён датчик давления, установленный перед клапаном. Он обеспечивает контроль рабочего состояния линии и играет важную роль в аварийной защите — например, при превышении допустимого давления может инициироваться аварийный сигнал или отключение подачи.

Особенностью данного объекта является высокая инерционность резервуара, что требует учёта при проектировании системы автоматического регулирования. Изменения уровня происходят не мгновенно, а с задержкой, поэтому система должна быть устойчива и способна плавно реагировать на возмущения.

Используемое оборудование — датчики, клапан, привод и ПЛК — подобрано с учётом специфики нефтяной среды: оно обладает необходимым уровнем герметичности, устойчивостью к агрессивным условиям, и совместимо с промышленными стандартами связи и управления. Также возможна интеграция данной системы в более крупную АСУ ТП предприятия.

Автоматизация данного объекта позволяет снизить риск человеческой ошибки, обеспечить бесперебойную работу оборудования, повысить безопасность и упростить эксплуатацию, особенно в условиях длительной непрерывной работы.

1.4 Определение точек контроля

Для реализации системы регулирования уровня нефти в резервуаре насосной станции необходимо обеспечить:

- дистанционное управление процессом;
- сбор и обработку данных с оборудования;
- мониторинг ключевых параметров;
- автоматическое реагирование на аварийные ситуации.

По результатам анализа определены основные точки контроля:

- уровень нефти в резервуаре, поддерживаемый в пределах уставки; при выходе за границы активируется аварийная защита;
- давление перед регулирующим клапаном, позволяющее отслеживать засоры, перегрузки и нарушения в подаче;
- положение регулирующего клапана, отображаемое в процентах открытия для диагностики работы исполнительного механизма;
- аварийные сигналы формируются при критических отклонениях: переполнение, «сухой» ход.

Управляющие воздействия включают:

- регулирование расхода нефти через управляющий сигнал на клапан;
- задание уставки уровня вручную.

Аварийные остановки системы инициируется при превышении уровня, недопустимом давлении, потере сигнала с датчиков. Все сигналы обрабатываются ПЛК и отображаются на операторском интерфейсе.

1.5 Определение структуры АСУ ТП

Система управления насосной станцией разрабатывается с учетом требований к точности, надежности, безопасности и удобству использования. Она должна поддерживать уровень нефти в резервуаре и быстро реагировать на любые проблемы.

Точное поддержание уровня достигается благодаря постоянному контролю важных показателей, таких как расход жидкости, положение клапана

и давление в трубах. Система плавно регулирует подачу нефти, избегая резких изменений.

Надежность обеспечивается встроенными диагностическими средствами. Если уровень или давление выходят за пределы, система подает сигналы о проблеме и при необходимости отключает подачу. Также предусмотрено обнаружение отказов датчиков и приводов.

Интерфейс для оператора должен быть простым и понятным. Он позволяет видеть текущие параметры, журналы аварий и событий, а также задавать нужный уровень. Все операции проходят через SCADA-систему или операторскую панель.

Система построена по трехуровневой структуре. На нижнем уровне находятся датчики и исполнительные механизмы, которые измеряют уровень, давление и расход и передают данные контроллеру. Клапан с пневмоприводом управляется сигналом, который соответствует нужному уровню открытия.

На среднем уровне используется контроллер Siemens S7-1500. Он принимает сигналы от датчиков, обрабатывает их по заданным алгоритмам и формирует управляющие команды. Контроллер также фиксирует аварийные состояния и передает их выше.

Верхний уровень предназначен для наблюдения и управления. Оператор может видеть процесс, запускать и останавливать систему, настраивать уровни и просматривать архивные данные. Связь осуществляется через программное обеспечение на компьютере или панели.

Такой подход обеспечивает работу насосной станции в автоматическом режиме с возможностью ручного вмешательства и полной ясностью процессов. На рисунке 1 представлена схема уровней автоматизированной системы управления насосной станцией.

2 Разработка функциональной схемы автоматизации системы управления насосной станцией

2.1 Функциональная схема автоматизации

Функциональная схема автоматизации — это документация или графика, которая показывает, как работает система автоматического управления. Она иллюстрирует, как разные части системы связаны друг с другом: датчики, контроллеры, исполнительные механизмы и пользовательские интерфейсы.

Эта схема важна для разработки автоматизационных систем, так как помогает инженерам понять, какие компоненты нужны, как их настроить и соединить. Она визуализирует технологический процесс, отображая средства автоматизации, датчики для сбора данных, устройства, которые влияют на процесс, панель управления и связи между всеми элементами системы.

Функциональная схема автоматизации — это документация или графика, которая показывает, как работает система автоматического управления. Она иллюстрирует, как разные части системы связаны друг с другом: датчики, контроллеры, исполнительные механизмы и пользовательские интерфейсы. Эта схема важна для разработки автоматизационных систем, так как помогает инженерам понять, какие компоненты нужны, как их настроить и соединить. Кроме того, она служит основой для понимания логики взаимодействия между элементами системы и последующей реализации алгоритмов управления.

Добыча идет с ШГН. Далее по трубопроводу, поступает на датчик давления РТ, он же в свою очередь измеряет давления и дает значения, по которому можно судить, идет приток нефти или нет. Позиционер Р дает сигнал на привод D который в свою очередь регулирует положением клапана CV. Клапан тем самым открывается на определенный процент, и регулирует подачу нефти в резервуар. Резервуар В накапливает нефть на определенном уровне. Уровень должен контролироваться и поэтому измеряется уровнемером LT который установлен непосредственно внутри резервуара. Привод, позиционер и регулирующий клапан присоединяются к друг-другу и работают совместно.

Полученные значения с датчиков передаются в контроллер, где происходит обработка сигналов и принятие управляющих решений в соответствии с заданным алгоритмом. Контроллер сравнивает текущие параметры с уставками и при необходимости формирует управляющее воздействие на исполнительные устройства. Таким образом, система работает в автоматическом режиме, поддерживая стабильную подачу нефти и необходимый уровень в резервуаре. При отклонениях от нормы система реагирует автоматически, предотвращая аварийные ситуации или сбои в процессе. Вся информация отображается на панели оператора, что позволяет вести контроль и при необходимости вмешиваться вручную.

Функциональная схема автоматизации уровнем расхода в насосной станции представлена в приложении А.

2.2 Выбор оборудования

2.2.1 Выбор датчика давления

Контроль давления в трубопроводе перед регулирующим клапаном играет ключевую роль в обеспечении безопасной и стабильной работы системы автоматического регулирования уровня нефти. Хотя давление не является регулируемым параметром, его измерение необходимо для своевременного выявления перегрузок, утечек или засоров, а также для реализации систем аварийной защиты оборудования. Точный и стабильный сигнал давления позволяет оперативно обнаруживать отклонения и предотвращать повреждение клапана, трубопровода или резервуара.

Для решения задачи мониторинга давления был выбран датчик Siemens SITRANS P DS, представленный на рисунке 2.1, который отличается высокой надежностью, точностью измерений и совместимостью с ПЛК Siemens S7-1500. Основными критериями выбора датчика стали диапазон рабочих давлений, наличие взрывозащиты, точность, тип выходного сигнала, условия окружающей среды, а также устойчивость к нефти и агрессивным веществам.

Параметры датчиков давления представлены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Сравнение датчиков давления

Датчики давления	Siemens SITRANS P DS	ОВЕН ПД100-ДИ
Диапазон измерения давления, бар	0...16	0...10
Точность измерения, %	±0.075	±0.25
Материал мембраны и корпуса	Нержавеющая сталь	Алюминий
Диапазон температуры среды, °С	От -40 до +100	От -20 до +80
Выходной сигнал	4-20 мА, HART, Profibus PA	4-20 мА

Таким образом, датчик SITRANS P DS обеспечивает более широкий диапазон измерений, выше точность, имеет встроенные цифровые интерфейсы и промышленную взрывозащиту. Он оптимально подходит для нефтяных систем, полностью совместим с используемым ПЛК Siemens и соответствует требованиям к надёжной эксплуатации в тяжёлых условиях. Кроме того, его корпус из нержавеющей стали и высокая степень защиты IP67 позволяют использовать прибор в агрессивной среде и при перепадах температур без риска повреждения или потери точности.



Рисунок 2.1 – Датчик давления SITRANS P DS

2.2.2 Выбор привода

Чтобы точно контролировать подачу нефти через клапан, нужен надежный и чувствительный привод, который сможет работать с управляющим сигналом очень точно. В нефтяной отрасли важны такие вещи, как скорость реакции, устойчивость к жестким условиям, совместимость с позиционерами и возможность тонкой настройки.

Привод это устройство, которое передает энергию от источника к рабочему механизму. Он преобразует один вид энергии в механическое движение. Приводы используются для автоматизации процессов, например открытия и закрытия клапанов или перемещения деталей. Существуют электрические, пневматические, гидравлические и комбинированные приводы. От выбора привода зависит точность, скорость и сила действия системы.

На основе этих требований был выбран пневматический привод SAMSON Type 3277. Этот привод часто используется в системах автоматического регулирования давления, потока и уровня в нефтяной и газовой переработке. Он надежно работает даже в сложных условиях, легко обслуживается и полностью совместим с клапаном SAMSON Type 3241 и позиционером TROVIS 3730-3.

Таким образом, SAMSON Type 3277 обладает всеми необходимыми характеристиками для точного, безопасного и промышленно пригодного регулирования расхода нефти. Он обеспечивает высокую надёжность при работе в тяжёлых условиях, имеет совместимость с интеллектуальными позиционерами и подходит для эксплуатации во взрывоопасных зонах, что делает его оптимальным выбором для данного проекта. Кроме этого, конструкция привода допускает быструю установку и техническое обслуживание, что снижает простой оборудования и упрощает эксплуатацию в условиях промышленного объекта. Параметры представлены в таблице 2.2, на рисунке 2.2 идет изображение самого привода. Привод работает совместно с клапаном регулирования и позиционером. Позиционер задает определённое значение, которое поступило ему с регулятора, далее сигнал переходит на привод который в свою очередь регулирует положением клапана.

Таблица 2.2 – Технические параметры SAMSON Type 3277

Параметр	Значение
Тип	Пневматический мембранный привод
Управляющий сигнал	4–20 мА через позиционер
Температурный диапазон, °С	От -40 до +90
Применимость в нефтяной промышленности	Устойчив к нефти и давлению



Рисунок 2.2 – Привод SAMSON Type 3277

2.2.4 Выбор клапана

Чтобы регулировать подачу нефти в резервуар, нужен надежный клапан, который будет точно работать и хорошо вписываться в общую систему. Мы выбрали клапан SAMSON Type 3241, на рисунке 3.3 представлен регулирующий клапан. Он односедельный и с фланцевым подключением, предназначенный для работы с жидкостями при разных температурах и давлениях.

Этот клапан можно устанавливать на трубопроводы диаметром от DN 15 до DN 300, и он рассчитан на давление до PN 40. Он хорошо справляется с вязкими и агрессивными веществами, в том числе с нефтью, и работает в диапазоне температур от –196 до +450 °С. Конструкция гарантирует точность, надежность и долгий срок службы.

Клапан SAMSON 3241 совместим с приводом Type 3277 и позиционером TROVIS 3730–3, что позволяет управлять им по аналоговому сигналу 4–20 мА и полностью интегрировать в системы управления. Параметры в таблице 2.3

Таблица 2.3 – Технические параметры SAMSON Type 3241

Параметр	Значение
Условное давление, бар	От 10 до 40
Материал корпуса	Нержавеющая сталь
Тип управления	Пневматический через привод
Способ установки	На горизонтальных и вертикальных трубопроводах



Рисунок 2.3 – Регулирующий клапан SAMSON Type 3241

2.2.5 Выбор позиционера

Чтобы точно управлять регулирующим клапаном с пневмоприводом, нужен позиционер, который надежно передаст сигнал от контроллера и обеспечит высокую точность. Основные моменты для выбора были: поддержка аналогового сигнала 4–20 мА, обратная связь, совместимость с пневмоприводом и устойчивость к условиям на производстве.

Позиционер это устройство, которое управляет положением исполнительного механизма, например клапана. Он получает управляющий сигнал и точно настраивает привод на нужное положение. Позиционеры повышают точность и стабильность работы системы автоматического регулирования. Чаще всего используются в пневматических и электрических приводах. Благодаря позиционеру клапан быстрее и точнее реагирует на изменения сигнала управления.

Был выбран SAMSON TROVIS 3730–3, на рисунке 2.4 представлен данный позиционер. Это интеллектуальный электропневматический позиционер, который можно установить на привод SAMSON Type 3277. Он точно работает с управляющим сигналом, делает авто калибровку и дает обратную связь о положении клапана. Устройство поддерживает цифровые протоколы HART и Profibus PA, что позволяет его подключить к современным системам автоматизации и получать информацию о состоянии в реальном времени.

Позиционер работает с сигналом 4–20 мА и полностью совместим с ПЛК Siemens S7-1500, что обеспечивает его надежную работу даже при изменениях давления воздуха или других внешних воздействиях. Благодаря высокой точности, защитным функциям и встроенной диагностике, TROVIS 3730–3 стало отличным выбором для автоматического регулирования уровня нефти в резервуаре. Параметры в таблице 2.4

Таблица 2.4 – Параметры позиционера TROVIS 3730–3

Параметр	Значение
Входной сигнал	4–20 мА
Совместимость по установке	Привод SAMSON Type 3277
Обратная связь	По положению клапана



Рисунок 2.4 – Позиционер TROVIS 3730–3

2.2.6 Выбор уровнемера

Чтобы измерять уровень нефти в резервуаре, нужен прибор, который точно показывает данные, стабильно работает и не подвержен влиянию плотности, паров и температуры. В отличие от простых датчиков, система автоматического регулирования требует постоянного и точного контроля уровня в процентах.

Мы выбрали радарный уровнемер Siemens SITRANS LG270, который отвечает всем требованиям по точности и надежности. Он работает на основе микроволнового зондирования, что позволяет точно измерять уровень нефти, даже если есть пары и пена. Прибор устанавливается сверху резервуара и не имеет движущихся частей, что снижает износ и необходимость в обслуживании. На рисунке 2.5 изображен этот уровнемер.

Уровеньмер имеет аналоговый выход 4–20 мА и поддерживает цифровые протоколы HART и Profibus PA, что делает его совместимым с ПЛК Siemens S7-1500 и позволяет интегрировать его в SCADA-систему. Точность измерения составляет ± 3 мм, что помогает поддерживать уровень жидкости в автоматическом режиме.

SITRANS LG270 устойчив к агрессивным средам и работает при высоких давлениях и температурах. Он хорошо защищен (IP68) и может использоваться в опасных зонах, что делает его безопасным для эксплуатации на промышленных объектах. Вот почему мы выбрали этот уровнемер для контроля уровня нефти на насосной станции. Технические параметры в таблице 2.5

Таблица 2.5 – Технические параметры уровнемера SITRANS LG270

Параметр	Значение
Диапазон измерения, м	До 20
Точность, мм	До ± 3
Выходной сигнал	4–20 мА
Материал зонда и корпуса	Нержавеющая сталь
Монтаж	Сверху
Рабочая температура, °С	От -196 до +200
Давление, бар	До 100



Рисунок 2.5 - Уровнемера Siemens SITRANS LG270

2.2.7 Выбор контролера

Автоматизированная система контроля уровня нефти в резервуаре должна быть точной, надежной и хорошо объединять все компоненты — от датчиков до интерфейса для оператора. В сердце этой системы находится программируемый логический контроллер, который принимает и обрабатывает сигналы от датчиков, выполняет алгоритмы регулирования и обменивается данными с верхним уровнем. Технические характеристики в таблице 2.6

Для этого проекта были выбраны контроллер Siemens. Это современный ПЛК, который отлично подходит для сложных промышленных задач. Он имеет много возможностей для подключения как аналоговых, так и цифровых устройств, поддерживает разные сетевые протоколы и предлагает функции диагностики и регулирования. На рисунке 2.5 изображен ПЛК.

Таблица 2.6 – Технические характеристики контроллера

Параметр	S7-1500
Рабочая температура, °C	От 0 до +60
Протокол передачи данных	PROFINET IO IRT, PROFIBUS DP, ModBus RTU
Интерфейсы	Ethernet, RS232, RS422, RS485, USB
Дискретный ввод/вывод	32/16
Аналоговый ввод/вывод	8/4
Время выполнения операции	0.3 мкс



Рисунок 2.6 – Контроллер Siemens

3 Расчетная часть

3.1 Постановка задачи для синтеза контура управления

В соответствии с техническим заданием дипломной работы необходимо синтезировать контуры управления:

-контур регулирования уровня в резервуаре насосной станции как показано на рисунке 3.1;

Функциональная схема представляет собой обобщённое графическое изображение структуры и принципа работы системы. Она показывает основные функциональные блоки, их назначение и взаимодействие между собой.

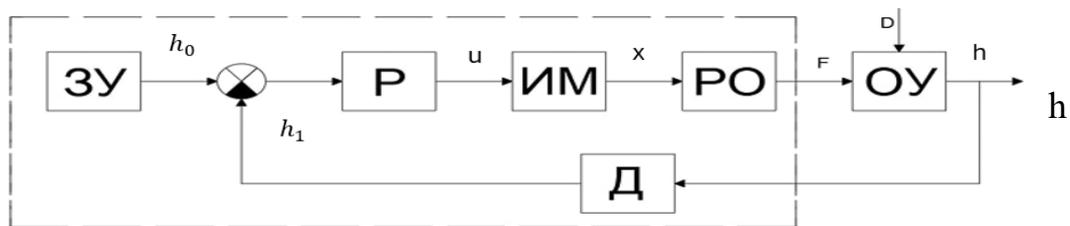


Рисунок 3.1 – Функциональная схема контура регулирования уровня в резервуаре

где F – расход нефти, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 h_0 – заданное значение уровня, м ;
 D – внешнее возмущение;
 h_1 – обратная связь, м ;
 h – уровень в резервуаре, м .

На основе поставленных контуров были сформулированы следующие постановки задач:

Постановка задачи №1. На основе математической модели замкнутой системы необходимо синтезировать типовой регулятор для автоматического поддержания уровня нефти в резервуаре.

3.2 Разработка структурной схемы

Привод клапана (исполнительный механизм). Привод реагирует на управляющее воздействие с небольшой инерцией порядка 0.2 секунды, поэтому описывается по формуле (1) апериодическим звеном 1-го порядка:

$$G_{\text{привод}}(s) = \frac{1}{0.2s + 1} \quad (3.1)$$

Клапан реагирует на изменение сигнала с некоторой инерцией в районе 1 секунды и коэффициент пропорциональности равен 10. Тогда по формуле (3.2) описывается его модель:

$$G_{\text{клапан}}(s) = \frac{10}{s + 1} \quad (3.2)$$

Измерение уровня в резервуаре медленный процесс. При типичном объеме и сечении постоянная времени может достигать 300 секунд. При наличии утечки дренажа резервуар ведет себя как апериодическое звено 1-го порядка и принимает вид по формуле (3.3) с коэффициентом преобразования расхода в уровень:

$$G_{\text{резервуар}}(s) = \frac{0.5}{300s + 1}. \quad (3.3)$$

На основе формул (3.1), (3.2) и (3.3) напишем формулу для расчета общей передаточной функции:

$$G_{\text{привод}}(s) * G_{\text{клапан}}(s) * G_{\text{резервуар}}(s) = \frac{1}{0.2s + 1} * \frac{10}{s + 1} * \frac{0.5}{300s + 1}. \quad (3.4)$$

Из формулы (3.4) получаем формулу (3.5) общей передаточной функции:

$$G(s) = \frac{5}{(0.2s + 1)(s + 1)(300s + 1)}. \quad (3.5)$$

3.3 Анализ динамических свойств системы

Для преобразования передаточной функции замкнутой системы используем формулу (3.6) обратной связи:

$$T(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)}. \quad (3.6)$$

На основе формул (3.5) и (3.6) вычислим (3.7) передаточную функцию замкнутой системы:

$$T(s) = \frac{\frac{5}{(0.2s + 1)(s + 1)(300s + 1)}}{1 + \frac{5}{(0.2s + 1)(s + 1)(300s + 1)}} = \frac{5}{60s^3 + 360s^2 + 301.2s + 6} \quad (3.7)$$

Однако, перед тем как начнем моделировать систему в MATLAB, проверим систему на устойчивость построением переходных характеристик.

Устойчивость системы по графику переходного процесса означает способность системы со временем возвращаться в устойчивое состояние после внешнего возмущения или изменения входного сигнала. Если на графике видно, что выходная величина после отклонения стремится к постоянному значению без бесконечных колебаний или роста, то система считается устойчивой. Характерный признак устойчивости — затухающие колебания или плавный выход на установившееся значение. Если же амплитуда колебаний растёт или система не достигает устойчивого состояния, это указывает на неустойчивость. Таким образом, по форме переходной характеристики можно оценить поведение системы во времени и её способность сохранять контроль над процессом. На рисунке 3.1 и 3.2 показан анализ переходной характеристики.

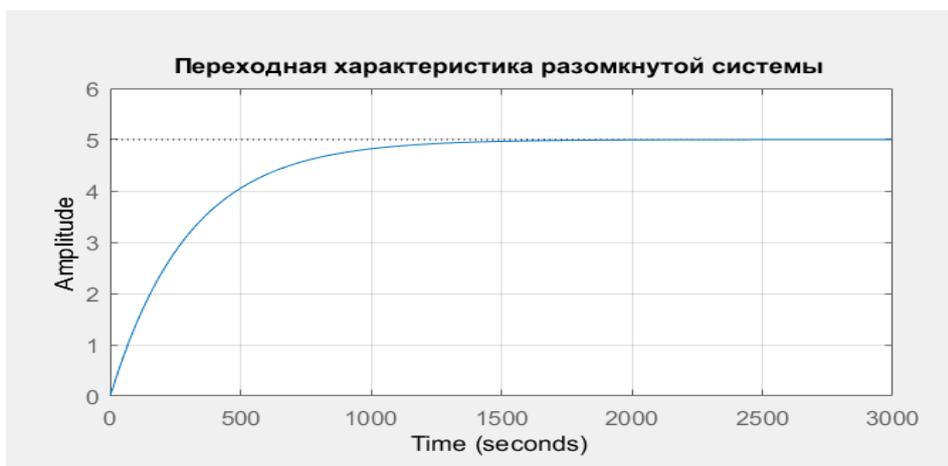


Рисунок 3.1 – Переходная характеристика разомкнутой системы

Аналогично выведем переходную характеристику замкнутой системы в MATLAB.

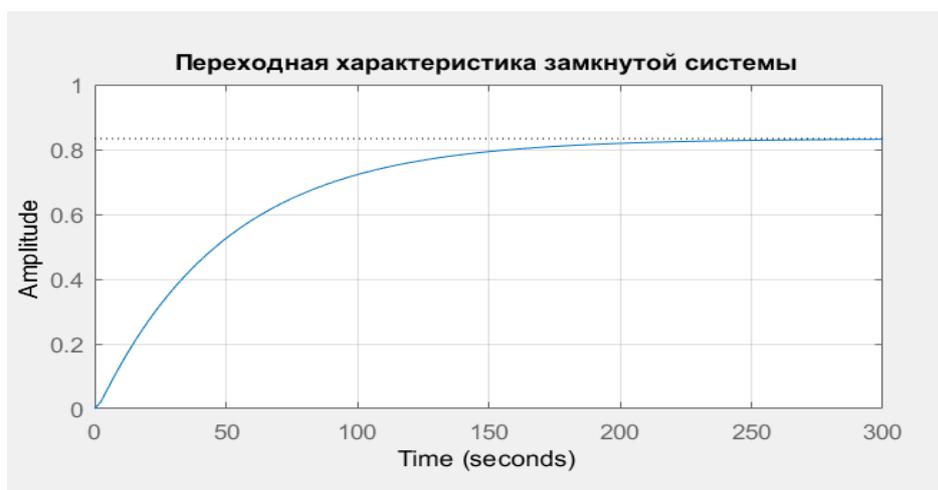


Рисунок 3.2 – Переходная характеристика замкнутой системы

Вывод: по переходным характеристика разомкнутой и замкнутой системы из рисунка 8 и из рисунка 9 мы можем видеть, что системы устойчивы.

Далее построим таблицу 3.1 показывающую прямые оценки качества. Прямые оценки качества нужны для количественного анализа работы системы управления на основе её переходной характеристики. Они позволяют оценить быстродействие, точность и степень колебательности системы. С их помощью можно сравнивать разные варианты настройки регуляторов и выбирать оптимальный режим работы.

Таблица 3.1 – Прямые оценки качества САР

№	Оценки Качества	
1	Время регулирования (T_{set})	192.9 сек
2	Перерегулирование (Pov)	0%
3	Число колебаний (M)	0
4	Колебательность (μ)	0%
5	Частота колебаний ($wosc$)	0
6	Установившаяся ошибка (ess)	0.1692
7	Время достижения первого максимума (T_p)	0 сек
8	Время нарастания (T_R)	107.6 сек
9	Декремент затухания (λ)	0

Вывод: по результатам анализа система является монотонной, это делает систему соответствующей по всем параметрам, связанным с колебаниями, так как их нет. Но, система имеет медленное время нарастания и время регулирования. Система работает медленно, и время, необходимое для настройки, также долгое. Оценки показывают, что она не очень отзывчива на изменения во входных данных, что говорит о том, что нам нужно добавить стандартный регулятор. Главная причина, почему это нужно сделать, имеется ошибка, которую система выдает в стабильном режиме.

3.4 Синтез типового регулятора

Для данной математической модели объекта управления, которая представлена в виде передаточной функции, нужно найти параметры PID-регулятора. Формула идеального PID-регулятора (3.8) показана ниже.

$$U(t) = K_p \left(e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right). \quad (3.8)$$

Для создания обычного регулятора системы автоматического управления мы будем использовать три метода настройки PID-регулятора: метод Циглера-

Никольса, метод Чина-Хронеса-Ресвика и метод Скогестада. После того как мы пройдем через все методы и увидим переходные процессы, мы выберем лучший регулятор, основываясь на полученных оценках качества.

Перед тем как применять эмпирические методы, нужно определить некоторые параметры: время запаздывания, постоянную времени и коэффициент передачи. Эти параметры мы получим, анализируя переходный процесс открытой системы и проводя касательную к точке перегиба.

Коэффициент передачи (k) показывает, как изменяется выходной сигнал при изменении входного. Мы определим его по значению переходной характеристики за время установления. Время запаздывания (L) — это период между моментом подачи входного сигнала и моментом, когда система на него реагирует. Постоянная времени (T) показывает разницу между временем запаздывания и временем, когда касательная достигает коэффициента передачи. Исходя из рисунка 10, у этих параметров следующие значения: $k=5$; $L=0.63$; $T=320$ сек.

На рисунке 3.3 показано как идет определение параметров нужных для построения контроллеров различными методами.

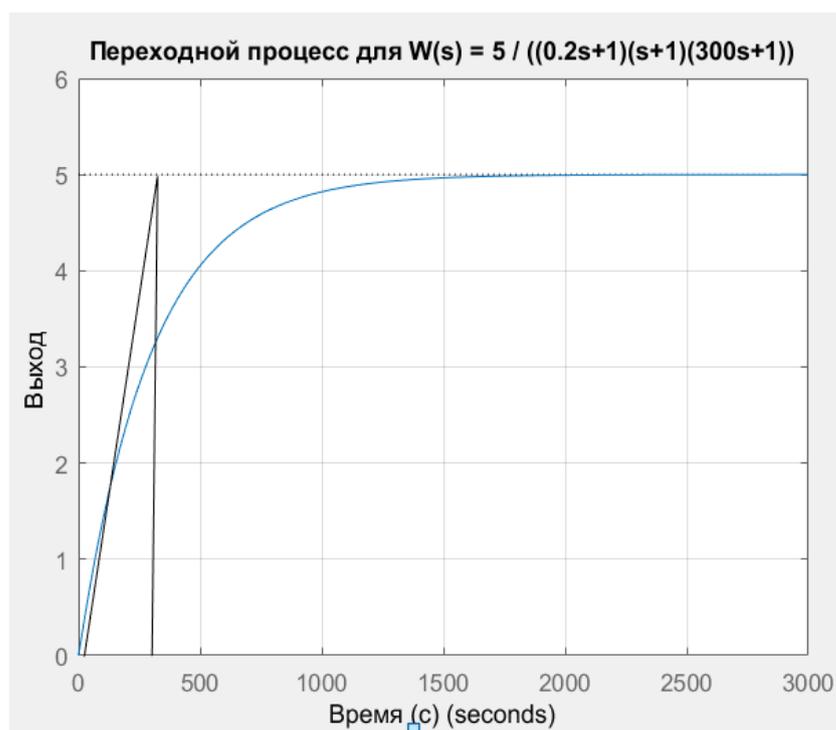


Рисунок 3.3 – Определение параметров по переходному процессу

После получения необходимых параметров можно приступить к эмпирическим методам настройки PID-регулятора.

3.4.1 Метод Циглера-Никольса (ZN1)

Этот метод настройки PID-регулятора предлагает два способа: открытый и закрытый контур.

В открытом контуре мы делаем следующее:

Шаг 1. Сначала смотрим, как система реагирует на резкое изменение входного сигнала. Это помогает понять, как она ведет себя при переходных процессах.

Шаг 2. Затем мы строим касательную и определяем важные параметры, как время задержки, постоянная времени и коэффициент передачи.

Шаг 3. После этого рассчитываем параметры регулятора по простым формулам.

Теперь, что касается открытого контура, мы действуем в два шага:

Шаг 1. Устанавливаем P-регулятор и увеличиваем его коэффициент до тех пор, пока система не начнет колебаться с равномерной амплитудой и частотой, чтобы найти критическое усиление и период колебаний.

Шаг 2. На основе полученных данных определяем параметры регулятора.

Поскольку мы уже получили коэффициенты для первого метода, будем использовать открытый контур. Схема системы с PID-регулятором представлена на рисунке 3.4

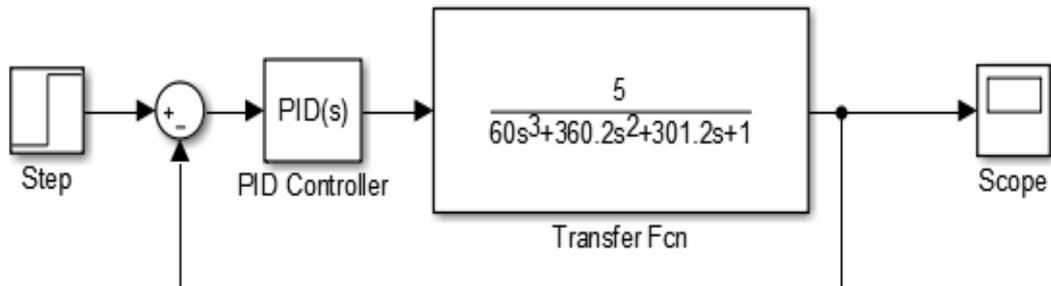


Рисунок 3.4 – Схема моделирования системы с PID регулятором

Метод Циглера-Николса первого типа (ZN1) прост в применении и не требует математической модели объекта. Он позволяет быстро получить приближённые настройки ПИД-регулятора на основе реакции системы на скачок. В отличие от многих других методов, ZN1 удобен для начальной настройки и даёт работоспособный результат даже при ограниченной информации об объекте.

Вычислим параметры PID - регулятора на основе эмпирических формул и занесем их в таблицу 3.2 где представлены значения для каждого вида регулятора методом ZN1. По специальным эмпирическим формулам рассчитываются параметры PID-регулятора. Метод ZN1 прост в реализации и позволяет быстро получить рабочие настройки, особенно на начальном этапе. Несмотря на приближённость, он даёт хорошие результаты для систем с инерцией и без сильной нелинейности. Его основное преимущество — быстрота и наглядность, что делает его удобным для первичной настройки регулятора. Также он широко используется в промышленности благодаря простоте реализации и возможности настройки без необходимости точной математической модели объекта.

Таблица 3.2 - Вычисление параметров регулятора методом ZN1.

Тип регулятора	k_p	$T_I=1/I$	k_d
P	$\frac{T}{kL} = 101.6$	-	-
PI	$0.9 * \frac{T}{KL} = 91.42$	$T_I = \frac{L}{0.3} = 2.1$ $K_I = \frac{1}{T_I} = 0.47$	-
PID	$1.2 * \frac{T}{KL} = 121.9$	$T_I = 2L = 1.26$ $K_I = \frac{1}{T_I} = 0.79$	$0.5L=0.315$

Мы подставляем найденные коэффициенты в PID-регуляторы, чтобы получить переходные процессы. Переходные характеристики можно увидеть на рисунке 3.5. Судя по этому рисунку, мы выберем PID-регулятор для дальнейшего анализа, так как у него меньшее время нарастания и наименьшая установившаяся ошибка по сравнению с другими. Коэффициенты управления PID-регулятора по методу Циглера-Никольса выглядят так:

$$U(t) = 121.9 \left(e(t) + 0.79 \int_0^t e(t)dt + 0.315 \frac{de(t)}{dt} \right). \quad (3.9)$$

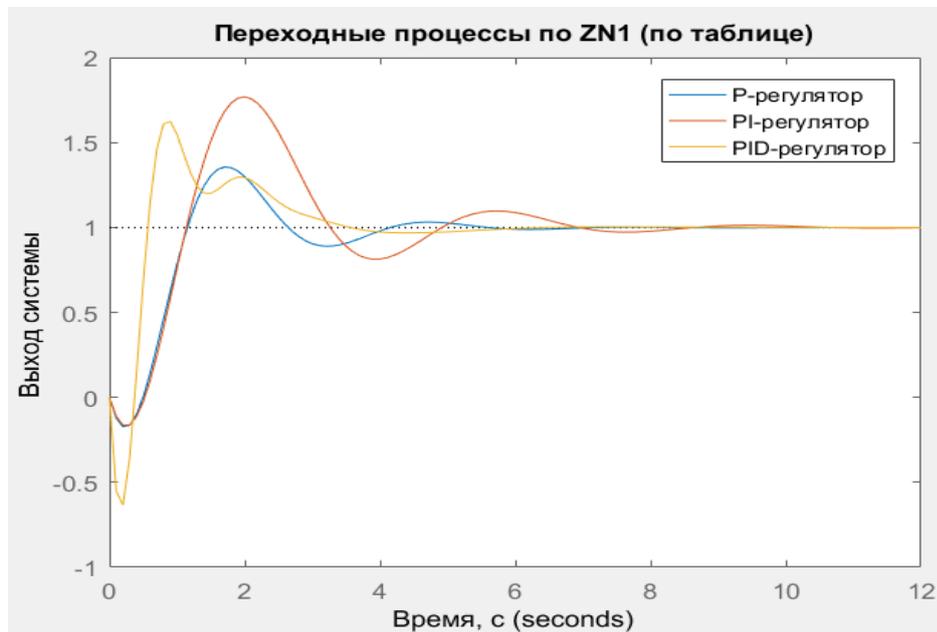


Рисунок 3.5 - Переходные процессы на основе метода Циглера-Николса

При анализе переходных процессов заметно, что P регулятор приходят к установившемуся значению. Из метода Циглера-Николса за основу будет взят P

регулятор. Далее на рисунке 3.6 P регулятор будет выведен отдельно, для последующих его анализов, которые помогут найти запасы по фазе и амплитуде, а также полюса системы



Рисунок 3.6 – переходной процесс P – регулятора ZN1

Был сделан вывод, что данный метод Циглера-Николса подходит для настройки нашей системы. Система устойчива, время регулирования снизилось, имеется перерегулирование, но оно находится в зоне допустимости. Но стоит применить также и другие методы чтобы явно посмотреть какой регулятор в каком методе будет лучше.

3.4.2 Метод Чина-Хронеса-Ресвика (CHR)

Этот метод хорошо работает для систем с простым поведением или теми, где перерегулирование не больше 20%. Он дает больше запас прочности, чем предыдущий метод. Алгоритм похож на метод Циглера-Николса, так что настраивать регулятор становится проще. Коэффициенты регулятора рассчитываются по простым формулам для случаев без перерегулирования, опираясь на уже известные данные. Полученные коэффициенты можно найти в таблице 3.3.

Метод Чина Хронеса Ресвика (CHR) учитывает запаздывание и инерционность объекта, что делает его более точным. В отличие от метода Циглера-Николса, он позволяет выбрать режим настройки в зависимости от цели регулирования. CHR обеспечивает меньшее перерегулирование и более плавную работу системы. Он основан на моделировании реального поведения объекта, а

не на критической точке. В результате достигается устойчивое и качественное регулирование без необходимости частой корректировки. Метод широко применяется в промышленности благодаря своей универсальности и надёжности.

Таблица 3.3 – Коэффициенты регулятора методом CHR

Тип регулятора	K_p	K_I	K_d
P	$0.3 * \frac{T}{kL} = 30.27$	-	-
PI	$0.6 * \frac{T}{kL} = 60.95$	$T_I = 4L = 2.52$ $K_I = \frac{1}{T_I} = 0.39$	-
PID	$0.95 * \frac{T}{kL} = 96.50$	$T_I = 2.4L = 1.51$ $K_I = \frac{1}{T_I} = 0.66$	$0.42L=0.26$

Рассчитанные коэффициенты подставляем в регуляторы для получения переходных процессов. Переходные процессы представлены на рисунке 3.7

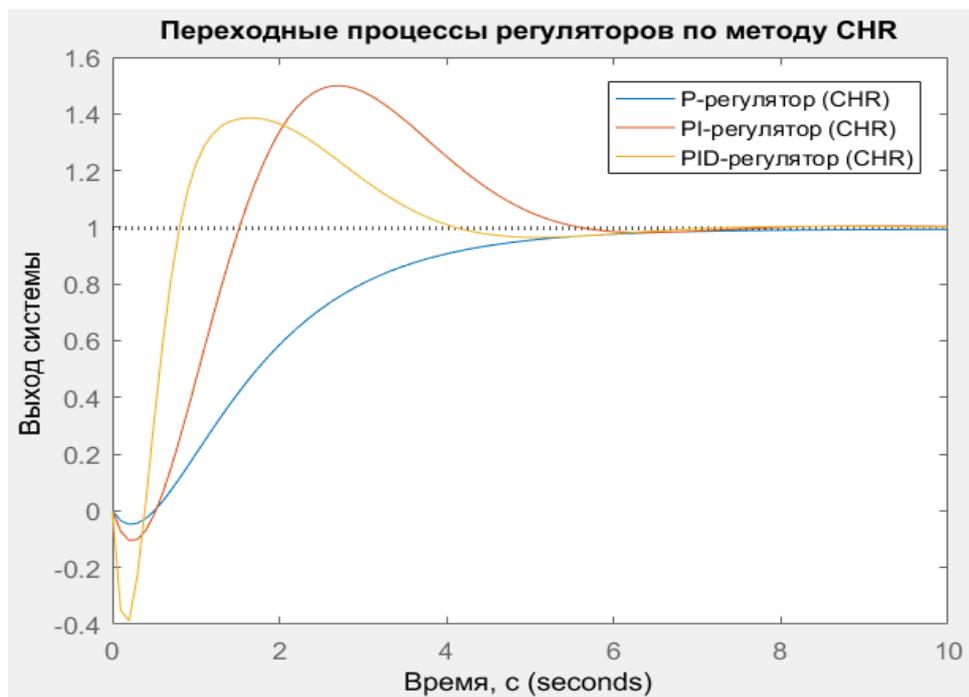


Рисунок 3.7 - переходные процессы системы с регуляторами методом CHR

Исходя из рисунка 3.7, для дальнейшего анализа уже будет использоваться P регулятор по нашему методу, так как остальные регуляторы имеют перерегулирование, что нету у P регулятора. Он сразу приходит к уставке и довольно за быстрый срок времени.

$$U(t) = 96.5 \left(e(t) + 0.66 \int_0^t e(t) dt + 0.26 \frac{de(t)}{dt} \right). \quad (3.10)$$

Сделаем анализ используя переходный процесс системы с Р-регулятором настроенного методом Чина-Хронеса-Ресвика. Анализ представлен на рисунке 3.8 и 3.9.

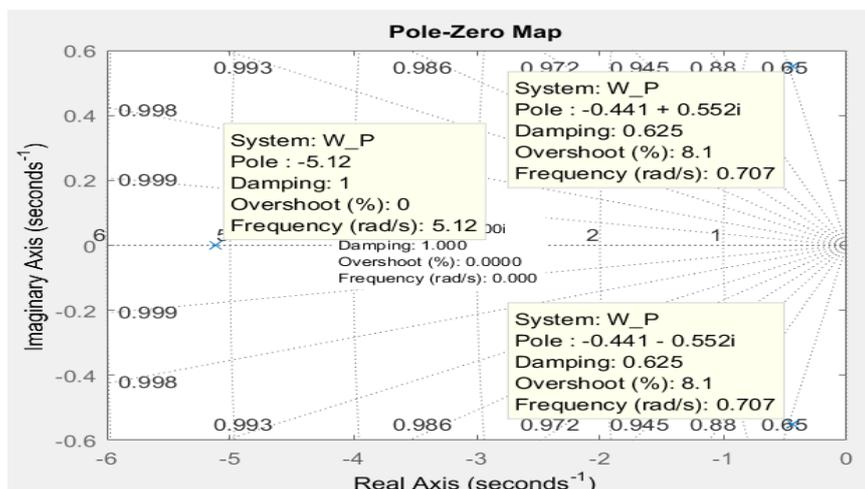


Рисунок 3.8 - Полюса системы методом CHR

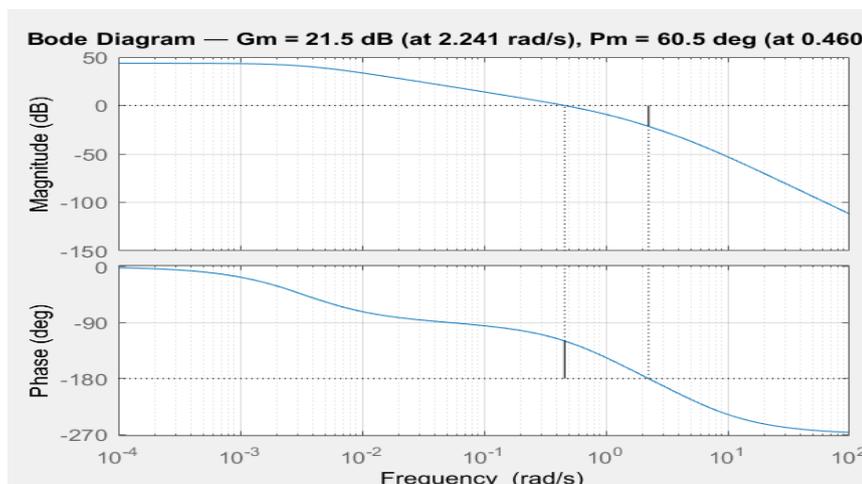


Рисунок 3.9 - Запасы устойчивости системы методом CHR

По рисунку 3.8 и 3.9 видно, что степень устойчивости системы, настроенной методом Метод Чина-Хронеса-Ресвика равна 0.441. А запас устойчивости системы по фазе равна 60.5 градусам, и 21.5 по амплитуде.

Запас устойчивости по фазе равен 60.5 градусам, и его измеряли на частоте 0.460 рад/с. Это значит, что фаза системы может опуститься ещё на 60.5 градуса, прежде чем она достигнет критического сдвига в 180°. Значение в 60.5 градуса говорит о том, что система довольно устойчива.

На основе анализа с предыдущим методом можно сделать вывод, что данный метод настройки дает похожие результаты. Однако в данном методе время прихода к установившемуся значению чуть дольше.

3.4.3 Метод Скогестада (SIMC)

Метод Скогестада для настройки PID-регуляторов помогает быстро настроить параметры, основываясь на характеристиках процесса, таких как постоянная времени, время запаздывания, коэффициент усиления и время задержки. Есть два подхода к контролю системы: Tight control и Smooth control. Они по-разному реагируют на изменения и шумы. Агрессивный контроль быстро реагирует на изменения, но может быть более чувствителен к шуму. Консервативный контроль спокойнее реагирует на шумы, но медленнее откликается на изменения. Коэффициенты регулируются с помощью формул для агрессивной настройки, при этом учитывается, что время задержки равно времени запаздывания: $\theta = L$. Полученные коэффициенты регулятора занесены в таблицу 3.4

Таблица 3.4 - Коэффициенты регулятора методом SIMC

Тип регулятора	K_p	K_I	K_d
P	$\frac{1}{K} * \frac{T}{(L + \theta)} = 50.79$	-	-
PI	$\frac{1}{K} * \frac{T}{(L + \theta)} = 50.79$	$T_I = \min(T, 4(L + \theta)) = 5.04$ $K_I = \frac{1}{T_I} = 0.19$	-
PID	$\frac{1}{K} * \frac{T}{(L + \theta)} = 50.79$	$T_I = \min(T, 4(L + \theta)) = 5.04$ $K_I = \frac{1}{T_I} = 0.19$	$\frac{\theta}{3} = 0.21$

На основе полученных коэффициентов закон управления PID-регулятором методом Скогестада (SIMC) имеет вид:

$$U(t) = 50.79 \left(e(t) + 5.04 \int_0^t e(t) dt + 0.21 \frac{de(t)}{dt} \right). \quad (3.11)$$

Подставляем рассчитанные коэффициенты в регулятор для получения переходного процесса. Переходные процессы представлены на рисунке 3.10.

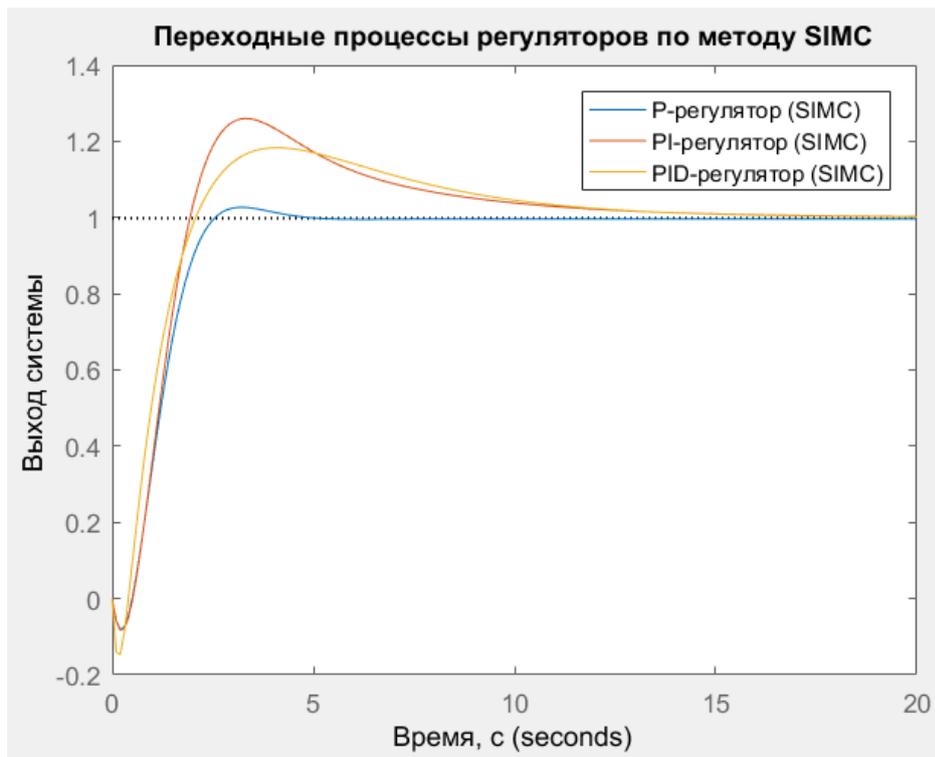


Рисунок 3.10 – Переходные характеристики по методу SIMC

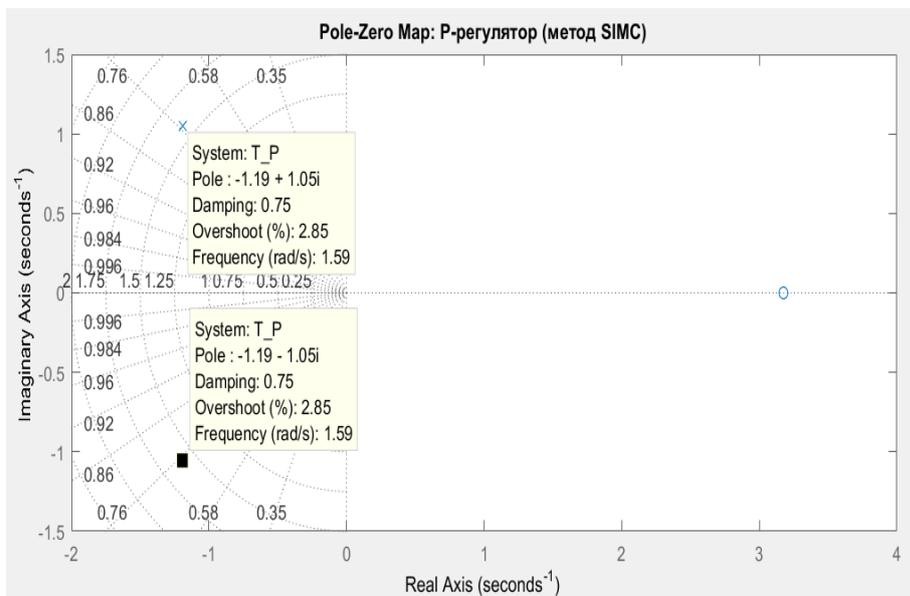


Рисунок 3.11 - Полюса системы методом SIMC

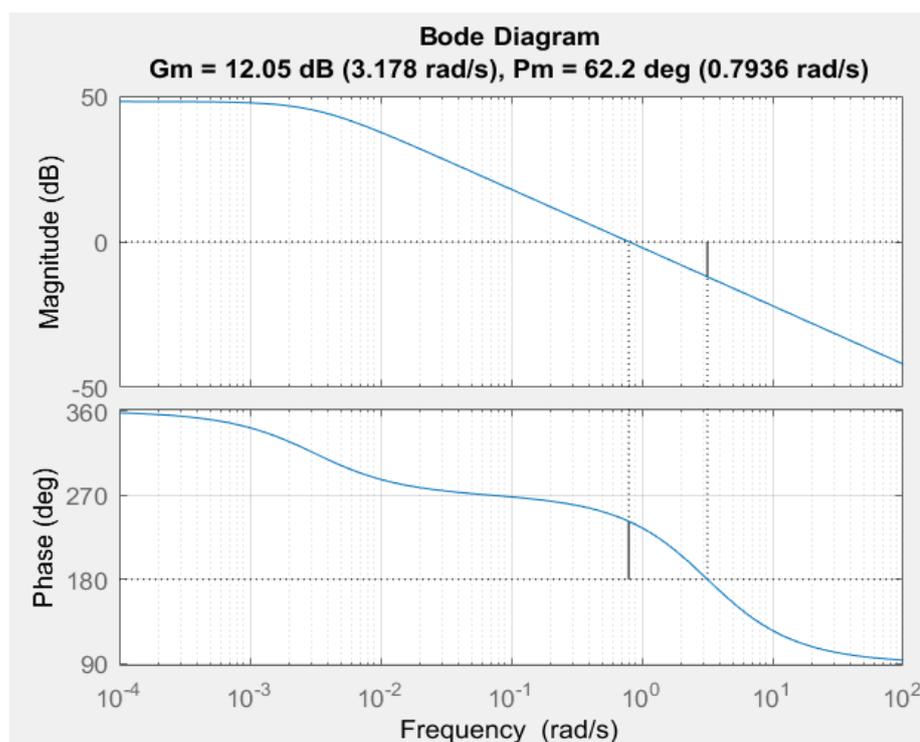


Рисунок 3.12 - Запасы устойчивости системы методом SIMC

На основе рисунка 3.11 и 3.12 сделаем выводы. По рисунку 20 степень устойчивости системы, настроенной методом SIMC равна 1.19. Запас устойчивости по фазе составляет 62.2 градуса. Это значение показывает, насколько фаза системы может дополнительно снизиться перед тем, как достигнет критического сдвига фазы в -180° .

3.5 Выбор эмпирического метода

Давайте проведем сравнительный анализ переходных процессов для всех методов и системы без регулятора, как показано на рисунке 22. Когда мы получим переходные характеристики, рассчитаем прямые и косвенные оценки всех методов и внесем их в общую таблицу. Также посмотрим на прямые оценки качества системы без регулятора и с PID регулятором в таблице 3.5. Для анализа будут использованы переходные характеристики, полученные в результате моделирования разомкнутой системы автоматического регулирования уровня нефти в резервуаре. По этим характеристикам рассчитаем прямые (время регулирования, перерегулирование, статическая ошибка) и косвенные (интегральные) оценки качества для каждого из методов. Полученные значения будут сведены в сводную таблицу, что позволит провести объективное сравнение эффективности настроек. На рисунке 3.13 переходные процессы при различных методах.

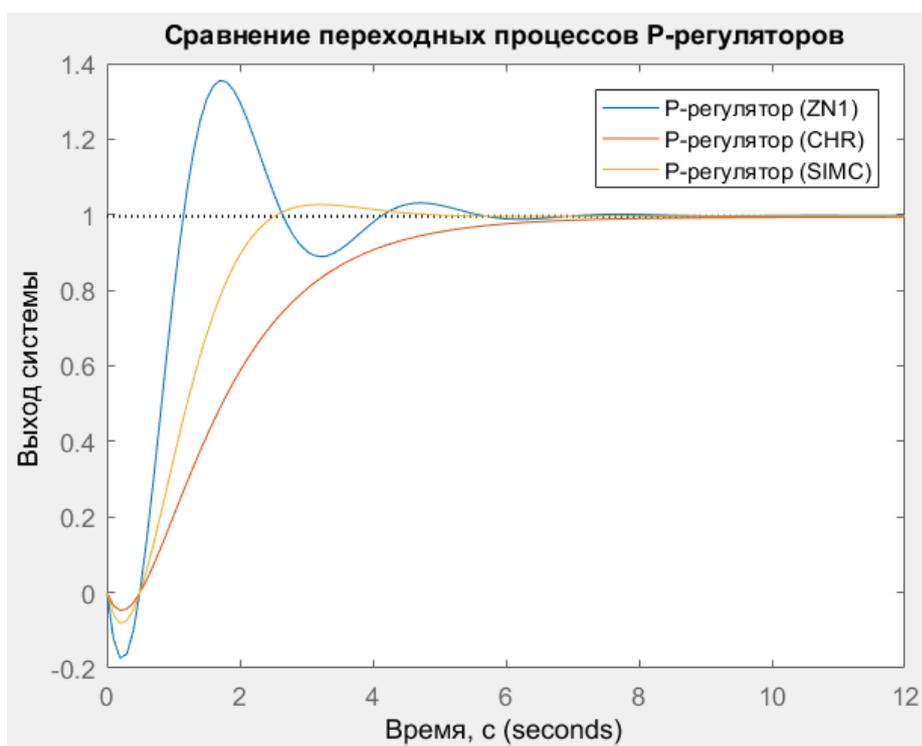


Рисунок 3.13 - Переходные процессы системы при различных методах

Таблица 3.5 – Прямые оценки качества системы при различных методах

№	Прямые оценки качества	Система без регулятора	Метод ZN1	Метод CHR	Метод SIMC
1	T_{set}	192.9 сек	7 сек	7 сек	3 сек
2	Pov	0%	35.3%	0%	1.2%
3	M	0	0	0	0
4	μ	0%	-	-	-
5	$wosc$	0	-	-	-
6	ess	0.1692	0	0	0
7	T_p	0 сек	2.1 сек	0	0
8	T_R	107.6 сек	1.1 сек	5 сек	2.3 сек
9	λ	-	-	-	-

На основании результатов моделирования были рассчитаны прямые оценки качества переходных процессов для различных методов настройки регуляторов. В таблице 4.5.1 приведены сравнительные данные для системы без регулятора, а также для систем с регулятором, настроенным по методам ZN1, CHR и SIMC.

Рассмотрим косвенные оценки качества системы без регулятора и с PID регулятором в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Косвенные оценки качества системы при различных методах

№	Косвенные оценки качества	Метод ZN1	Метод CHR	Метод SIMC
1	Запасы устойчивости по амплитуде	4.44 дБ	21.5 дБ	12.05 дБ
2	Запасы устойчивости по фазе	39 °	60.5 °	62.2 °
3	Степень устойчивости	0.734	0.441	1.19

Оценив прямые оценки качества, сделан вывод, что лучше P-регулятор, настроенный методом Скогестада. Метод Чина-Хронесса-Ресвика тоже неплохой, но он лучше лишь тем, что у него нет перерегулирования. В методе Скогестада же время регулирования лучше всех остальных методов, перерегулирование хоть и есть, но оно не такое большое, время нарастания помедленнее чем у ZN1, но у него перерегулирование большое. Так же по косвенным оценкам метод SIMC будет лучше.

Делаем вывод, графиков переходных процессов по рисунку 22, и по прямым и косвенным оценкам качества, будет лучшим решением выбрать метод SIMC, P-регулятор.

$$U(t) = 50.79 \left(e(t) + 5.04 \int_0^t e(t) dt + 0.21 \frac{de(t)}{dt} \right). \quad (3.12)$$

4 Создание программы управления

4.1 Разработка алгоритма

Алгоритм разрабатывался чтобы управлять уровнем в резервуаре насосной станции. Алгоритм показывает зависимость уровня в резервуаре от подачи нефти через клапан. Так же регулировка работы насоса в ШГН. В роли регулирующего органа идет клапан, который регулирует подачу нефти в резервуар. Блок-схема алгоритма на рисунке 4.1.

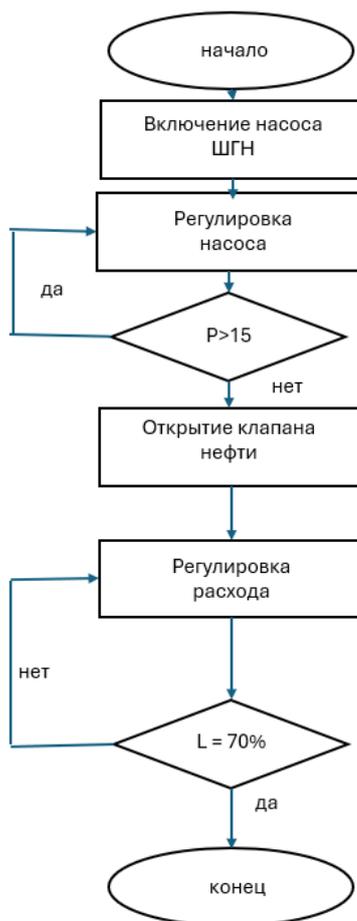


Рисунок 4.1 - Блок-схема алгоритма

4.2 Разработка программы управления уровнем в резервуаре в TIA-portal

Чтобы реализовать алгоритм контура управления уровнем в резервуаре TIA Portal нужно собрать конфигурацию контроллера. Как описывалось выше, используется контроллер CPU 1515-2 PN с подключенными модулями аналоговых и дискретных входов/выходов. Питание к контроллеру подается через блок питания PS на 25Вт.

Далее заполняется таблица символов, в которой указывается все переменные, параметры и другие данные которые необходимы для работы. Таблица символов на рисунке 4.2

	Name	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...
1	Старт	Bool	%IO.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Стоп	Bool	%IO.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Флаг вкл насоса	Bool	%Q0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	вкл насоса	Bool	%M0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	warning	Bool	%Q0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Presure Indicator	Int	%IW12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Presure	Real	%ID14	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Freg_temp	Real	%ID18	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	warning time	Real	%ID22	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	setpoint	Real	%MD0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Level Indicator	Int	%IW14	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Level	Real	%ID16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	Valve	Int	%IW16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	Flow	Real	%ID20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Рисунок 4.2 – Таблица символов

Словесное описание работы программы. Кнопка старт запускает систему. Включается насос если нет ошибок, за ошибку считается если нет давления на трубопроводе. Далее идет регулировка работы насоса, если выдает больше 15 бар, то частота на частотном преобразователе уменьшается, чтобы уменьшить объем доюбычи и понизить давление. После этого идет открытие клапана, и сама регулировка расхода через регулирующий клапан, который в свою очередь будет менять уровень нефти в резервуаре. За предупреждение берется нулевое давление больше чем 20 секунд. На рисунках 4.3 – 4.8 показана логика программы.

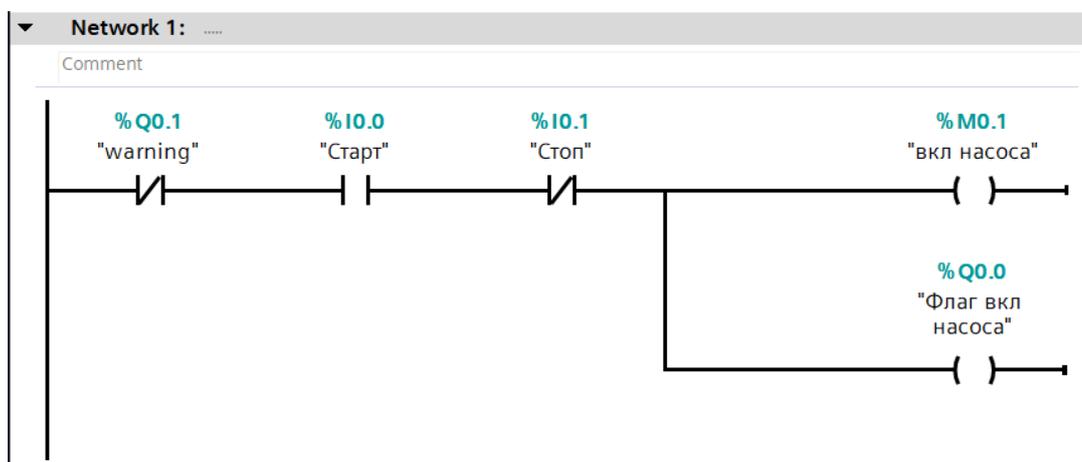


Рисунок 4.3 – Включение ШГН

На рисунке 4.3 показана логика программы включения штангового глубинного насоса. Если есть предупреждение или оператор нажал на кнопку стоп, то система отключается и не дает сигнала на работу насосом.

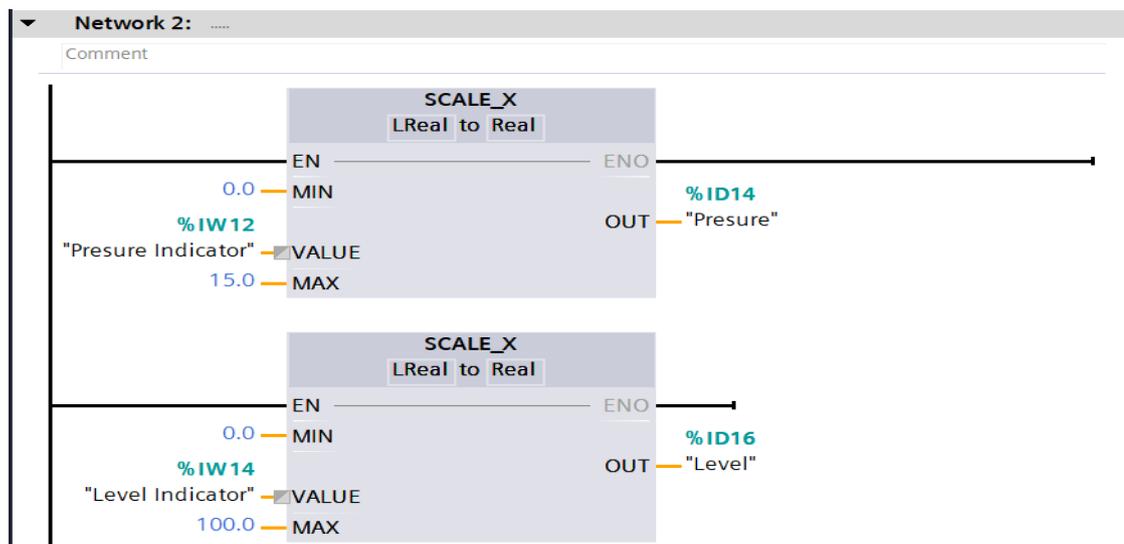


Рисунок 4.4 – Масштабирование уровня с уровнемера и датчика давления

Масштабирует уровень и давления таким образом чтобы было удобно для TIA Portal. Значения с 4-20мА передельывает на 0–15 и 0-100.

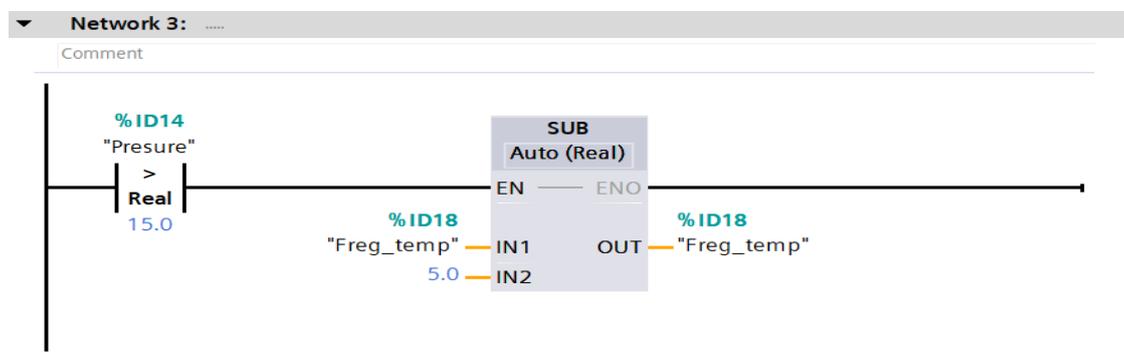


Рисунок 4.5 – Регулировка работы насоса

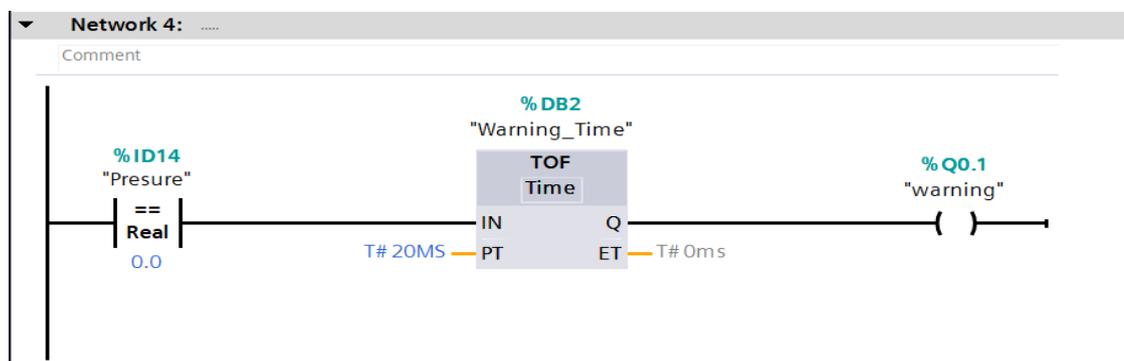


Рисунок 4.6 – Создание предупреждения

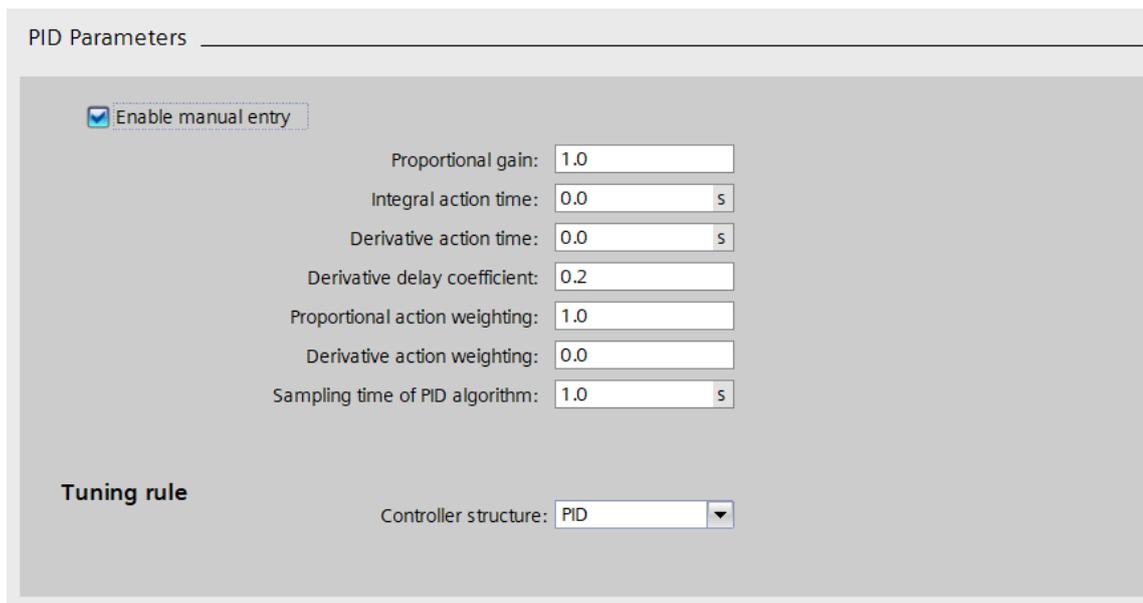


Рисунок 4.7 – Параметры блока PID-регулятора

Настройка параметров PID-регулятора с отключением интегральной и дифференциальной составляющих для работы в режиме P-регулирования.

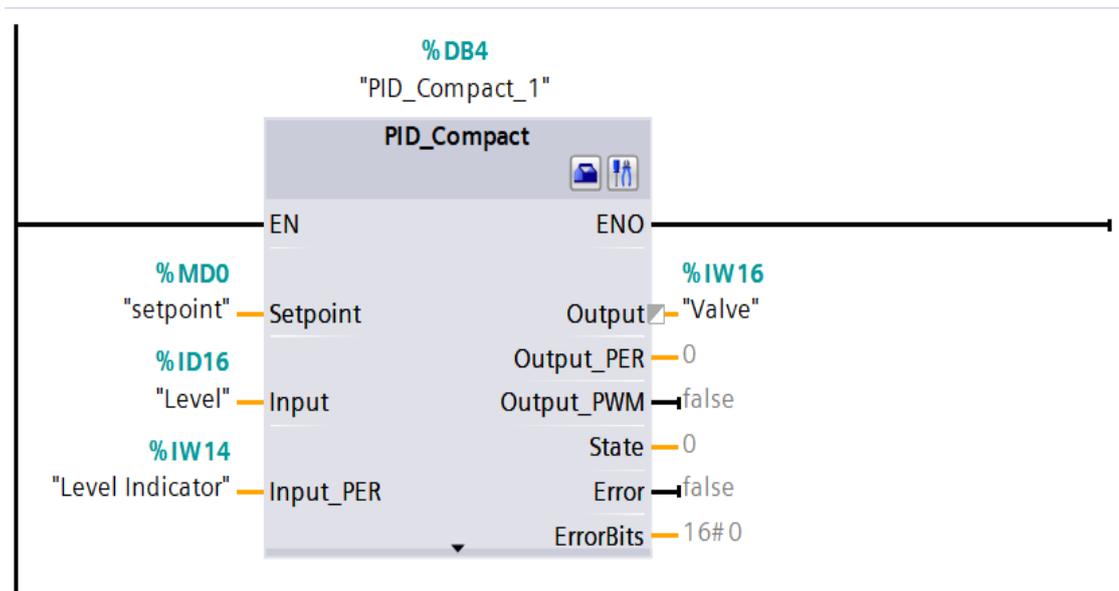


Рисунок 4.8 – Работа P-регулятора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках дипломного проекта мы работали над автоматизированной системой контроля уровня нефти в резервуаре. Наша цель была создать надежную систему, которая сможет поддерживать нужный уровень жидкости даже при изменяющемся притоке с месторождения.

В первом разделе мы обсудили основные принципы работы резервуарных систем, какую роль они играют в нефтяной отрасли и почему автоматизация так важна. Мы также рассмотрели, где именно применяются автоматические системы контроля уровня, например, в нефтедобыче, энергетике и переработке. В качестве объекта автоматизации мы выбрали вертикальный цилиндрический резервуар, который подключен к регулирующему клапану с пневматическим приводом. Также описали, как работают все компоненты системы: датчик уровня, датчик давления и контроллер Siemens S7-1500.

Во втором разделе мы показали структуру системы регулирования. Определили ключевые элементы, которые участвуют в управлении уровнем, составили схему сигнальных связей и отметили, где ведутся измерения и воздействия. Провели анализ технологического процесса, который помог создать математическую модель управления. Полученная функция передачи учитывает инерцию привода, клапана и резервуара, что дало возможность точно описать поведение системы.

В третьем разделе мы провели расчеты и разработали регуляторы, используя три метода: Циглера–Никольса, Чина–Хронеса–Ресвика и Скогестада. Для каждого из методов были найдены параметры для P, PI и PID-регуляторов, и построены переходные характеристики замкнутой системы с разными регуляторами. На основе анализа качества регулирования мы сделали выводы о том, какие алгоритмы лучше подойдут для нашей модели.

Результаты моделирования показали, что P-регулятор, настроенный по методу Скогестада, работает наиболее стабильно, с минимальным временем перехода и без колебаний. Также мы проверили реакцию системы на изменения, которые могли бы возникнуть из-за нестабильного притока нефти. В заключении мы выбрали аппаратуру: использовали промышленные приборы Siemens SITRANS и SAMSON, которые отлично подходят для контроллера Siemens S7-1500.

Также управляется насос штангового глубинного насоса учитывая количество добычи таким образом, чтобы оно не превышало определенного значения.

Работа выполнена успешно. Разработанная система показала высокую точность контроля, стабильно реагирует на внешние воздействия и легко интегрируется в общие схемы автоматизации в нефтяной сфере.

Список использованной литературы

1. Ефимов, Л. Я. Автоматизация процессов нефтегазовой промышленности : учеб. пособие / Л. Я. Ефимов, Ю. Н. Беляев. — СПб. : Профессия, 2018. — 312 с.
2. Пащенко, В. П. Приборы и системы контроля уровня жидкостей : справочник / В. П. Пащенко, И. В. Смирнов. — М. : Машиностроение, 2009. — 256 с.
3. Siemens. SIMATIC S7-1500. Контроллеры нового поколения : каталог и техн. документация. — М. : ООО «Сименс», 2021. — 148 с.
4. Гольдштейн, М. А. Пневмоприводы и регулирующая арматура : теория и практика / М. А. Гольдштейн. — М. : Энергоатомиздат, 2017. — 224 с.
5. Титов, А. В. Моделирование динамики технологических объектов в MATLAB/Simulink : учеб. пособие / А. В. Титов, Е. С. Иванова. — М. : Форум, 2020. — 208 с.
6. Ким, Д. П. Теория автоматического управления / Д. П. Ким. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2016. — 352 с.

Приложение А

Функциональная схема автоматизации

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

На дипломный проект
Гаитова Тамерлана Руслановича
6B07103 – Автоматизация и роботизация

Тема: Разработка системы регулирования насосной станцией с учётом объемов добычи и состояния резервуаров

Перед дипломантом ставилась задача разработки системы регулирования насосной станцией с учетом объемов добычи и состояния резервуаров.

Выполненный проект включает введение, четыре раздела, заключение. В первом разделе рассмотрен технологический процесс работы насосной станции, проанализированы её особенности и значение в общей производственной цепочке предприятия. Также дана характеристика насосной станции как объекта автоматизации, определены ключевые точки контроля и сформирована общая структура системы управления АСУ ТП.

Во втором разделе представлена функциональная схема автоматизации и обоснован подбор оборудования, в соответствии с технологией.

Третий раздел посвящён расчётной части, разработана математическая модель системы регулирования уровнем, проведены процедуры анализа и синтеза регулятора на основе методов Циглера–Никольса, Чина–Хронеса–Ресвика и Скогестада. Путём сравнительного анализа трёх подходов определён наиболее эффективный метод настройки, позволивший выбрать наилучшие параметры регулирования для обеспечения стабильной и эффективной работы насосной станции.

Четвёртый раздел посвящён программной реализации логики управления в среде TIA Portal. Разработан алгоритм, включающий автоматический режим работы, систему блокировок при аварийных ситуациях, а также формирование управляющих воздействий в ответ на изменения параметров технологического процесса.

Заключение: Считаю, что дипломант справился с поставленной задачей, дипломный проект соответствует требованиям, предъявляемым к дипломным проектам по специальности 6B07103 – Автоматизация и робототехника. На основании характеристики выполненных исследований, уровня и качества выполненных результатов студент Гаитов Тамерлан Русланович допускается к защите.

Научный руководитель
ассоциированный профессор. канд. техн. наук.

 Ширяева О.И.
(подпись)

«5» июня 2025 г.

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

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

На дипломный проект

Гаитов Тамерлан Русланович

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Тема: Разработка системы регулирования насосной станцией с учётом объемов добычи и состояния резервуаров

Перед дипломантом ставилась задача разработки системы регулирования насосной станцией с учетом объемов добычи и состояния резервуаров.

В первом разделе дипломного проекта был изучен и исследован технологический процесс насосной станции. Детально был рассмотрен объект автоматизации – насосная станция, по которому далее была составлена функциональная схема управляющей системы.

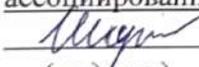
Для разработанной системы управления была построена математическая модель управляемого объекта, с применением методов структурной и параметрической идентификации для повышения её точности. На основе этой модели проведён детальный анализ устойчивости системы и выполнен синтез регулятора. Реализация системы управления выполнена в программной среде TIA Portal, где разработана логика автоматического управления насосной станцией.

В процессе выполнения проекта автор успешно продемонстрировал свою дисциплинированность, исполнительность и трудолюбие, подкрепленные прочной теоретической базой.

Заключение: считаю, что дипломант справился с поставленной задачей, дипломный проект соответствует требованиям, предъявляемым к дипломным проектам по специальности 6B07103 – Автоматизация и робототехника. На основании характеристики выполненных исследований, уровня и качества выполненных результатов студент Гаитов Тамерлан Русланович допускается к защите.

Научный руководитель

ассоциированный профессор. канд. техн. наук.

 Ширяева О.И.

(подпись)

«16» июня 2025 г.

**Протокол анализа Отчета подобия
заведующего кафедрой / начальника структурного подразделения**

Заведующий кафедрой / начальника структурного подразделения заявляет, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Гаитов Тамерлан Русланович

Название: Разработка системы регулирования насосной станцией с учётом объемов добычи и состояния резервуаров

Координатор: Ширяева Ольга Ивановна

Коэффициент подобия 1: 12.6

Коэффициент подобия 2: 4.5

Замена букв: 6

Интервалы: 0

Микропробелы: 1

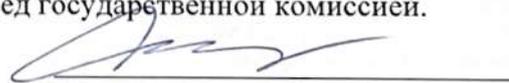
Белые знаки: 0

После анализа отчета подобия заведующий кафедрой / начальника структурного подразделения констатирует следующее:

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем не допускаю работу к защите.

Обоснование: В результате проверки на антиплагиат были получены коэффициенты: Коэффициент подобия 1: 12.6 и Коэффициент подобия 2: 4.5. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите перед государственной комиссией.

«11» июня 2025 г.
Дата


Подпись заведующего кафедрой /
начальника структурного подразделения

Окончательное решение в отношении допуска к защите, включая обоснование:
Дипломный проект допускается к защите.

«11» июня 2025 г.
Дата


Подпись заведующего кафедрой /
начальника структурного подразделения

Протокол анализа Отчета подобия Научным руководителем

Заявляю, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Гаитов Тамерлан Русланович

Название: Разработка системы регулирования насосной станцией с учётом объемов добычи и состояния резервуаров

Координатор: Ширяева Ольга Ивановна

Коэффициент подобия 1: 12.6

Коэффициент подобия 2: 4.5

Замена букв: 6

Интервалы: 0

Микропробелы: 1

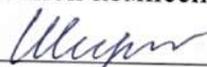
Белые знаки: 0

После анализа Отчета подобия констатирую следующее:

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, не допускаю работу к защите.

Обоснование: В результате проверки на антиплагиат были получены коэффициенты: Коэффициент подобия 1: 12.6 и Коэффициент подобия 2: 4.5. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите перед государственной комиссией.

«16» июня 2025 г.
Дата


Подпись Научного руководителя

РЕЦЕНЗИЯ

На дипломный проект

Гаитова Тамерлана Руслановича

6В07103 – Автоматизация и роботизация

На тему: Разработка системы регулирования насосной станцией с учётом объёмов
добычи и состояния резервуаров

Выполнено:

- а) графическая часть на ___ листах
- б) пояснительная записка на 43 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Дипломный проект посвящён разработке и внедрению автоматизированной системы регулирования насосной станции на базе штангового глубинного насоса. Данная работа актуальна, так как в современных условиях приоритетное значение имеют задачи энергосбережения, повышения надёжности и эффективности управления технологическими процессами в горно-обогатительной промышленности.

Проект включает введение, четыре раздела, заключение. В первом разделе рассмотрен технологический процесс работы насосной станции, проанализированы её особенности и значение в общей производственной цепочке предприятия. Также дана характеристика насосной станции как объекта автоматизации, определены ключевые точки контроля и сформирована общая структура системы управления АСУ ТП.

Во втором разделе представлена функциональная схема автоматизации и обоснован подбор оборудования, в соответствии с технологией.

Третий раздел посвящён расчётной части, разработана математическая модель системы регулирования уровнем, проведены процедуры анализа и синтеза регулятора на основе методов Циглера–Никольса, Чина–Хронеса–Ресвика и Скогестада. Путём сравнительного анализа трёх подходов определён наиболее эффективный метод настройки, позволивший выбрать наилучшие параметры регулирования для обеспечения стабильной и эффективной работы насосной станции.

Четвёртый раздел посвящён программной реализации логики управления в среде ПИА Portal. Разработан алгоритм, включающий автоматический режим работы, систему блокировок при аварийных ситуациях, а также формирование управляющих воздействий в ответ на изменения параметров технологического процесса.

Замечания:

1. Состояние резервуаров в системах автоматического управления насосной станцией оценивается по ряду параметров, с помощью датчиков и алгоритмов диагностики. В дипломе не представлено.
2. Нет результатов моделирования с заданным уровнем в резервуаре (с уставкой).

Оценка работы

Учитывая вышеизложенное, считаю, что дипломный проект заслуживает оценки «C» (40%), а студент Гаитов Т.Р. присвоения степени бакалавра по специальности 6В07103 – Автоматизация и роботизация.

Рецензент
зав. кафедрой "АиУ"
АУЭС им. И. Даукеева
доктор Ph.D
Абжанова Л.К.
«___» июня 2025 г.

