

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

Шаймерденов Олжас Арманович

Разработка системы автоматического регулирования давления в нефтегазовых
трубопроводах с использованием антипомпажного регулятора

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

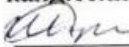
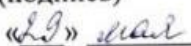
На тему: «Разработка системы автоматического регулирования давления в нефтегазовых
трубопроводах с использованием антипомпажного регулятора»

6В07103 – Автоматизация и роботизация

Выполнил

Шаймерденов О.А.



Научный руководитель
канд. техн. наук
 Ширяева О.И.
(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

6B07103 – Автоматизация и роботизация



ЗАДАНИЕ
на выполнение дипломного проекта

Обучающемуся Шаймерденов О.А.

Тема: «Разработка системы автоматического регулирования давления в нефтегазовых трубопроводах с использованием антипомпажного регулятора».

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

Срок сдачи законченной работы: «31» мая 2025 г.

Исходные данные к проекту: технологический регламент и математические модели центробежного компрессора, пневматического привода и пружинно-мембранного клапана.

Перечень подлежащих к разработке в дипломном проекте вопросов:

а) описание технологического процесса работы центробежного компрессора и явления помпажа;

б) создание функциональной схемы автоматизации, анализ и синтез системы регулирования давления нагнетания центробежного компрессора;

в) реализация алгоритма антипомпажного управления в среде TIA Portal;

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

функциональная схема автоматизации системы автоматического регулирования давления с антипомпажным регулятором.

Рекомендуемая основная литература:

1 Старосельский С. Встроенная система защиты от помпажа и контроля производительности центробежных компрессоров. – Компрессорная техника и пневматика, 2013. – 15с.

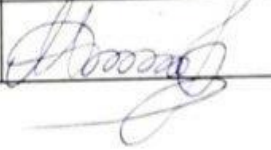
2 Ерофеев А.А. Теория автоматического управления: Учебник для вузов – 3-е изд., стереотип. – СПб. Политехника, 2008. – 302с.

ГРАФИК
подготовки дипломного проекта

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологический раздел Технологический процесс работы центробежного компрессора	15. 03. 2025 г.	
Расчетный раздел Анализ и синтез автоматического регулирования давления нагнетания	18. 04. 2025 г.	
Расчетный раздел Разработка программного управления центробежным компрессором с антипомпажным регулятором	20. 05. 2025 г.	

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	Қ. А. Манатов магистр техн. наук	31.05	

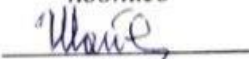
Научный руководитель



Ширяева О. И.

подпись

Задание принял к исполнению обучающийся


подпись

Шаймерденов О.А.

Дата

« 5 » февраля 2025 г.

АНДАТПА

Дипломдық жобада центрифугалық компрессордың қысымын сорғы клапанын реттеу арқылы басқаруға арналған автоматтандырылған жүйе жасалды, ол Siemens S7-1500 ПЛК негізінде жүзеге асырылды. Сонымен қатар, жүйенің тұрақты жұмысын қамтамасыз ету үшін екіпозициялық рециркуляция клапанын (толық ашық немесе толық жабық) басқару қосылды.

Жұмысқа басқару жүйесінің құрылымын жобалау, автоматтандырудың функционалдық схемасын жасау, аппараттық құралдарды таңдау және TIA Portal ортасында басқару алгоритмін бағдарламалау кірді. Математикалық модель құру үшін параметрлік сәйкестендіру әдісі қолданылды. Тұрақтылықты талдау және ПИД-регуляторды Козн-Кун мен Чин-Хронес-Ресвик әдістерімен баптау жүргізілді, ал ең тиімді баптау Чин-Хронес-Ресвик әдісімен орындалып, сорғы клапаны арқылы қысымды дәл және тұрақты басқаруға мүмкіндік берді.

АННОТАЦИЯ

В дипломном проекте разработана автоматизированная система управления давлением нагнетания центробежного компрессора с регулированием клапана на всасе на базе ПЛК Siemens S7-1500. Также реализовано управление клапаном рециркуляции в двухпозиционном режиме полностью открыт или закрыт для стабильной работы системы вне зоны помпажа.

Выполнены проектирование структуры АСУ ТП, разработка функциональной схемы автоматизации, подбор аппаратуры и программная реализация алгоритма в среде TIA Portal. Для построения математической модели использован метод параметрической идентификации. Проведен анализ устойчивости и настройка ПИД-регулятора методами Козн-Куна и Чина-Хронеса-Ресвика, при этом оптимальная регулировка выполнена по методу Чина-Хронеса-Ресвика для точного и стабильного управления давлением через клапан на всасе.

ABSTRACT

The Diploma project developed an automated control system for the discharge pressure of a centrifugal compressor by regulating a suction valve using the Siemens S7-1500. Additionally, control of a two-position recirculation valve (fully open or fully closed) was implemented to ensure stable system operation.

The work included designing the control system architecture, developing the functional automation scheme, selecting hardware, and programming the control algorithm in the TIA Portal environment. A parametric identification method was used to build the mathematical model. Stability analysis and PID controller tuning were performed using Cohen-Coon and Chien-Hrones-Reswick methods, with optimal tuning achieved by the Chien-Hrones-Reswick method to ensure accurate and stable pressure control via the suction valve.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Технологическая часть	8
1.1 Описание компрессоров. Центробежный компрессор	8
1.2 Области применения центробежного компрессора	10
1.3 Описание объекта автоматизации	10
1.4 Газодинамическая характеристика компрессора. Описание явления помпажа	11
1.5 Явление помпажа у центробежных компрессоров. Расчет параметра помпажа	14
2 Разработка функциональной схемы управления	18
2.1 Определение диапазонов параметров технологического процесса	18
2.2 Функциональная схема автоматизации	18
2.3 Выбор приборов КИП и ПЛК	19
3 Расчетная часть	24
3.1 Постановка задачи для контура управления	24
3.2 Анализ динамических свойств системы	25
3.3 Структурный синтез типового регулятора	27
3.3.1 Замкнутый метод Циглера-Никольса	28
3.3.2 Модифицированный метод Циглера-Никольса	30
3.3.3 Метод Тиреуса-Люйбена	32
4 Синтез системы программного управления	36
4.1 Разработка блок-схемы алгоритма управления	36
4.2 Разработка антипомпажного программного управления в среде TIA-Portal	37
4.3 Разработка SCADA системы для антипомпажного регулирования давления центробежного компрессора	43
4.4 Связь SCADA системы с SQL сервером	47
5 Связь среды TIA Portal с MATLAB/Simulink с помощью OPC UA	49
Заключение	53
Список использованной литературы	55
Приложение А	56
Приложение Б	57
Приложение В	58
Приложение Г	59

ВВЕДЕНИЕ

В современной промышленной инфраструктуре надёжность и стабильность работы трубопроводных систем имеют решающее значение. Центробежные компрессоры, применяемые в таких отраслях, как нефтегазовая, химическая и энергетическая, играют ключевую роль в обеспечении непрерывного потока рабочей среды. При этом одним из наиболее критичных режимов их работы является помпаж колебательный процесс, возникающий при снижении расхода и сопровождающийся опасными нагрузками на оборудование. Системы автоматического регулирования, способные удерживать давление в заданных пределах и предотвращать развитие помпажа, становятся необходимым элементом современных комплексов компрессорного оборудования. Они позволяют обеспечить стабильную эксплуатацию, продлить срок службы оборудования и повысить общую технологическую устойчивость. При этом особое внимание уделяется адаптивности алгоритмов управления и их способности реагировать на быстрые изменения внешних условий.

Цель дипломного проекта. Состоит в разработке системы автоматического регулирования давления в трубопроводе с использованием антипомпажного регулятора, способную стабилизировать работу компрессора и предотвращать выход за пределы границы помпажа.

Актуальность темы. Обусловлена необходимостью повышения надёжности оборудования, снижения аварийных рисков и обеспечения устойчивой работы технологических установок в условиях переменной нагрузки. Современные методы автоматизации позволяют реализовать точные и быстрые управляющие действия, снижая зависимость от оператора и исключая влияние человеческого фактора.

Общая характеристика проекта. В рамках проекта рассмотрена трубопроводная система с центробежным компрессором как объект автоматизации, выделены ключевые точки контроля и выбраны основные элементы системы включая регулирующий клапан и дискретный клапан, антипомпажный контур и программируемый логический контроллер Siemens S7-1516-3 PN/DP. Получена математическая модель объекта методом параметрической идентификации. Выполнен анализ устойчивости по первому методу Ляпунова и синтез ПИД-регулятора с использованием методов Чина-Хронеса-Ресвика и Коэна-Куна.

На завершающем этапе проведено сравнение настроек регуляторов, реализована программная логика управления в TIA Portal, разработан интерфейс в SCADA-среде и настроена связь с SQL-сервером для сбора и хранения технологических данных.

1 Технологическая часть

1.1 Описание компрессоров. Центробежный компрессор

Компрессор увеличивает давление газа или жидкости. Обычно слово «компрессор» используют для работы с газами а «насос» для жидкостей. Способ повышения давления зависит от типа компрессора [1].

Некоторые компрессоры сжимают газ уменьшая его объём. К таким относятся поршневые спиральные и диафрагменные компрессоры. Другие ускоряют поток газа а потом замедляют его чтобы повысить давление это связано с законом сохранения энергии. Когда газ замедляется его скорость снижается а давление и плотность увеличиваются. Турбокомпрессоры например осевые и центробежные работают по такому принципу. Их рабочие колёса лопатки вращаются и передают энергию газу ускоряя его перед специальным каналом где поток замедляется а давление растёт. В осевых компрессорах газ движется вдоль оси вращения а в центробежных выходит наружу по радиусу на рисунке 1.1.

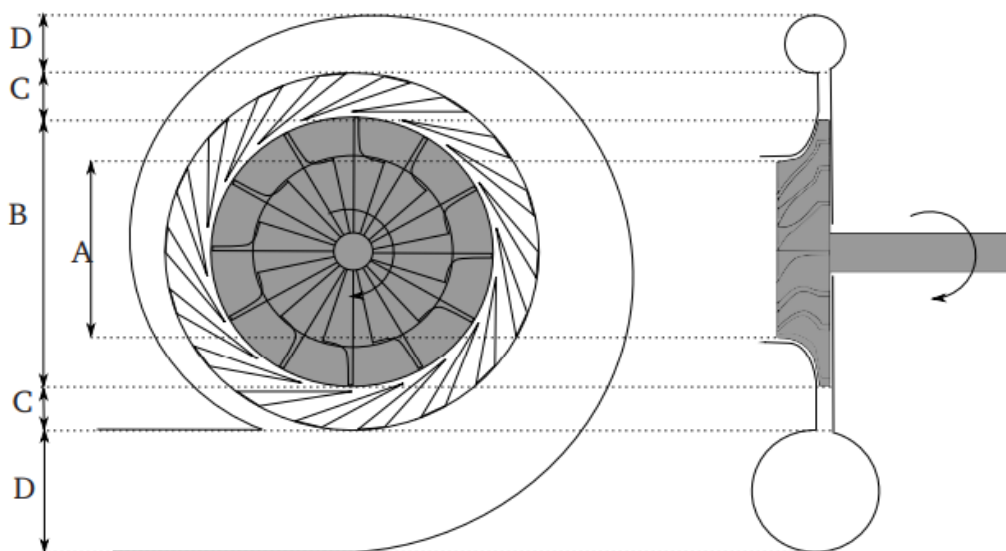


Рисунок 1.1 – Импеллер с прямыми лопатками

Газ входит в компрессор через входное сопло которое представляет собой трубу подающую поток внутрь компрессора. Внутри сопла могут быть установлены направляющие лопатки или лопатки входного направляющего аппарата они закручивают поток перед попаданием в импеллер. Эти направляющие лопатки иногда регулируются для управления работой компрессора.

Часть импеллера которая входит в конец входного сопла называется индуктором. Лопатки индуктора направлены в сторону вращения. В этой области газ получает дополнительный угловой момент при том что радиус вращения остаётся прежним.

В центробежной части импеллера поток поступает из индуктора и выходит в радиальном направлении. Лопатки на выходе импеллера могут быть изогнуты назад или вперёд то есть в сторону противоположную вращению или в его направлении. На рисунке один изображён импеллер с прямыми лопатками его также называют импеллером с радиальными лопатками. После импеллера поток направляется в диффузор где скорость потока снижается а давление возрастает. Поэтому каналы диффузора обычно имеют форму расширяющихся проходов.

Дополнительное повышение давления достигается за счёт изменения направления потока. Диффузоры с лопатками разделяются по форме лопаток например на аэродинамические и островковые. Подобно входным направляющим лопаткам лопатки диффузора могут иметь возможность регулировки.

Основным завершающим элементом компрессора является улитка или коллектор он собирает поток выходящий из диффузора и направляет его в выходной трубопровод компрессора. Коллектор как и каналы диффузора имеет увеличенную площадь сечения что позволяет кинетической энергии потока превращаться в давление.

Центробежные компрессоры могут состоять из нескольких ступеней когда два и более импеллера размещены на одном приводном валу. Поток перемещается от одного импеллера к другому через диффузоры и коллекторы. Таким образом последовательность одноступенчатых компрессоров образует многоступенчатый компрессор. Такой компрессор способен создавать такое же повышение давления как и одноступенчатый но при этом имеет значительно меньший размер импеллера.

Компрессоры обычно приводятся в движение электродвигателями или газовыми турбинами. Электрические приводы проще в управлении и быстрее реагируют на изменения. Однако в случаях когда использование электричества невозможно или нежелательно применяют газовые турбины. На рисунке 1.2 показано устройство центробежного компрессора в разрезе.

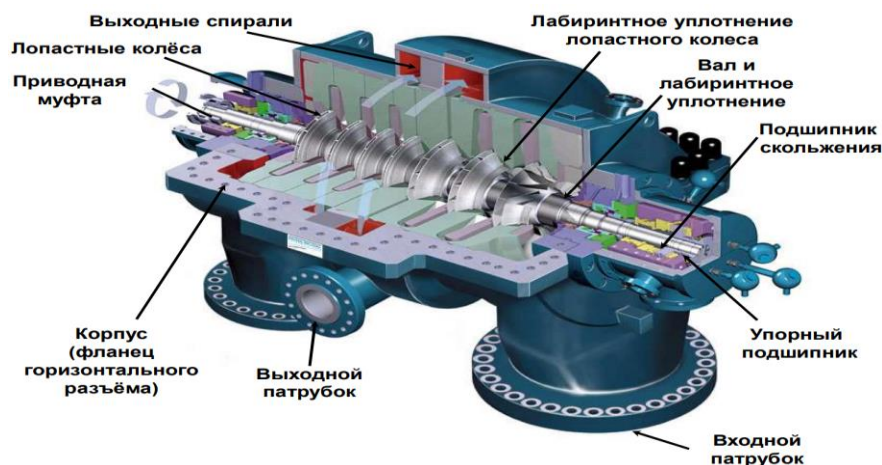


Рисунок 1.2 – Разрез компрессора горизонтального разъёма

1.2 Области применения компрессоров

Центробежный компрессор применяется во многих отраслях например в нефтяной авиационной и газовой для повышения давления и производства нефти. Такие компрессоры могут работать при высоких давлениях и лучше справляются с эрозионными загрязнёнными и коррозионными газами. Примеры применения:

- транспортировка газа;
- холодильники и кондиционеры воздуха;
- турбонагнетатели для двигателей внутреннего сгорания.

Центробежные компрессоры относятся к динамическим машинам которые также называют турбокомпрессорами. Современные технологии производства сыграли важную роль в развитии этих сложных машин. Основные части центробежного компрессора направляющие лопасти рабочее колесо диффузор спиральная камера и боковой выход. Рабочее колесо ключевой элемент который влияет на эффективность всей системы компрессора. Эти устройства широко используются в разных отраслях где нужно сжимать газы. Например в газовой промышленности металлургии горнодобывающей отрасли и других.

В химической промышленности центробежные компрессоры применяют для сжатия таких газов как водород угарный газ аммиак а также при переработке природного газа на установках для сжижения газа и газоперерабатывающих станциях. Они находят применение в опреснении воды в целлюлозно бумажной промышленности и в системах улавливания углекислого газа.

В энергетике эти компрессоры важны для подачи топливных газов удаления серы из дымовых газов и подачи воздуха на газовые турбины а также для других процессов связанных с сжатием газа.

На газовых месторождениях центробежные компрессоры сжимают газ до нужного давления подают его на газовые установки или трубопроводы регулируют давление при разделении газа и жидкости. Кроме того их используют для подачи углекислого газа на установках по производству удобрений и в газовых турбинах включая малые авиационные турбины.

Центробежные компрессоры эффективны в системах сжатия воздуха таких как установки по разделению воздуха где требуется подача воздуха без масла например в пищевой промышленности [1].

1.3 Описание объекта автоматизации

Компрессор 170 31 1С входит в состав агрегатов ГПА 4РМ 03 и предназначен для сжатия и перемещения природного газа по магистральным газопроводам. В таблице 1.1 приведены характеристики этого центробежного компрессора.

Таблица 1.1 – Характеристики компрессора 170-31-1С:

Характеристика	Значение
Производительность	5,25 млн м³/сут
Конечное давление (абс.)	7,74 МПа
Относительное давление	1 МПа
Частота вращения ротора	10 300 об/мин
КПД	$\geq 0,85$

В состав компрессора входит:

- корпус нагнетателя вместе с пакетом нагнетателя и ротором;
- система смазывания;
- система сухих уплотнений;
- ротор нагнетателя;
- комплект приспособлений для сборки и разборки нагнетателя.

На рисунке 1.3 приведено изображение центробежного компрессора.



Рисунок 1.3 – Центробежный компрессор 170-31-1С

1.4 Газодинамическая характеристика компрессора. Описание явления помпажа

Газодинамическая характеристика компрессора представляет собой набор параметров которые описывают его работу в различных режимах. В этот набор входят производительность давление температура и другие важные показатели влияющие на эффективность сжатия газа.

Эти характеристики помогают понять как компрессор будет работать в разных условиях и служат для проектирования и улучшения его работы. На них влияют множество факторов таких как состав газа температура давление и

скорость вращения ротора что существенно отражается на работе компрессора [2].

Для точных расчетов газодинамических характеристик применяются разные методы в том числе моделирование движения газа внутри компрессора что позволяет выявлять участки с большими потерями давления.

При проектировании необходимо учитывать газодинамические характеристики для обеспечения надежной работы и максимальной эффективности компрессора. На рисунке 1.4 показана газодинамическая характеристика [3].



Рисунок 1.4 – Газодинамическая характеристика компрессора

Помпаж это явление в компрессорах при котором происходит резкое изменение потока, сопровождающееся обратным направлением при этом скорость компрессора, достигает скорости звука. Этот циклический процесс может вызвать серьезные повреждения компрессора и опасность для персонала. Так как помпаж является естественным явлением нужно разработать меры для защиты компрессора от его возникновения. Помпаж возникает, когда поток достигает минимального значения.

Существует много факторов, способствующих появлению помпажа включая нестабильность объемного потока всасывающего давления разницу давления на выходе и на главной линии, а также особенности запуска и аварийного выключения компрессора. Помпаж вызывает колебания в системе что может привести к повреждению не только компрессора, но и соседних труб,

которые могут быть связаны с другими важными системами что создает опасные условия и снижает общую эффективность работы системы.

Когда достигается предел помпажа такие детали как колеса и диффузоры могут остановиться это происходит из-за отделения газа от поверхности потока. При изменении режима работы компрессора меняется угол атаки аэродинамических элементов. Как и у крыла увеличение этого угла может вызвать остановку. В турбомашинах остановка часто проявляется разделением потока в отдельных зонах при более низкой скорости по сравнению с вращением рабочего колеса что приводит к взаимодействию с диффузором и нарушению стабильности всей системы.

Процесс становится нестабильным при попытке увеличить сопротивление в системе так что напор компрессора достигает максимума. В этом случае расход начинает уменьшаться и соответственно снижается напорная способность компрессора. По мере снижения напора расход продолжит уменьшаться. Если компрессор не сможет обеспечить внешний напор возникает обратный поток. Когда предел стабильности системы сжатия превышаетея возникает помпаж. Это мешает достижению целей процесса и может вызвать повреждение компрессора из-за вибраций ротора. Поэтому чтобы избежать помпажа необходимо поддерживать поток на уровне который не позволит снизиться расходу ниже максимального напора компрессора. Ниже и на рисунке 1.5 изображен помпажный цикл компрессорной кривой:

- А до В 20-50мсек – переход к помпажу;
- С до D 20-120 мсек – выход из помпажа;
- А-В-С-D-А 0,3-3 сек – цикл помпажа.

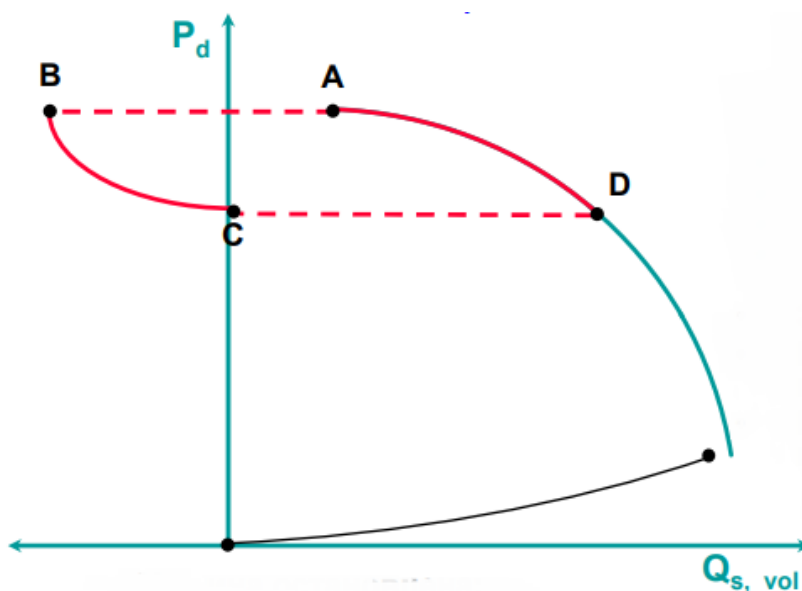


Рисунок 1.5 – Цикл помпажа компрессорной кривой

Схема работы компрессора согласно рабочей кривой показана на рисунке 1.6. При помпаже на характеристиках процесса можно заметить:

- резкая смена знака;
- быстрые неустойчивые пульсации как давления, так и расхода;
- повышение температуры в компрессоре.

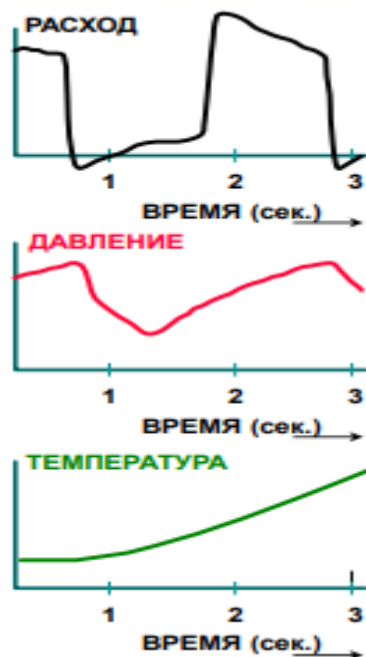


Рисунок 1.6 – Основные характеристики процесса при помпаже

1.5 Явление помпажа у центробежных компрессоров. Расчет параметра помпажа

В современных трубопроводных комплексах широко используются центробежные компрессоры, оснащённые системами предотвращения помпажа. В этих установках регулирование давления компрессора осуществляется с учётом характеристик трубопроводной системы. Возникновение помпажа связано с уменьшением расхода газа, что является характерным явлением для подобных комплексов. Данный процесс сопровождается изменением состава газа и температурных параметров, что требует тщательного учёта данных факторов при проектировании и расчёте устойчивости системы [4].

В установках повторной закачки компрессоры применяются для повышения давления газа в месторождениях с целью увеличения добычи. В таких системах регулируемое выходное давление зависит от давления в газовом пласте и меняется во времени. Поскольку источников газа может быть несколько, его состав существенно варьируется. Поэтому при расчётах важно учитывать границу помпажа, используя параметры, независимые от состава газа, такие как уменьшенная высота напора и поток.

Для предотвращения прерываний потока применяются методы управления, ограничивающие влияние жидкостных пробок. Давление на выходе в этих системах может достигать значительных значений, что увеличивает соотношение давлений. Несмотря на то, что резкие перепады температуры случаются редко и зависят от сезонных факторов, поток на входе может значительно колебаться из-за работы клапанов и сбоев в технологическом процессе.

Компрессоры также используются для хранения и отбора газа. Давление на входе изменяется во времени: при отборе оно изначально высокое, затем снижается, а при закачке — постепенно повышается. Начальное давление в хранилище оказывает влияние на расчёт соотношения давлений. Изменение состава газа связано с особенностями хранения и усложняет управление помпажем, требуя более быстрого реагирования при нормальной работе и более плавной реакции при снижении соотношения давлений. Поэтому управляющие сигналы для рециркуляционного клапана должны быть более разнообразными, чем в трубопроводных системах.

Газосборные системы предназначены для сбора добываемого газа перед его переработкой или транспортировкой. Состав газа может значительно меняться в зависимости от уровня осушки, сепарации и фильтрации. Колебания состава связаны с разнородностью месторождений и влияют на зависимости напора компрессора от частоты вращения. Давление в этих системах обычно ниже, чем в установках повторной закачки и хранения, а температура газа остаётся стабильной.

Высоконапорные и технологические компрессоры применяются в различных производственных процессах с разными газовыми смесями и широким диапазоном давлений. Такие установки встречаются на нефтеперерабатывающих заводах и предприятиях по переработке углеводородов. Температурные и составные характеристики газа зависят от технологических требований. Системы защиты от помпажа проектируются с учётом предотвращения возникновения явления в нормальных режимах, поскольку высокое давление увеличивает риск отказа оборудования.

Для предотвращения помпажа в компрессор интегрируют байпасный клапан. Стандартные системы оснащены датчиками температуры и давления на входе и выходе, а расход контролируется с помощью дифференциального датчика давления. Управление помпажем осуществляется с помощью алгоритмов регулирования, включающих уставки защиты и управление клапанами. Противопомпажная система определяет рабочую точку компрессора по параметрам расхода, температуры и давления, сравнивает её с границей помпажа и рассчитывает управляющее воздействие. Для рециркуляционного клапана применяется PID-регулятор, который открывает клапан для возвращения части газа на вход компрессора, снижая напор. Когда поток восстанавливается, клапан закрывается, и компрессор работает в обычном режиме.

Возникновение помпажа может привести к серьёзным последствиям, включая нестабильность всей системы. В таких случаях применяются аварийный сброс газа в атмосферу, сопряжённый с риском взрыва, либо использование рециркуляционного клапана для защиты оборудования.

Для эффективного предотвращения помпажа в системах управления необходимо точное определение границы помпажа, которое должно основываться на корректной модели, учитывающей особенности используемого газа. Управляющий алгоритм должен быть адаптирован к динамическим изменениям процесса, чтобы своевременно реагировать на возникающие колебания. Кроме того, рециркуляционный клапан должен соответствовать характеристикам конкретного компрессора и обеспечивать возможность быстрого изменения пропускной способности для поддержания стабильной работы системы.

Рабочие параметры компрессора включают, напор и расход газа. Связь между появлением помпажа и этими параметрами может быть описана математически. Пример схемы автоматического управления компрессором приведён на рисунке 1.7.

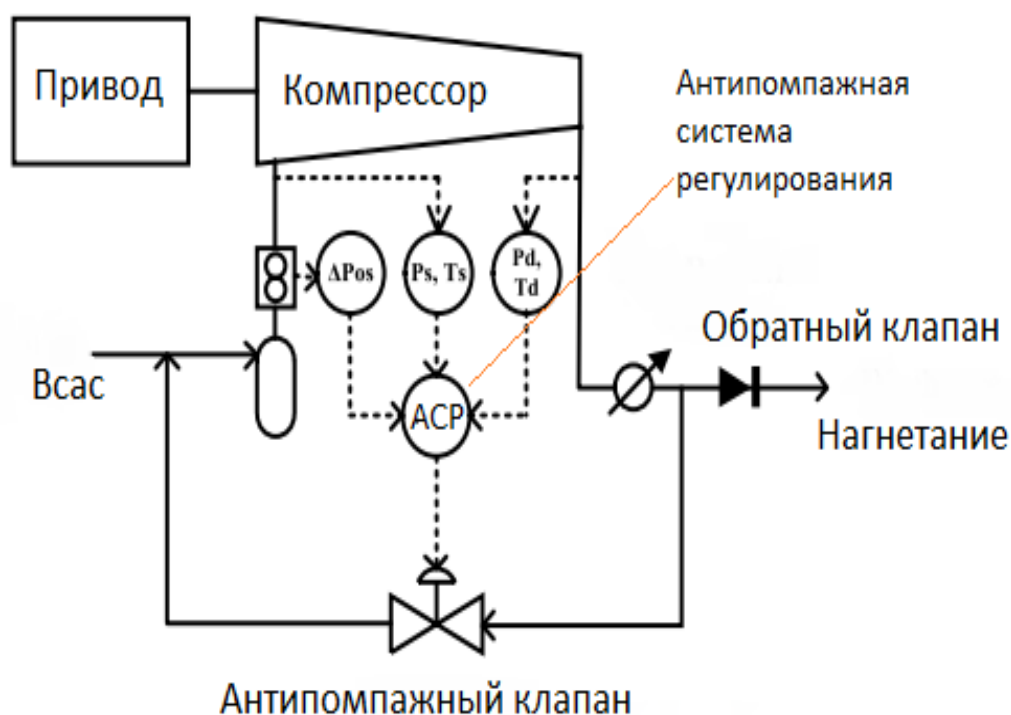


Рисунок 1.7 – Технологическая схема

Регулирование антипомпажного клапана осуществляется на основе данных с датчиков давления температуры и расхода газа. Основная задача системы это поддерживать работу компрессора в безопасном диапазоне, предотвращая снижение расхода ниже критического уровня. Антипомпажное регулирование является частью общей системы автоматического управления давлением, направленной на предотвращение возникновения явления помпажа,

которое включает в себя, обеспечение контроля давления и расхода для устранения колебаний, регулирование работы насосных станций с целью поддержания оптимальных условий эксплуатации, применение специализированных устройств, включая дроссели и регулирующие клапаны, для сглаживания перепадов давления и потока [5].

Расчет удалённости от помпажа позволяет антипомпажным регуляторам поддерживать компрессор в рабочей зоне. Для расчета удаленности потребуются расчеты квадратичного расхода и напора.

Расчет квадратичного расхода

$$Q_s^2 = \frac{K Z_s R_0 T_s}{MW} \cdot \frac{\Delta p_{o,s}}{p_s} \quad (1.1)$$

где R – Газовая постоянная, Дж/(кг·К);
 MW – Молекулярный вес газа, кг/кмоль;
 p_s – Давление на всасе компрессора, Па;
 K – Постоянная измерительной диафрагмы;
 $\Delta p_{o,s}$ – Перепад давлений на измерительной диафрагме, Па;
 T_s – Температура газа на всасе, °С;
 Z_s – Сжимаемость газа на всасе компрессора.

Расчет напора производится по следующей формуле :

$$H_p = \frac{Z_s R_0 T_s}{MW} \cdot \frac{R_c^\sigma - 1}{\sigma} \quad (1.2)$$

где $R_t = T_d/T_s$ – Отношение температур;
 $R_c = p_d/p_s$ – Степень сжатия;
 p_d – Давление нагнетания, Па;
 σ – Показатель экспоненты для политропического сжатия.

Формула для расчета параметра помпажа:

$$S_s = K \frac{H_p}{Q_s^2} = K \frac{\frac{Z_s R_0 T_s}{MW} \frac{R_c^\sigma - 1}{\sigma}}{\frac{K Z_s R_0 T_s}{MW} \frac{\Delta p_{o,s}}{p_s}} = K \frac{\frac{R_c^\sigma - 1}{\sigma}}{\frac{\Delta p_{o,s}}{p_s}} \quad (1.3)$$

σ может быть рассчитан на основе измерения давления и температуры:

$$\sigma = \frac{\log\left(\frac{T_d}{T_s}\right)}{\log\left(\frac{p_d}{p_s}\right)} \quad (1.4)$$

2 Разработка функциональной схемы управления

2.1 Определение диапазонов параметров технологического процесса

Чтобы система работала надёжно и без сбоев, важно следить за ключевыми параметрами в определённых точках. Эти места называются точками контроля. В таблице 2.1 указаны эти точки и диапазоны значений, которые нужно поддерживать для нормальной работы.

Таблица 2.1 – Точки контроля и их диапазон поддерживаемых значений

Контрольная точка	Расположение	Поддерживаемые значения
Температура на всасе	Входной трубопровод перед компрессором	0°C ... +100°C
Давление на всасе	Входной трубопровод перед компрессором	0...4 МПа
Расход газа на всасе	Входной трубопровод перед компрессором	0...900 м³/ч
Давление на выходе	Линия нагнетания после компрессора	0 ... 7 МПа
Температура на выходе	Выходной трубопровод после компрессора	0°C ... +300°C

2.2 Функциональная схема автоматизации

Функциональная схема автоматизации представляет собой описание устройства и принципа работы системы управления, предназначенной для контроля и регулирования процессов в оборудовании, таком как центробежный компрессор. Эта схема отражает структуру системы и показывает взаимодействие между основными её элементами, включая измерительные приборы, управляющие модули, исполнительные устройства и интерфейсы оператора.

Подобные схемы служат основой для разработки автоматизированных систем. Они позволяют определить, какие компоненты необходимы, как они должны быть связаны между собой и каким образом они интегрируются в общий процесс. Визуальное представление процессов позволяет наглядно отразить, какие приборы используются для сбора данных, как происходит передача управляющих сигналов и каким образом осуществляется контроль над технологическим оборудованием.

В процессе эксплуатации центробежного компрессора воздух подаётся через первый регулирующий клапан. На этом участке установлен расходомер,

который отслеживает объём поступающего воздуха. Далее воздух направляется в компрессор, где происходит его сжатие. Для контроля температуры используется термопреобразователь, установленный на выходе компрессора, фиксирующий температуру сжатого воздуха. Одновременно осуществляется мониторинг частоты вращения ротора компрессора, что достигается с помощью привода с обратной связью.

После сжатия воздух поступает в распределительную магистраль или технологический трубопровод, где может быть использован по назначению, например, для подачи в производственные участки или в систему хранения. В этих зонах возможно дополнительное измерение параметров, включая давление, расход и температуру. Для этого установлены соответствующие датчики, которые обеспечивают постоянный контроль над состоянием среды и позволяют поддерживать стабильную работу системы.

Энергия, создаваемая при сжатии воздуха, используется для обеспечения давления в трубопроводе или в другой части технологического процесса. Все ключевые параметры, такие как давление, температура находятся под непрерывным контролем, что необходимо для предотвращения аварийных ситуаций и достижения максимальной эффективности.

Описание функциональной схемы автоматизированной системы управления, реализующей управление работой центробежного компрессора и регулирование давления, представлено в приложении А.

2.3 Выбор приборов КИП и ПЛК

Для измерения расхода газа через компрессор используется дифференциальный метод с применением сужающего устройства. Такой способ позволяет получать точные и стабильные данные, что важно для надёжной работы системы.

От расходомера требуется высокая точность, устойчивость к помехам и быстрая реакция на изменения потока. Устройство устанавливается как можно ближе к компрессору, желательно на всасывающем участке трубопровода. Это помогает получить более точные показания.

Чтобы правильно измерить расход, перепад давления на сужающем устройстве при максимальной нагрузке компрессора должен быть не менее 25 миллиметров водяного столба. Импульсные трубки, соединяющие устройство с датчиком, должны быть как можно короче, с внутренним диаметром не менее 8 миллиметров.

При выборе датчика важно учитывать его надёжность в промышленных условиях, а также возможность передачи данных в систему управления через стандартный токовый сигнал от 4 до 20 миллиампер. В данной системе используется расходомер Rosemount 3051CD, который отвечает всем этим требованиям и обеспечивает точное измерение расхода газа, который изображен на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Расходомер Rosemount 3051CD

Для измерения давления на входе и выходе центробежного компрессора установлен датчик давления Rosemount 3051CG, обладающий высокой точностью и надёжностью при эксплуатации в промышленных условиях. Он позволяет точно контролировать изменения давления в рабочем процессе, что особенно важно для предотвращения сбоев и явления помпажа.

Диапазон измерения давления на всасывающей линии составляет от 0 до 4000 кПа, на нагнетательной от 0 до 8000 кПа. Эти значения охватывают все возможные режимы работы компрессора и позволяют своевременно корректировать параметры процесса. Датчик передаёт данные в систему автоматизации через стандартный аналоговый токовый сигнал от 4 до 20 мА. На рисунке 2.2 изображен Rosemount 3051CG.



Рисунок 2.2 – Датчик давления Rosemount 3051CG

Для мониторинга температуры газа на входе и выходе компрессора используется температурный преобразователь Rosemount 644, который обеспечивает точные показания и стабильно работает в условиях повышенных нагрузок. Температурный контроль необходим для предотвращения перегрева оборудования, а также для оптимизации работы теплообменников и настройки рабочих параметров компрессора.

Диапазон измерения температуры составляет от 0 до 100 градусов Цельсия на всасывании и от 0 до 300 градусов Цельсия на нагнетании. Эти значения позволяют контролировать процесс на всех его этапах. Данные передаются в

систему управления по аналоговому сигналу от 4 до 20 миллиампер с поддержкой цифрового протокола HART, что упрощает интеграцию с системой автоматического регулирования. Данный датчик изображен на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Температурный преобразователь Rosemount 644

Выбран регулирующий клапан Masoneilan 41005 Series с балансированной конструкцией затвора и направляющими, обеспечивающий стабильную работу при больших перепадах давления и температурных колебаниях. Корпус изготовлен из углеродистой или нержавеющей стали с антивибрационными и антикоррозионными покрытиями. Клапан имеет линейные или экспоненциальные характеристики регулирования, что обеспечивает точное управление потоком.

Используется пружинно-мембранный пневмопривод Masoneilan Type 87/88, рассчитанный на широкий диапазон перепадов давления. Привод обеспечивает механическую защиту с автоматическим возвратом клапана в безопасное положение при отключении питания. Имеется возможность ручного управления для аварийных ситуаций.

На рисунке 2.4 изображен позиционер с клапаном и приводом.



Рисунок 2.4 – Клапан Masoneilan серии 41005 с пневмоприводом Masoneilan Type 87/88 и электропневматическим позиционером SVI II AP

В качестве электропневматического позиционера был выбран Masoneilan SVI II AP обеспечивающий точное позиционирование клапана по сигналу 4-20

мА. Отличается бесконтактным сенсорным датчиком положения, что повышает надежность и срок службы прибора.

В качестве клапана рециркуляции выбран шаровой клапан Fisher Vee-Ball серии 67 с V-образным седлом для точного запирания. Он работает в двухпозиционном режиме полностью открыт или закрыт. Изображен на рисунке 2.5. Исполнительный механизм электропривод Fisher FIELDVUE DVC6200 с двусторонним управлением, поддерживающий интеграцию с системами автоматизации, дистанционное управление и расширенную диагностику.



Рисунок 2.5 – Клапан Fisher Vee-Ball с электроприводом Fisher FIELDVUE

В качестве первичного элемента для измерения массового расхода была выбрана классическая трубка Вентури, соответствующая международному стандарту ISO 5167-4. Она обеспечивала измерение перепада давления, который преобразовывался в расход.

Диапазон номинальных диаметров трубки составлял от DN 50 до DN 2000, а диапазон измеряемого расхода от 0,6 до 120000 м³/ч. Максимальная погрешность измерения находилась в пределах 1–2% от рассчитанного значения без калибровки. Преобразователь перепада давления Deltabar обеспечивал выходной сигнал 4–20 мА и поддерживал цифровые протоколы связи HART, PROFIBUS PA и FOUNDATION Fieldbus, что позволило интегрировать прибор в систему автоматизации. Данное сужающее устройство показано на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Трубка вентури deltatop dv61s

Для автоматизации процесса был выбран контроллер Siemens S7-1500, так как он обладает высокой производительностью и встроенными функциями

управления. Благодаря поддержке протокола PROFINET с режимами RT и IRT достигается точная синхронизация и обмен данными в реальном времени. Встроенный ПИД-регулятор обеспечивает стабильное управление параметрами процесса и снижает уровень. Сам ПЛК показан на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 – ПЛК Siemens S7-1500

Контроллер Siemens S7-1500, обладает высокой производительностью и гибкостью конфигурации. Для подключения необходимых датчиков и исполнительных устройств были подобраны соответствующие модули ввода-вывода с учетом технических требований системы.

Пять аналоговых входов, необходимые для подключения датчиков с выходными сигналами 4–20 мА или 0–10 В, обеспечивались модулем аналогового ввода Siemens серии SM 1557 с минимум восемью каналами. Это позволяло не только удовлетворить текущие требования, но и предусмотреть возможность расширения системы в будущем.

Для обработки дискретных сигналов, таких как кнопки и концевые выключатели, был выбран модуль цифрового ввода SM 1557 DI с четырьмя или более каналами, что гарантировало надежное считывание цифровых состояний.

Управление исполнительным устройством с аналоговым входом осуществлялось через модуль аналогового выхода SM 1557 AQ с одним каналом, который обеспечивал подачу управляющего сигнала 4-20 мА или 0-10 В, что позволяло точно регулировать работу, например, клапанов.

Все выбранные модули были интегрированы с центральным процессорным модулем S7-1500 через шину PROFINET, что обеспечивало высокую скорость обмена данными и надежность работы системы.

3 Расчетная часть

3.1 Постановка задачи для синтеза контура управления

Следуя заданию дипломного проекта нужно синтезировать контур автоматического регулирования. Контур регулирования давления нагнетания центробежного компрессора, который изображен на рисунке 3.1.

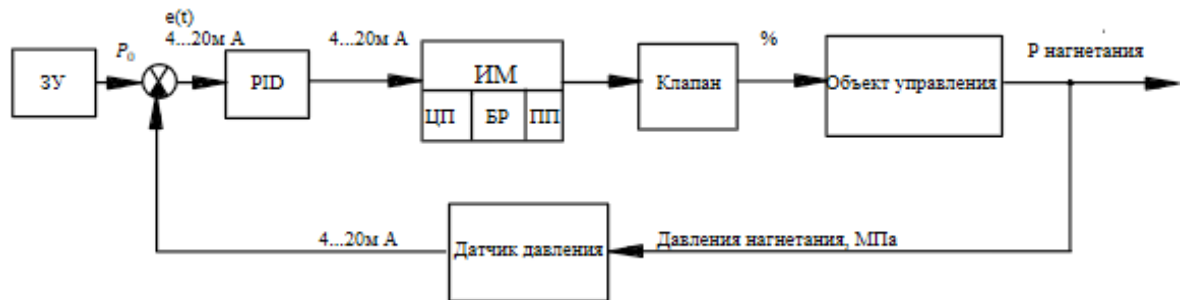


Рисунок 3.1 – Функциональная схема контура регулирования давления нагнетания

Составляющие исполнительного механизма:

- ЦП – цифровой позиционер;
- БР – бустерное реле;
- ПП – пневматический привод;
- ОУ – одноступенчатый центробежный компрессор.

На основе представленного контура регулирования была сформулирована следующая постановка задачи:

Для достижения требуемых показателей качества на основе математической модели замкнутой системы регулирования следует синтезировать типовой регулятор.

Контур должен обеспечивать поддержание заданного значения давления нагнетания при различных режимах работы компрессора. При этом важно учитывать динамику объекта управления и согласованную работу всех компонентов системы: ПИД-регулятора, позиционера, бустерного реле, пневмопривода и регулирующего клапана.

3.2 Анализ динамических свойств системы

Передаточная функция объекта автоматизации представлена ниже.

$$G_c(s) = \frac{K_c}{T_c s + 1} \quad (3.1)$$

где K_C – коэффициент усиления процесса сжатия газа, $K_C=2$;

T_C – Газовая ёмкость, является суммой объёма трубопровода и сжимаемости газа, $T_C=0.5$.

Регулирующий клапан был рассчитан с 100 процентным запасом пропускной способности, а изменениями перепада давления можно пренебречь. Характеристика клапана – линейная, ниже приведены передаточные функции исполнительного механизма с клапаном.

$$G_{CV}(s) = \frac{K_A K_V}{T_A s + 1} \quad (3.2)$$

где K_A – передаточное число исполнительного механизма $K_A=1$;

K_V – проводимость клапана, $K_V=1$;

T_A – инерционность, $T_A=V/(C \cdot P) = 3\text{с}$;

V – объём воздушной камеры;

C – коэффициент расхода;

P – давление.

Измерительный преобразователь давления определяется идеальным интегрирующим звеном.

$$G_T(s) = \frac{K_T}{s} \quad (3.3)$$

где K_T – Коэффициент масштабирования сенсора, $K_T=1$

Чтобы получить итоговую передаточную функцию необходимо найти произведение (3.1), (3.2), (3.3). Ниже представлена итоговая функция системы управления.

$$G(s) = G_C(s) * G_{CV}(s) * G_T(s) = \frac{2}{1.5s^3 + 3.5s^2 + s} \quad (3.4)$$

С помощью получения переходной характеристики замкнутой системы командами представленными на рисунке 3.2, можно сказать что система находится. Переходной процесс замкнутой системы представлен на рисунке 3.3.

```

>> G = feedback(g, 1)      % Closed
G =
      2
-----
1.5 s^3 + 3.5 s^2 + s + 2
Continuous-time transfer function.

>> step(G)
>> pole(G)

ans =
-2.2959 + 0.0000i
-0.0187 + 0.7618i
-0.0187 - 0.7618i

```

Рисунок 3.2 – Команды feedback и pole

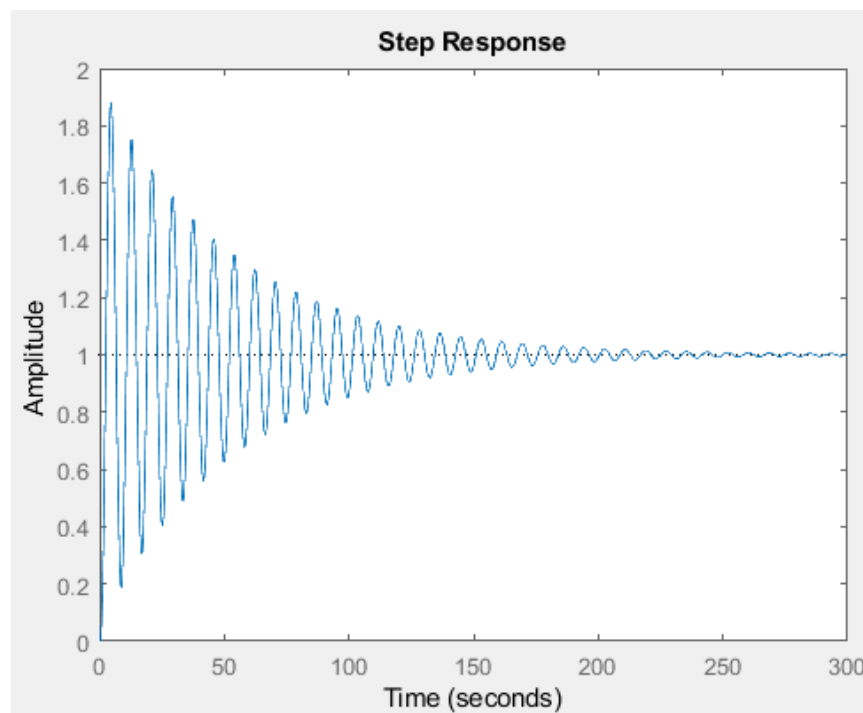


Рисунок 3.3 – Переходной процесс замкнутой системы

Также существуют другие аспекты устойчивости, такие как запас по фазе, и по амплитуде.

Запас по фазе – это величина дополнительного сдвига фазы, который можно добавить к системе на частоте среза усиления прежде, чем она станет неустойчивой, то есть, когда суммарный сдвиг фазы достигнет минус сто восемьдесят градусов. Запас по амплитуде – это максимальное отношение снижения усиления в децибелах которое может выдержать система на частоте среза усиления до наступления неустойчивости, когда усиление достигает единицы ноль децибел. Чем больше данные величины, тем устойчивее система является [6].

На рисунке 3.4 с использованием команды allmargin() были вычислены все возможные запасы устойчивости системы. Система стабильна, но её

устойчивость недостаточно хорошая из-за низких запасов. Это может привести к колебаниям или медленному отклику на изменения.

```
>> allmargin(g)

ans =

    struct with fields:

        GainMargin: 1.1667
        GMFrequency: 0.8165
        PhaseMargin: 3.1204
        PMFrequency: 0.7554
        DelayMargin: 0.0721
        DMFrequency: 0.7554
        Stable: 1
```

Рисунок 3.4 – Запасы устойчивости системы

В таблице 3.1 показаны прямые оценки качества полученные командой stepinfo()

Таблица 3.1 – Прямые оценки качества замкнутой системы

Оценка качества	Значение
Время нарастания, сек	1.476
Время регулирования, сек	195.8053
Перерегулирование, %	87.6067
Время достижения максимума, сек	5.545
Количество колебаний	32
Установившаяся ошибка	0.01

Вывод: на основе анализа переходного процесса замкнутой системы можно сказать, что система обладает быстрым откликом на изменения входного сигнала, с временем нарастания 1.476 секунд, однако процесс стабилизации занимает длительное время, составляющее 195.8053 секунд. Это указывает на необходимость улучшения динамических характеристик системы с помощью типового ПИД-регулятора. Высокое перерегулирование в 87.6067% и значительное количество колебаний говорят о недостаточной устойчивости системы.

3.3 Структурный синтез регулятора

Постановка задачи. Для замкнутой системы управления требуется синтез типового ПИД-регулятора с использованием эмпирических методов подбора коэффициентов, таких как замкнутый метод Циглера-Никольса (ZN2) и метод Тирейса-Люйбена. Необходимо обеспечить, чтобы перерегулирование было сокращено до значения менее 5%, а время стабилизации системы, составляющее 195,8 секунд, было уменьшено до значения не более 10 секунд.

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.5)$$

Перед началом применения этих методов необходимо найти такие параметры системы, как предельный коэффициент передачи K_{crit} , и предельный период колебаний T_{crit} .

ПИД-регулятор переводится в пропорциональный режим, с помощью задания коэффициентов I и D равными нулю. После этого увеличивается усилительный коэффициент до тех пор пока не появятся устойчивые колебания. Эти устойчивые колебания соответствуют состоянию системы на границе устойчивости.

Значение коэффициента усиления при котором появляются эти колебания называется предельным коэффициентом усиления K_{crit} . Он должен быть минимальным, при котором система начнет демонстрировать устойчивые колебания. На рисунке 3.5 показан переходной процесс при $K_{crit}=1.1621$, при котором достигаются устойчивые колебания и предельным периодом колебаний равным $P_{crit} = 7.6$.

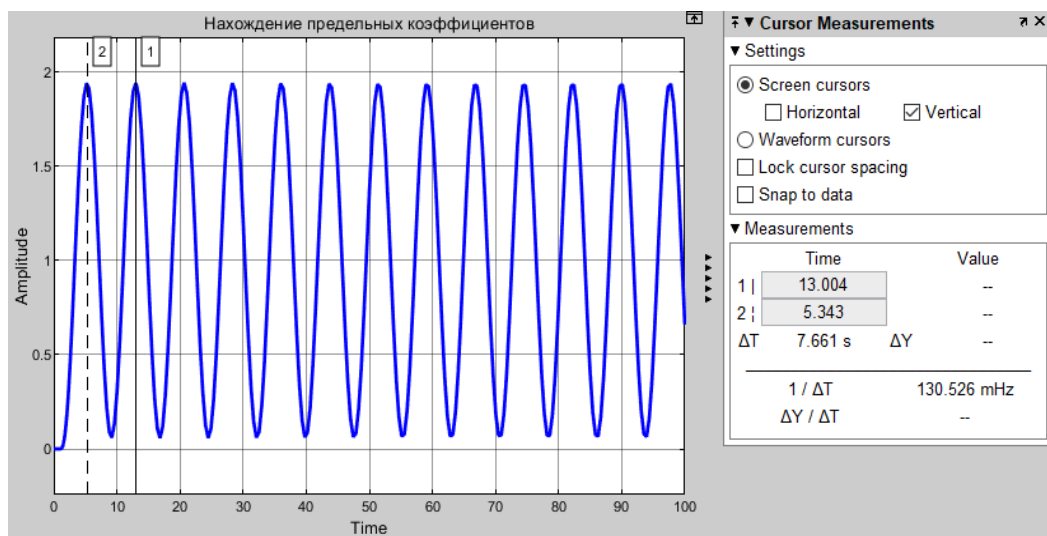


Рисунок 3.5 – Переходной процесс системы с пропорциональным регулятором для нахождения предельных коэффициентов

3.3.1 Замкнутый метод Циглера-Никольса (ZN2)

Данный метод предназначенный для замкнутого контура основан на экспериментах, выполненных на установленной системе управления (реальной или смоделированной). В таблице 3.2 приведены рассчитанные коэффициенты типовых регуляторов.

Таблица 3.2 – Коэффициенты для настройки регулятора по Коэн-Куну

Тип регулятора	K_P	T_i	T_d
P	$0.5 * K_{cr} = 0.58105$	—	—
PI	$0.45 * K_{cr} = 0.523$	$P_{cr}/1.2 = 6.36083$	—
PID	$0.6 * K_{cr} = 0.69726$	$0.5 * P_{cr} = 3.8165$	$P_{cr}/8 = 0.954125$

На рисунках 3.6 и 3.7 представлены собранные модели с различными типами регуляторов и их переходные процессы, реализованные в среде Simulink, что позволяет наглядно сравнить их работу.

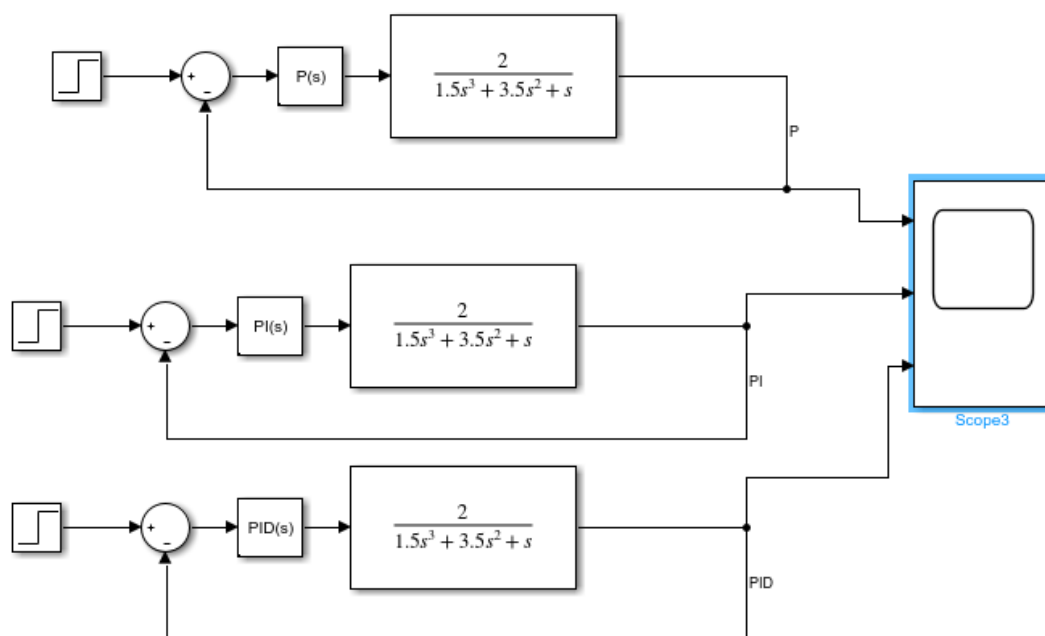


Рисунок 3.6 – Схема собранная в Simulink

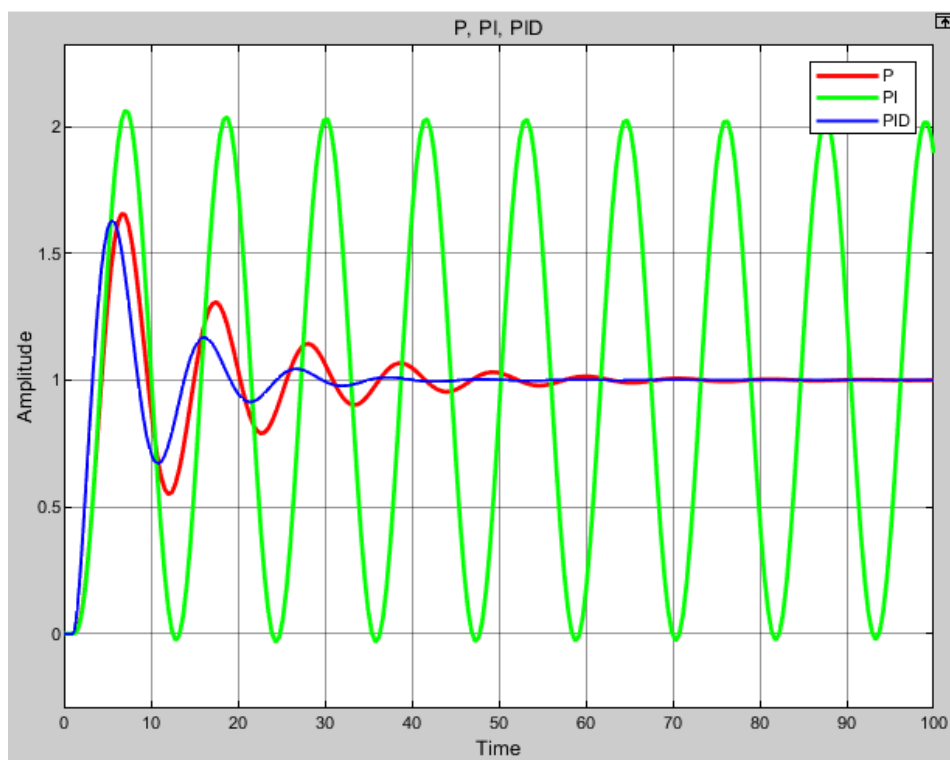


Рисунок 3.7 – Сравнение переходных процессов с разными регуляторами

3.3.2 Модифицированный замкнутый Циглера-Никольса

На рисунке 3.8 показано окно с переходными характеристиками для их сравнения. В таблице 3.3 показаны коэффициенты рассчитанные для настройки ПИД-регуляторов.

Таблица 3.3 – Коэффициенты для настройки регулятора по Чина-Хронеса-Ресквика

Тип регулятора	K_P	T_i	T_d
С перерегулированием	$0.33 * K_{cr} = 0.38209$	$P_{cr}/2 = 3.8165$	$P_{cr}/3 = 2.5644$
Без перерегулирования	$0.2 * K_r = 0.23242$	$P_{cr}/2 = 3.8165$	$P_{cr}/8 = 0.954125$

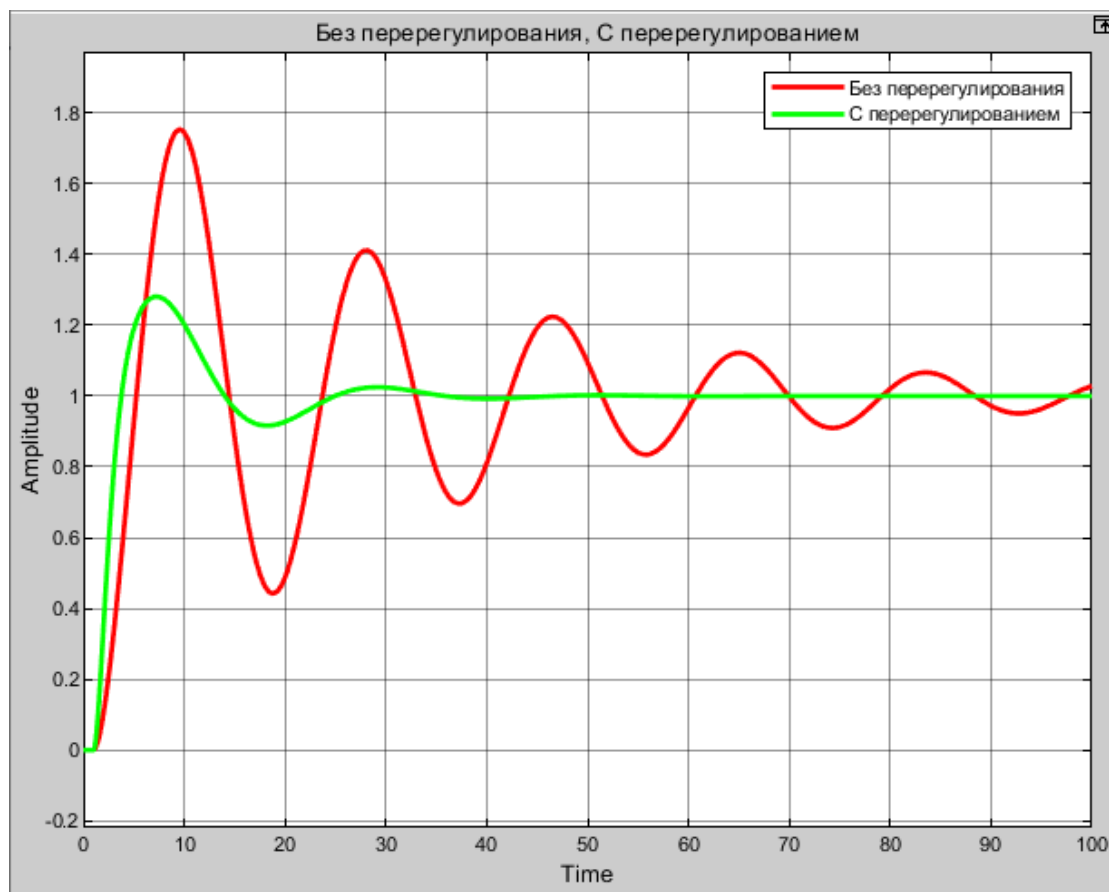


Рисунок 3.8 – Результат моделирования схемы сравнения в Simulink

В таблице 3.4 показаны прямые оценки качества переходных процессов полученных в следствии подбора коэффициентов замкнутыми методом Циглера-Никольса и его модифицированной версии.

Таблица 3.4 – Оценки качества

Оценка качества	Без регулятора	П-регулятор	ПИД-регулятор	С перерег.	Без перерег.
Время нарастания, сек	1.476	1.99	1.5664	1.912	3.02
Время регулирования, сек	195.8053	54.81	32.31	30.9	97
Перерегулирование, %	87.6067	65.66	63.1897	28.08	69
Время достижения максимума, сек	5.545	6.156	5.041	6.554	8.9
Количество колебаний	32	6	4	1	6
Установившаяся ошибка	0.01	0	0	0	0

Вывод: по результатам, приведенным в таблице, можно отметить, что переход от неуправляемой системы к системе с регуляторами, настроенными по второму (замкнутому) методу Циглера–Никольса и его модифицированным версиям, улучшает динамику. Без регулятора процесс характеризуется длительным временем регулирования почти 196 с, высоким перерегулированием 88 % и большим числом колебаний 32. Настройка П- и ПИД-регуляторов по классическому данным методам позволяет существенно сократить время регулирования (до 55 с и 32 с соответственно) и снизить количество колебаний, однако перерегулирование остаётся высоким: около 65.66 % для П- и 63 % для ПИД-регулятора. Модифицированные коэффициенты «с перерегулированием» дают наилучшую динамику: время регулирования снижается до 31 с, перерегулирование падает до 28 %, а число колебаний уменьшается до одного, сохраняя нулевую установившуюся ошибку.

Следует отметить, при настройке ПИ-регулятора по замкнутому методу Циглера–Никольса привела к резким колебаниям и неприемлемо большому перерегулированию, поэтому такие результаты в таблицу не включались.

3.3.3 Метод Тиреуса-Люйбена

Метод Тиреуса-Люйбена являются схожим с методом Циглера-Никольса для замкнутого контура. Процесс нахождения предельных коэффициентов одинаков для обоих методов. На таблице 3.5 показаны рассчитанные коэффициенты ПИ- и ПИД-регуляторов по данному методу. На картинке 3.9 изображено окно с переходными процессами [7].

Таблица 3.5 – Коэффициенты для настройки регулятора по Тиреуса-Люйбена

Тип регулятора	K_p	T_i	T_d
PI	$K_{cr}/3.2=0.36315625$	$P_{cr}*2.2=16.7926$	—
PID	$K_{cr}/2.2=0.528227$	$P_{cr}*2.2=16.7926$	$P_{cr}/6.3=1.211587$

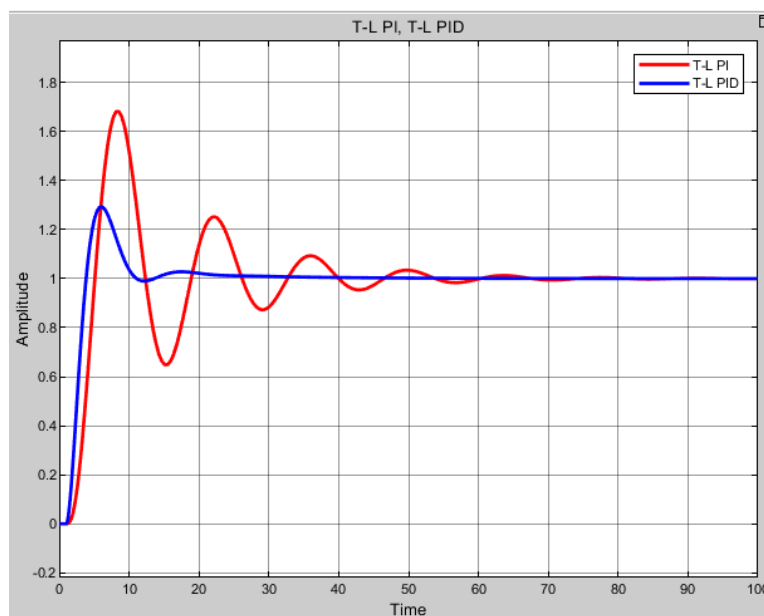


Рисунок 3.9 – Переходной процесс методом Тиреуса-Люйбена

В результате сравнения переходных процессов полученных данными методами, подходящими оказались ПИД-регуляторы настроенные по Тиреусу-Люйбену и модифицированным ZN2 “с перерегулированием”. Путем ручной доработки данных методов, лучшим оказался модифицированный, так как он хорошо реагировал на уменьшение интегрального коэффициента I ($I = 1/T_i$). Ниже показаны на рисунке 3.10 итоговые коэффициенты.

Controller parameters

Source:

Proportional (P):

Integral (I):

Derivative (D):

☒ Use filtered derivative

Filter coefficient (N):

Рисунок 3.10 – Коэффициенты доработанного модифицированного метода

На рисунке 3.11 изображены переходные процессы для сравнения ПИД-регуляторов.

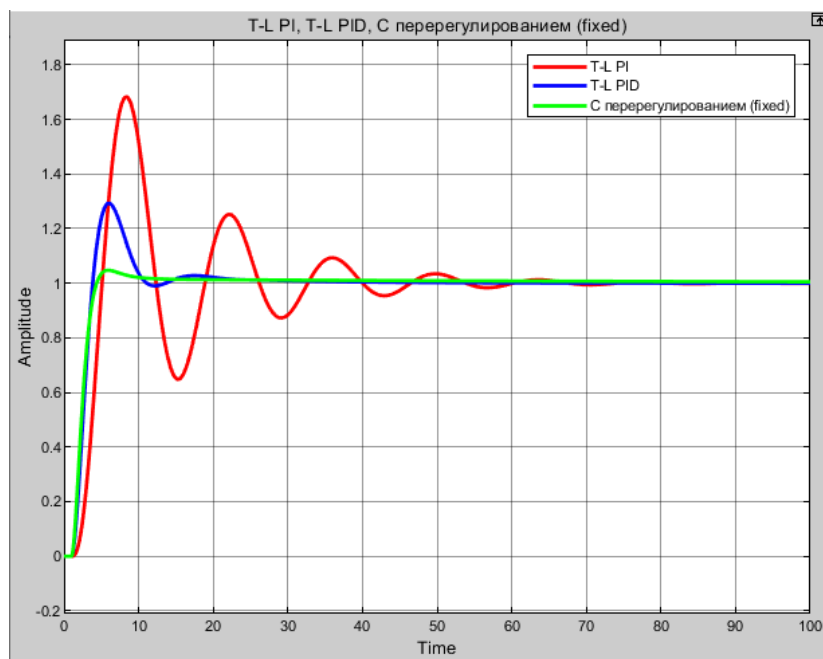


Рисунок 3.11 – Итоговое сравнение трех переходных процессов

В таблице 3.6 один приведены прямые оценки качества для сравнения ПИД регуляторов настроенных всеми методами выше.

Таблица 3.6 – Сравнение оценок всех ПИД-регуляторов

Оценка качества	Без регулятора	ZN2 PID	TL PID	Модифиц. ZN2 доработанный
Время нарастания, сек	1.476	1.5664	1.9776	2.1765
Время регулирования, сек	195.8053	32.31	19.98	8.5736
Перерегулирование, %	87.6067	63.1897	29.36	4.2345
Время достижения максимума, сек	5.545	5.041	5.4429	5.443
Количество колебаний	32	4	3	0
Установившаяся ошибка	0.01	0	0	0

Вывод: при применении стандартного метода Циглера-Никольса (ZN2) время регулирования значительно уменьшается до 32.31 секунд, и перерегулирование снижается до 63.1897%. Время нарастания также увеличивается до 1.5664 секунд, а количество колебаний сокращается до 4.

Метод Тиреуса-Люйбена (TL) даёт ещё более улучшенные результаты: время регулирования снижается до 19.98 секунд, а перерегулирование — до 29.36%. Время нарастания увеличивается до 1.9776 секунд, но количество колебаний сокращается до 3, и установившаяся ошибка остаётся на нуле. Эти результаты указывают на улучшение стабильности и снижение колебаний по сравнению с методом Циглера-Никольса.

Модифицированный метод Циглера-Никольса (fixed ZN2) с увеличением времени интегральной части (уменьшением интегрального коэффициента) приводит к значительным улучшениям. Время регулирования сокращается до 8.5736 секунд, перерегулирование до 4.2345%. Время нарастания остается на уровне 2.1765 секунд, количество колебаний снижается до нуля, а установившаяся ошибка равна нулю. Это показывает, что увеличение времени интегральной части помогает уменьшить перерегулирование и добиться более стабильной работы системы с нулевой установившейся ошибкой.

Таким образом, ручная доработка модифицированного ZN2, с помощью увеличения времени интегральной части является лучшей для минимизации перерегулирования, сокращения времени регулирования и стабилизации системы, обеспечивая её точную работу с нулевой установившейся ошибкой.

Идеальный закон ПИД регулятора с коэффициентами доработанного модифицированного ZN2 “с перерегулированием” представлен ниже. Также на рисунке 3.12 показан переходной процесс при заданной уставке 6 в блоке step, что соответствует 6 МПа.

$$u(t) = 0.38209 \left(e(t) + \frac{1}{89.27} \int_0^t e(t) dt + 2.5644 \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.6)$$

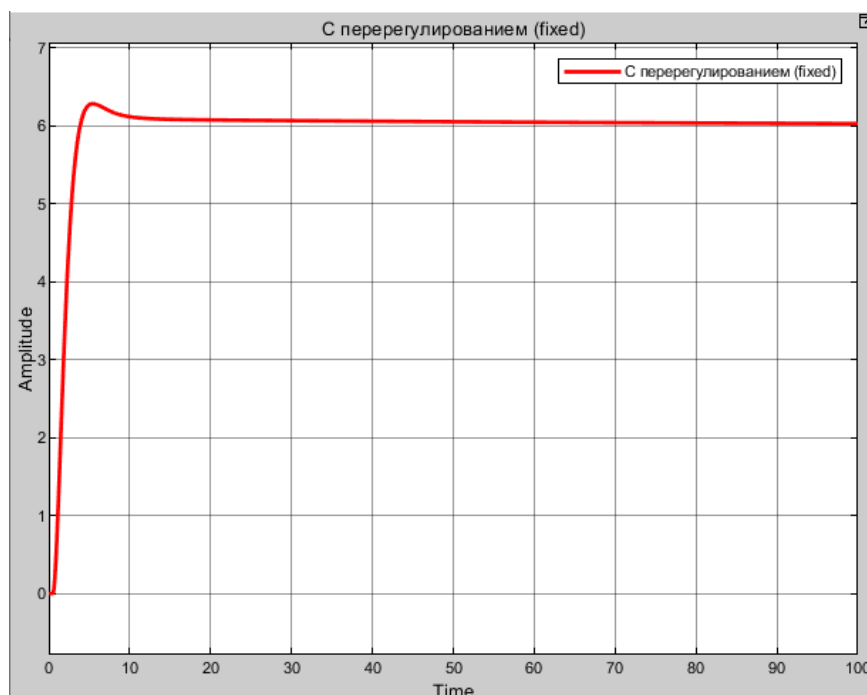


Рисунок 3.11 – Итоговое сравнение трех переходных процессов

4 Синтез системы программного управления

4.1 Разработка блок схемы алгоритма управления

Блок-схема алгоритма разрабатывалась для управления давлением нагнетания центробежного компрессора. Алгоритм Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 4.1. В данной схеме используется параметр помпажа из формулы 1.3.

Этот алгоритм обеспечивает плавный запуск компрессора, контроль давления и предотвращение помпажа или перегрузки через регулировку клапанов на всасе и рециркуляции газа. Состояние рециркуляционного клапана в отличии от клапана на всасывании либо открыт, либо закрыт.

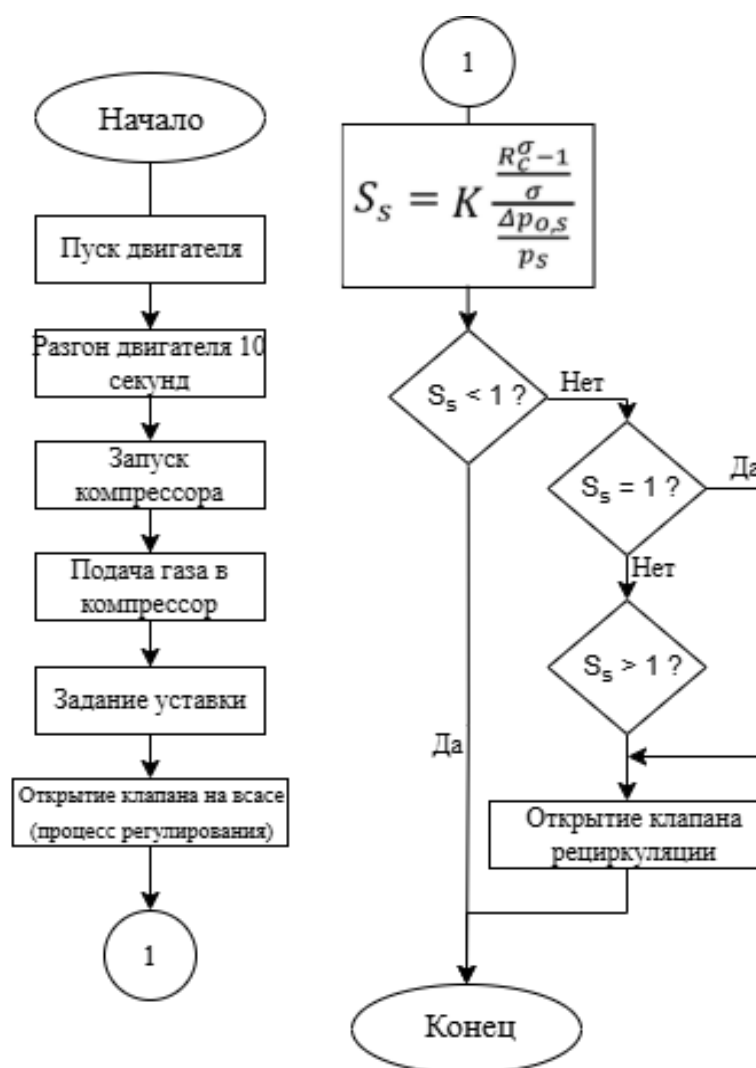


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма управления антипомпажем

4.2 Разработка антипомпажного программного управления в среде TIA-Portal

Перед началом разработки программы на выбранных языках программирования необходимо провести предварительную конфигурацию программируемого логического контроллера. Этот этап включает в себя подбор и подключение необходимых модулей ввода и вывода, ЦПУ самого ПЛК, а также их корректную конфигурацию. Конфигурация изображена на рисунке 4.2.

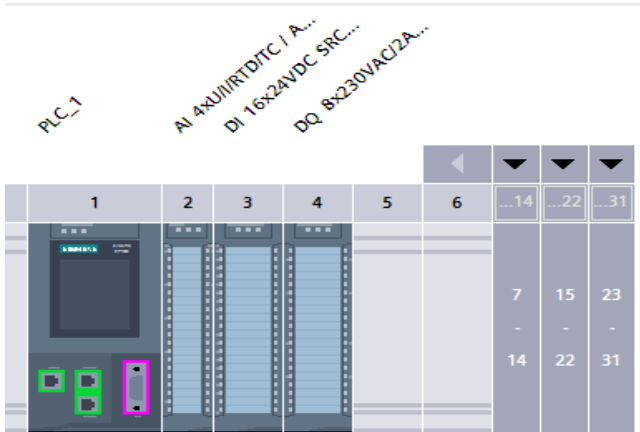


Рисунок 4.2 – ПЛК и модули ввода, вывода

После конфигурации, нужно объявить все необходимые теги в таблице тегов. Теги представляют собой обозначения, которые используются для идентификации различных входных и выходных сигналов, переменных, внутренних параметров и других элементов программы. Теги на рисунке 4.3.

Default tag table								
	Name	Data type	Address	Retain	Access...	Write...	Visibl...	Monitor value
1	ON	Bool	%MD.0		☒	☒	☒	TRUE
2	OFF	Bool	%MD.1		☒	☒	☒	FALSE
3	O_L	Bool	%MD.2		☒	☒	☒	FALSE
4	Delta	Bool	%MD.3		☒	☒	☒	TRUE
5	Star	Bool	%MD.4		☒	☒	☒	FALSE
6	Main_cont	Bool	%MD.5		☒	☒	☒	TRUE
7	START	Bool	%MD.6		☒	☒	☒	TRUE
8	Centrifugal_compressor	Bool	%MD.7		☒	☒	☒	TRUE
9	pressure_sensor	Dint	%ID0		☒	☒	☒	0
10	Actual_discharge_pressure	Real	%MD2		☒	☒	☒	0.0
11	flowmeter	Dint	%ID4		☒	☒	☒	0
12	Actual_flow	Real	%MD6		☒	☒	☒	0.0
13	PID_output_per	Real	%MD10		☒	☒	☒	11806.0
14	suction_valve	Real	%QD0		☒	☒	☒	0.0
15	pressure_hmi	Real	%MD14		☒	☒	☒	3.415992
16	flow_hmi	Real	%MD18		☒	☒	☒	384.299
17	pid_ON	Bool	%M1.0		☒	☒	☒	TRUE
18	setpoint	Real	%MD22		☒	☒	☒	7.0
19	PID_Out	Real	%MD26		☒	☒	☒	42.69989
20	Surge_parameter	Real	%MD30		☒	☒	☒	16#7FC0_0000
21	temperature_sensor	Dint	%ID8		☒	☒	☒	0
22	Actual_suction_temperature	Real	%MD34		☒	☒	☒	0.0
23	temperature_sensor2	Dint	%ID12		☒	☒	☒	0
24	Actual_discharge_temp	Real	%MD38		☒	☒	☒	0.0
25	pressure_sen2	Dint	%ID16		☒	☒	☒	0
26	actual_suction_pres	Real	%MD42		☒	☒	☒	0.0
27	delta_ps	Real	%MD46		☒	☒	☒	0.0
28	Recycle_valve	Bool	%M1.1		☒	☒	☒	FALSE
29	Alarm	Word	%MW1		☒	☒	☒	16#0100

Рисунок 4.3 – Список объявленных тегов в таблице

Регулирование давления происходит при постоянной частоте вращения двигателя который является приводом центробежного компрессора, из отсутствия необходимости менять частоту, вместо частотного преобразователя, для пуска была выбрана схема «звезда-треугольник».

Схема подключения «звезда-треугольник» снижает пусковой ток и механические нагрузки при запуске электродвигателя, обеспечивая плавный старт, и уменьшение влияния на электросеть.

Логика такой схемы реализована в FB блоке, и затем вызвана OB1, на рисунке 4.4 изображена логика, на рисунке 4.5 изображен экземпляр FB блока с таймером TON на 10 секунд, который нужен для разгона электродвигателя.

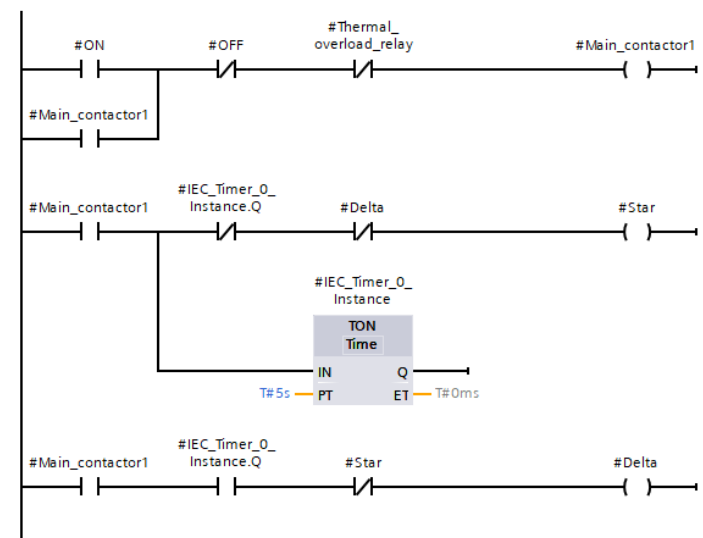


Рисунок 4.4 – Логика пуска электродвигателя по схеме «звезда-треугольник»

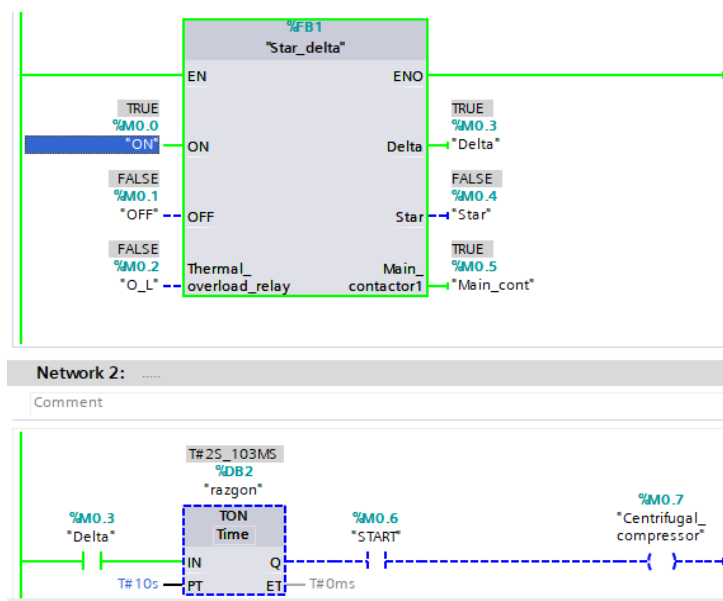


Рисунок 4.5 – Экземпляр FB блока с таймером на 10 секунд

На рисунке 4.6 изображен экземпляр блока FC в OB1, который является продолжением кода выше. Данный блок запускается при попадании единичного сигнала от тега связанный с компрессором, который в свою очередь менял состояние при нажатии кнопки START. На рисунке 4.7 изображена код блока FC на языке SCL, который рассчитывает параметр помпажа по входным значениям получаемым от датчиков. Внутри блока FC объявлены входные и выходные теги, которые связаны с глобальными тегами.

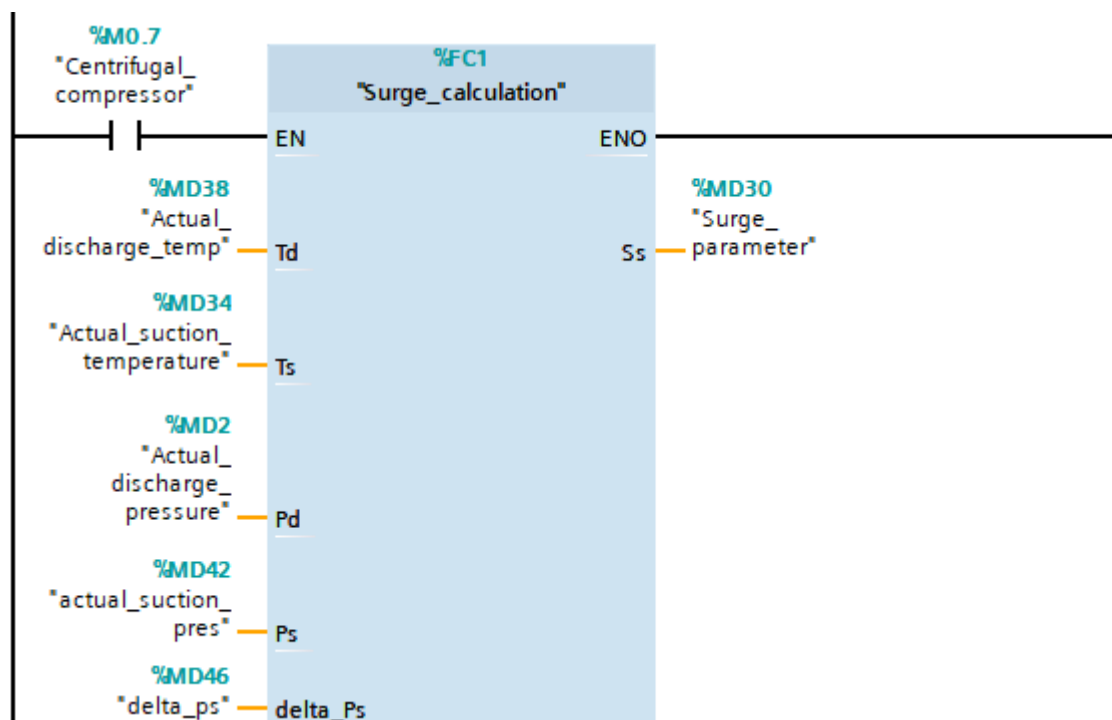


Рисунок 4.6 – Экземпляр блока FC расчета параметра помпажа

```

1 // Сжатие газа
2 #Rc := #Pd / #Ps;
3
4 // Показатель политропического сжатия
5 #Sigma := LN(#Td / #Ts) / LN(#Pd / #Ps);
6 // Параметр помпажа
7 #Ss := (((#Rc ** #Sigma) - 1) / #Sigma) * (#Ps / #delta_Ps);

```

Рисунок 4.7 – Код на языке SCL для расчета параметра помпажа

На рисунках 4.8, 4.9, 4.10 изображен аналоговая обработка входных и выходных сигналов, обработка происходит за счет блоков SCALE_X и NORM_X, они масштабируют сигналы поступающие с датчиков, а также обрабатывают сигнал поступающий на клапан на всасывании. Аналоговая обработка реализована в отдельном блоке FB.

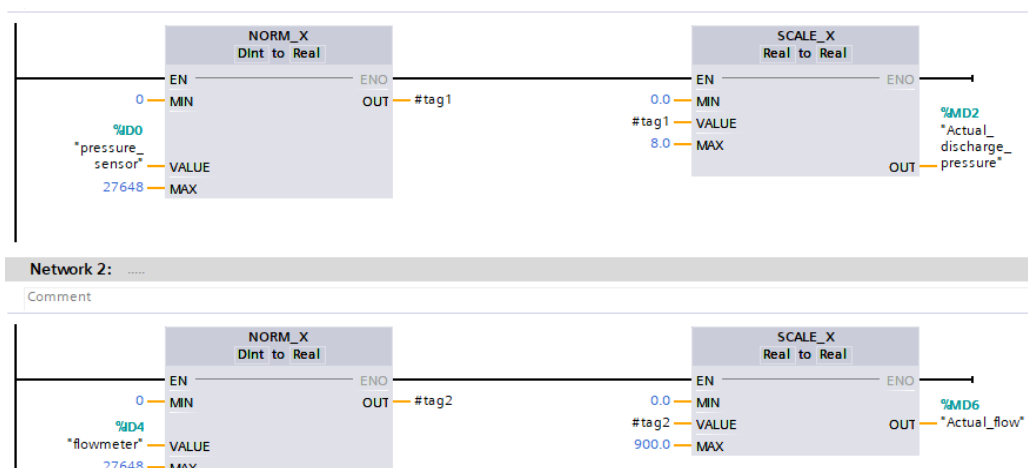


Рисунок 4.8 – Обработка датчиков давления нагнетания и расхода

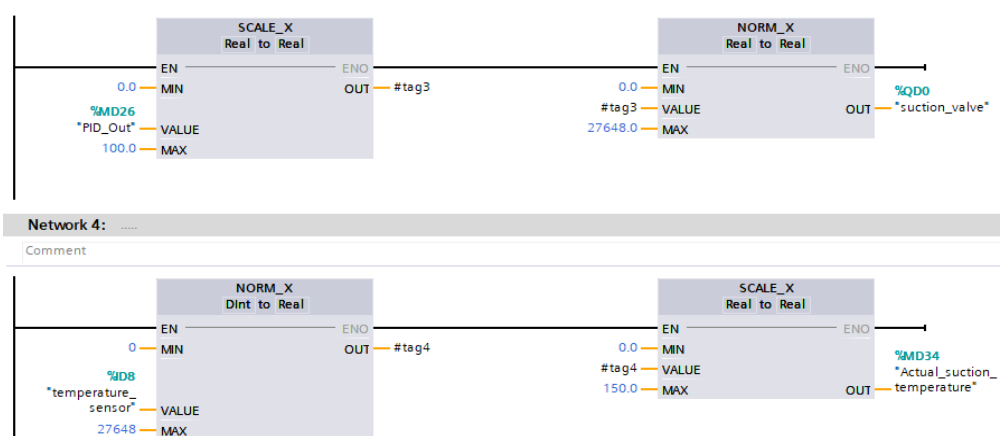


Рисунок 4.9 – Обработка выходного сигнала на клапан всаса и датчика температуры на всасе

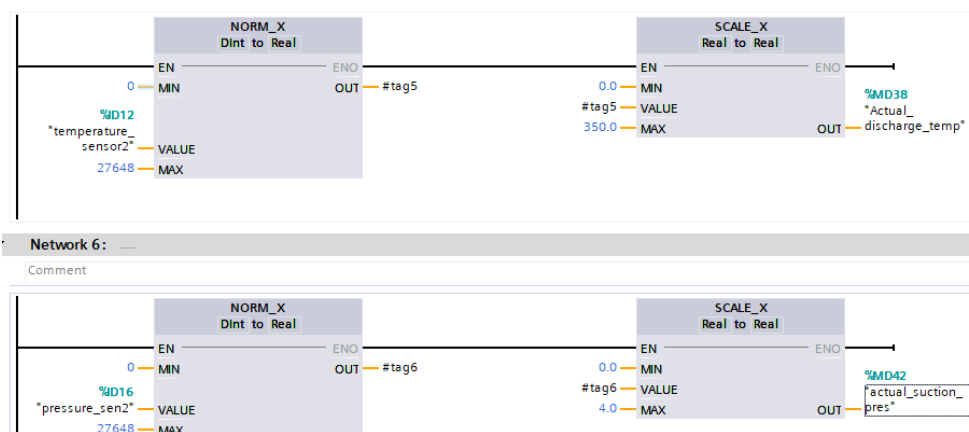


Рисунок 4.10 – Обработка датчика температуры на нагнетнии и давления на всасывании

На рисунке 4.11 изображено продолжение логики в OB1. На рисунке 4.12 показан ПИД-регулятор, его размещают в OB30, потому что он выполняется с фиксированным интервалом времени, что необходимо для стабильной и точной работы регулятора.

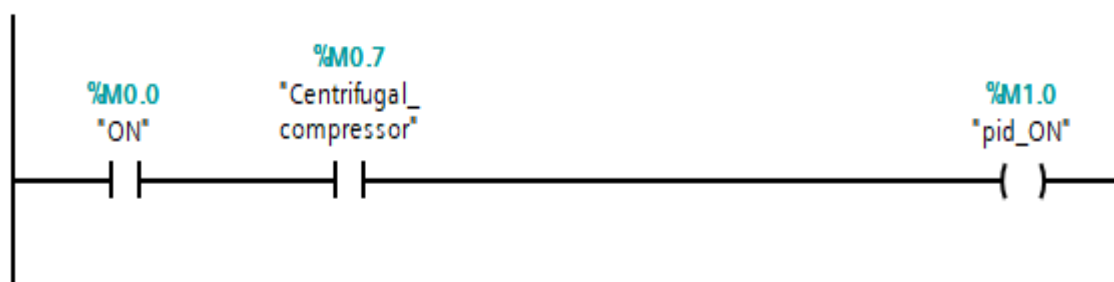


Рисунок 4.11 – Логика регулирования давления нагнетания

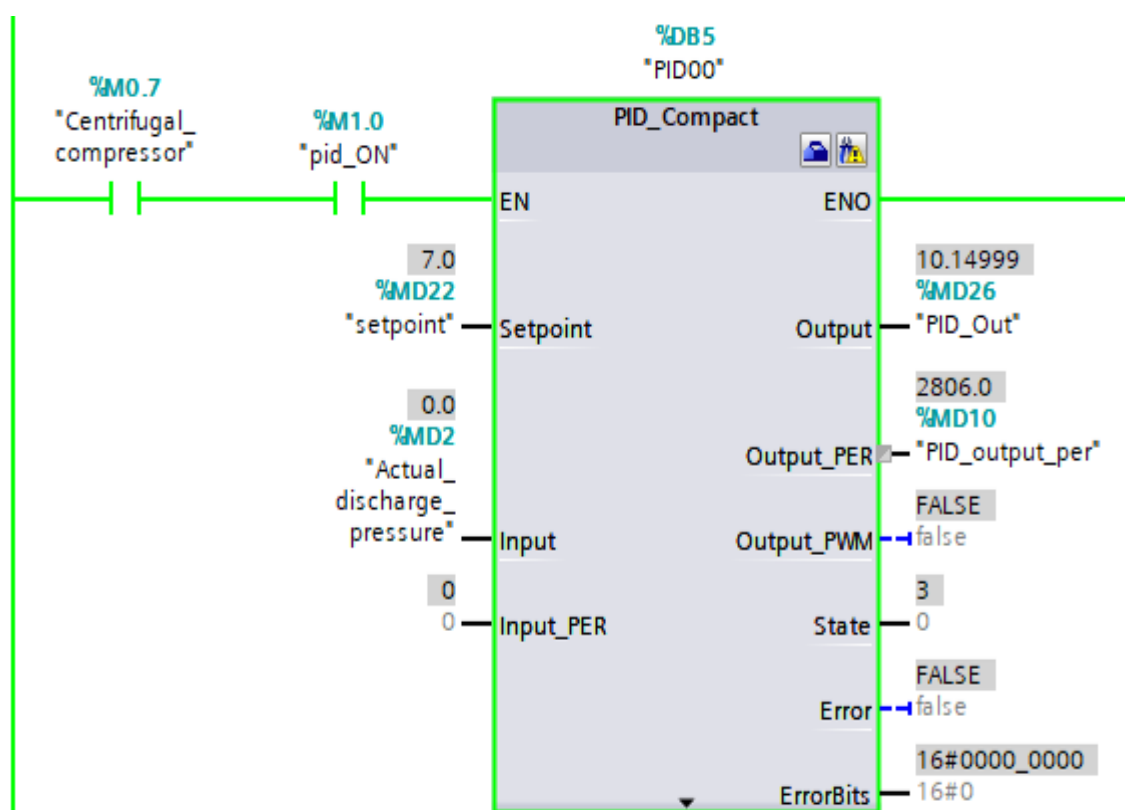
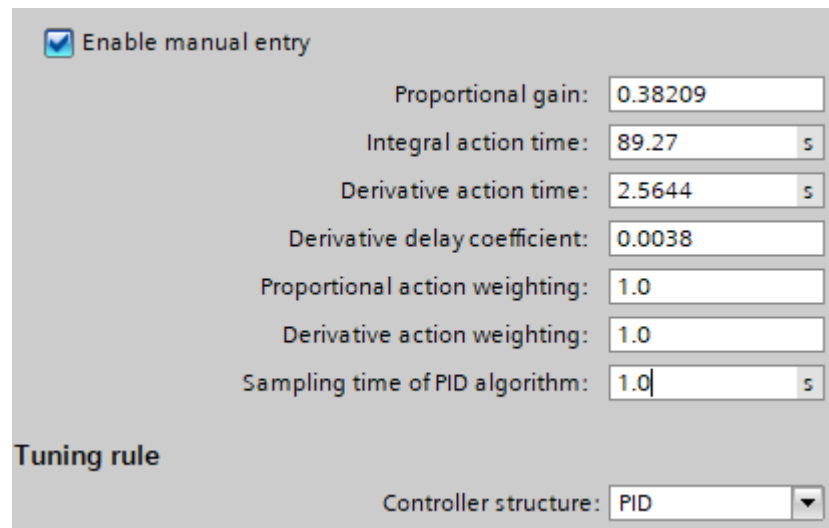


Рисунок 4.12 – ПИД-регулятор в режиме мониторинга

Ниже на рисунке 4.13 приведены коэффициенты ПИД-регулятора полученные в расчетной части путем доработки эмпирического метода настройки.



Рисунк 4.13 – Окно настройки ПИД-регулятора в TIA Portal с коэффициентами из расчетной части

На рисунке 4.14 показана логика при которой клапан рециркуляции должен открываться на 10 секунд, далее с помощью таймера состояние этого клапана сбрасывается. Когда параметр помпажа либо равен , либо больше 1, сигнал подается на клапан. Данный параметр помпажа рассчитывается в FC блоке, который показан выше.

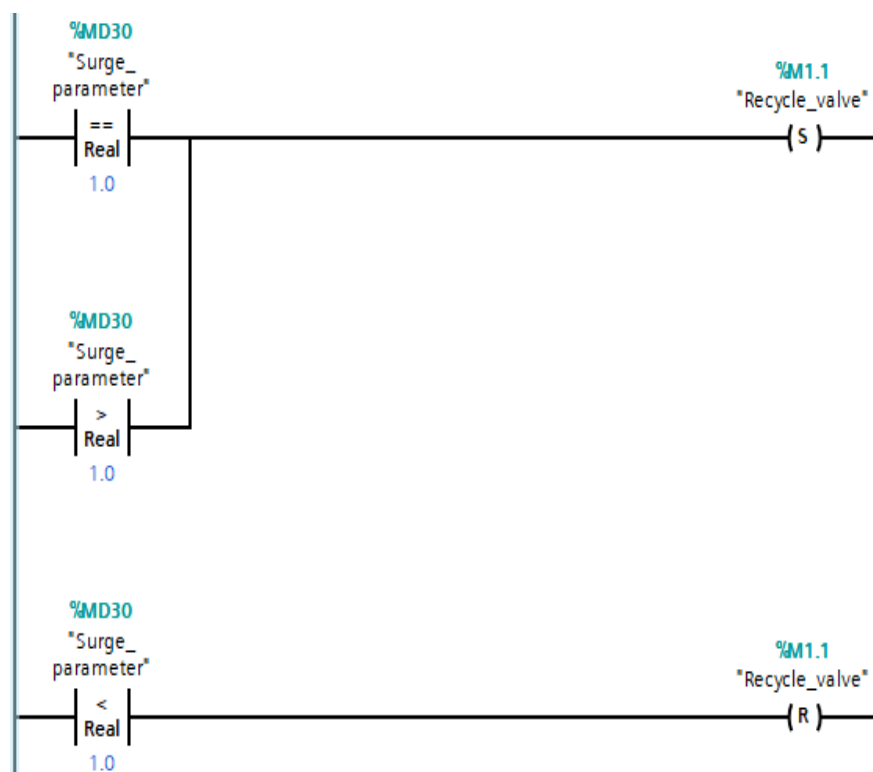


Рисунок 4.14 – Логика открытия и закрытия клапана рециркуляции

Для аварии была реализованна логика на рисунке 4.15, где значения записываются в тег с типом данных Word, который нужен для дальнейшего использования в HMI Alarms. При открытом клапане и условии связанным с параметром помажа, значения записываются в нулевой и первый бит тега Alarm соответственно.

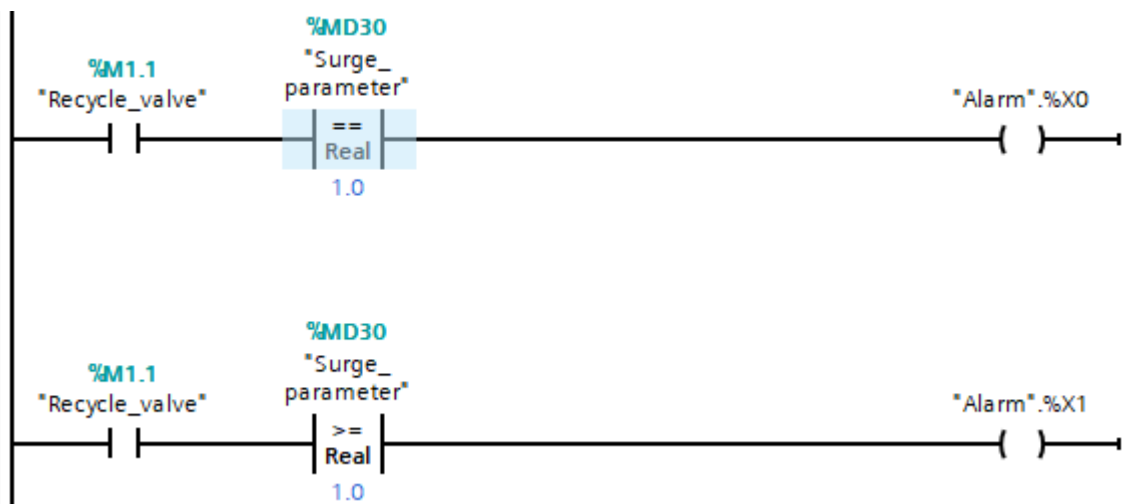


Рисунок 4.15 – Логика аварии

4.3 Разработка SCADA системы для антипомпажного регулирования давления центробежного компрессора

Перед началом разработки SCADA-системы необходимо выполнить базовую конфигурацию соединения между контроллером и интерфейсом визуализации. В рамках данной работы используется WinCC RT Advanced, встроенный в TIA Portal, который обеспечивает создание графического интерфейса и отображение данных в реальном времени.

Первым шагом является настройка сетевого взаимодействия между ПЛК и системой визуализации. Для этого в проект необходимо добавить коммуникационный модуль CP Industrial Ethernet (CP IE), который позволяет организовать обмен данными по сети. Этот модуль обеспечивает передачу технологических переменных от контроллера к SCADA и обратно, что необходимо для отображения параметров, сигналов и команд управления в режиме реального времени. На рисунке 4.16 приведено соединение ПЛК с PC-Systmes.

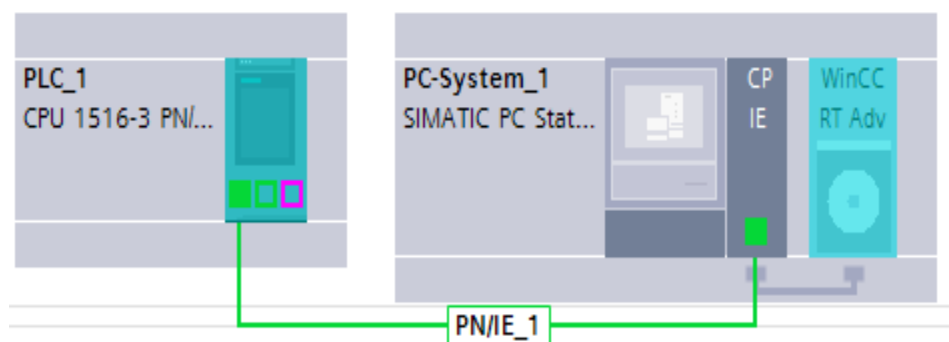


Рисунок 4.16 – Код на языке SCL для расчета параметра помпажа

Для корректной работы SCADA-системы необходимо связать теги HMI с тегами в ПЛК. На рисунке 4.17 изображен список связанных тегов.

Name	Data type	Connection	PLC name	PLC tag
Actual_discharge_pressure	Real	HMI_Connection...	PLC_1	Actual_discharge_pressur
Actual_flow	Real	HMI_Connection...	PLC_1	Actual_flow
Alarm	Word	HMI_Connection...	PLC_1	Alarm
Centrifugal_compressor	Bool	HMI_Connection...	PLC_1	Centrifugal_compressor
Delta	Bool	HMI_Connection...	PLC_1	Delta
flow_hmi	Real	HMI_Connection...	PLC_1	flow_hmi
OFF	Bool	HMI_Connection...	PLC_1	OFF
ON	Bool	HMI_Connection...	PLC_1	ON
pid_ON	Bool	HMI_Connection...	PLC_1	pid_ON
PID_Out	Real	HMI_Connection...	PLC_1	PID_Out
PID_output_per	Real	HMI_Connection...	PLC_1	PID_output_per
PID_Retain_CtrlParams_Gain	Real	HMI_Connection...	PLC_1	PID00.Retain.CtrlParams....
PID_Retain_CtrlParams_Td	Real	HMI_Connection...	PLC_1	PID00.Retain.CtrlParams.Td
PID_Retain_CtrlParams_TdFiltRa...	Real	HMI_Connection...	PLC_1	PID00.Retain.CtrlParams....
PID_Retain_CtrlParams_Ti	Real	HMI_Connection...	PLC_1	PID00.Retain.CtrlParams.Ti
pressure_hmi	Real	HMI_Connection...	PLC_1	pressure_hmi
razgon_ET	Time	HMI_Connection...	PLC_1	razgon.ET
razgon_Q	Bool	HMI_Connection...	PLC_1	razgon.Q
Recycle_valve	Bool	HMI_Connection...	PLC_1	Recycle_valve
setpoint	Real	HMI_Connection...	PLC_1	setpoint
Star	Bool	HMI_Connection...	PLC_1	Star
START	Bool	HMI_Connection...	PLC_1	START

Рисунок 4.17 – Список связанных HMI тегов

В разработанной SCADA-системе реализован интерфейс управления пуском электродвигателя и регулирования давления с визуальной индикацией этапов работы. При нажатии кнопки ON осуществляется запуск электродвигателя. Сразу после пуска над двигателем появляется текстовая схема, отображающая последовательность запуска. Через 5 секунд схема автоматически изменяется на надпись Delta, которая остаётся отображённой, указывая на текущий режим.

Одновременно с этим над двигателем появляется надпись Acceleration, обозначающая фазу разгона. Рядом размещён таймер, который ведёт обратный отсчёт от 0 до 10000 миллисекунд, визуализируя время разгона.

После завершения этого периода в нижней части экрана появляются дополнительные кнопки Старт, PID Авто, Тренд и Журнал. Кнопка Старт запускает основной процесс, при этом пользователь вручную задаёт уставку давления.

По нажатию кнопки PID Авто с правой стороны экрана на треть его ширины разворачивается встроенный слайд-экран (SlideScreen Right), на котором отображается интерфейс ПИД-регулятора. С его помощью оператор может управлять давлением на выходе компрессора в автоматическом режиме. Что показано на рисунке 4.18.

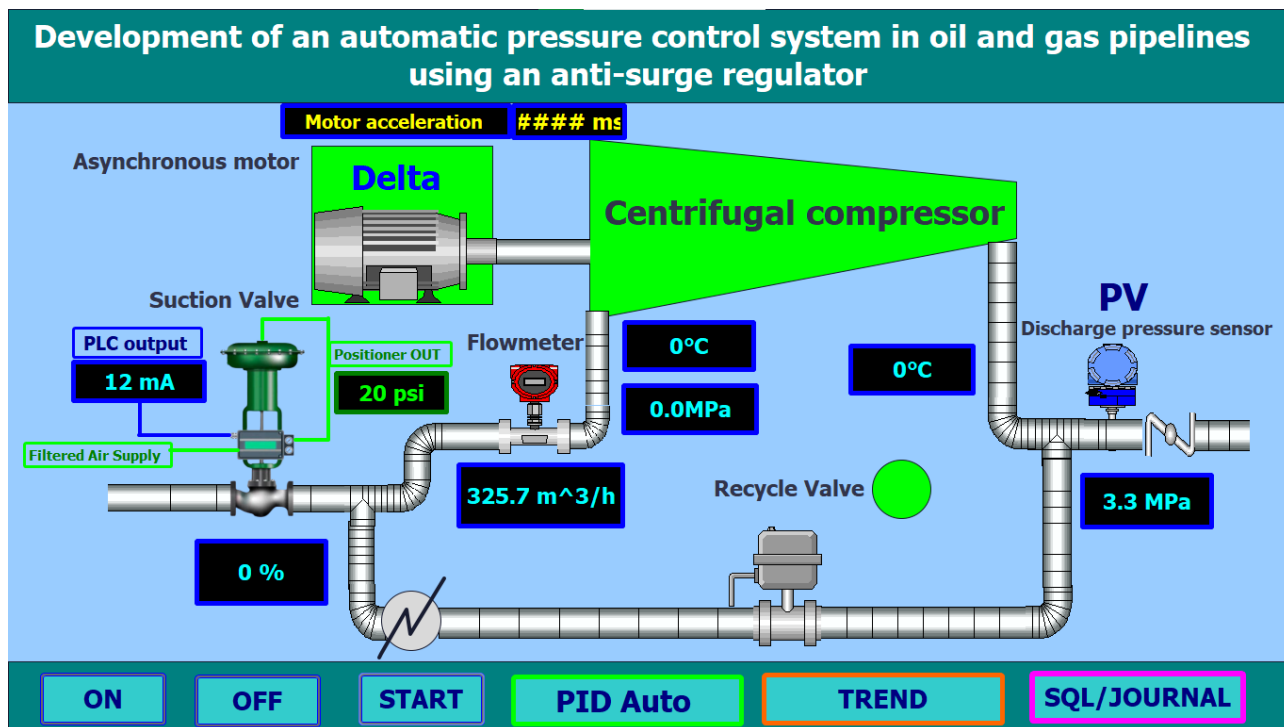


Рисунок 4.18 – Код на языке SCL для расчета параметра помпажа

На рисунке 4.19 изображены тренды, где слева показано давление, справа расход.

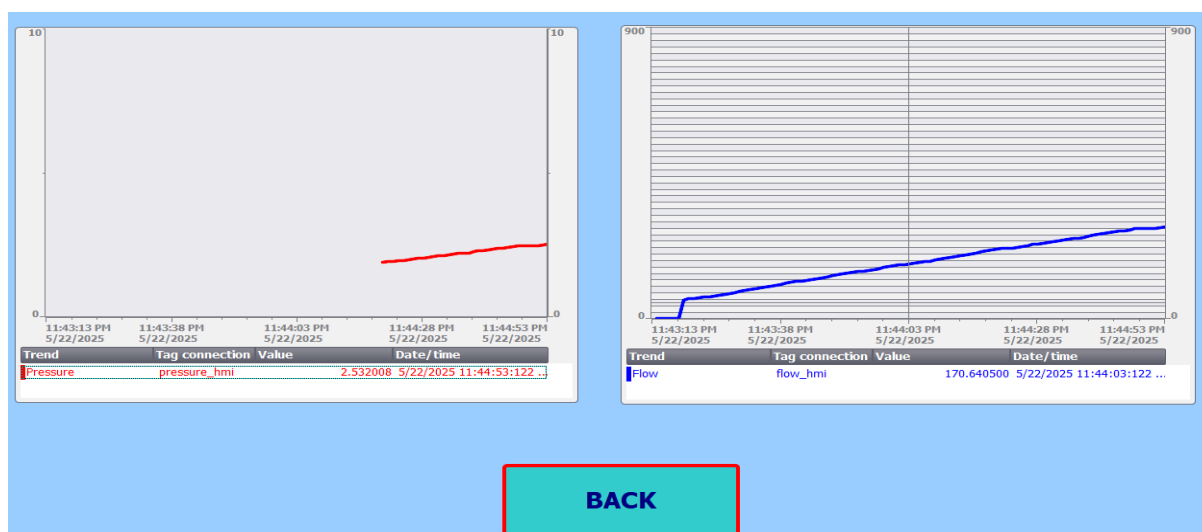


Рисунок 4.19 – Тренды расположенные в отдельном окне

По нажатию кнопки Тренд оператор переходит в окно, где отображаются два графика, один с динамикой давления, другой с динамикой расхода, что позволяет одновременно контролировать оба параметра в реальном времени. На рисунке 4.20 изображено окно ввода уставки давления нагнетания

PID settings

Setpoint : 6 MPa

Actual pressure : 0.0 MPa

Output Value : 1808

Рисунок 4.20 – Окно настроек ПИД-регулятора

При нажатии кнопки Журнал открывается окно журнала аварий и событий. Здесь осуществляется настройка классов аварий, которые будут отображаться, а также выбор буфера Alarm Buffer, который отвечает за сохранение всех зарегистрированных аварий. Для конфигурации аварий и событий используется отдельная папка HMI Alarms.

Для отображения и управления состояниями аварий используется тег Alarm, в который побитно записываются состояния различных аварийных сигналов(рисунок). На рисунке 4.21 представлен окно конфигурации в HMI Alarms, также на рисунке 4.22 изображен журнал с сообщениями об авариях и предупреждениях.

Discrete alarms							
	ID	Name	Alarm text	Alarm class	Trigger tag	Trigge..	Trigger address
	1	Warning	Рабочая точка на границе помпажа	Acknowle...	Alarm	0	Alarm.x0
	2	Alarm	РАБОЧАЯ ТОЧКА В ЗОНЕ	No Acknowle...	Alarm	1	Alarm.x1

Рисунок 4.21 – Окно конфигурации аварий в HMI alarms

В процессе тестирования системы автоматизации была проведена проверка работы аварийных сообщений, связанных с контролем зоны помпажа компрессора. Для этого в журнале тревог искусственно инициировались сигналы "Рабочая точка на границе помпажа" и "РАБОЧАЯ ТОЧКА В ЗОНЕ ПОМПАЖА", что позволило убедиться в корректности срабатывания предусмотренных тревог и предупреждений.

No.	Time	Date	Status	Text	Acknowledge group
NA 2	1:03:07 AM	5/23/2025	(I)O	РАБОЧАЯ ТОЧКА В ЗОНЕ ПОМПАЖА	0
A 1	1:03:07 AM	5/23/2025	(I)O	Рабочая точка на границе помпажа	0
NA 2	1:02:25 AM	5/23/2025	I	РАБОЧАЯ ТОЧКА В ЗОНЕ ПОМПАЖА	0
A 1	1:02:25 AM	5/23/2025	I	Рабочая точка на границе помпажа	0
NA 35	12:43:36 AM	5/23/2025	(I)O	CPU status message: CPU not in RUN Current CPU opera...	0
NA 35	12:43:35 AM	5/23/2025	I	CPU status message: CPU not in RUN Current CPU opera...	0

Рисунок 4.22 – Журнал с сообщениями об аварии и предупреждении

4.4 Связь SCADA системы с SQL сервером

Для организации связи с SQL сервером в проекте используется технология ODBC. В рамках этой связи в ODBC создаётся источник данных (DSN) с именем *diplom*, как показано на рисунке 4.23, который служит интерфейсом для подключения к базе данных

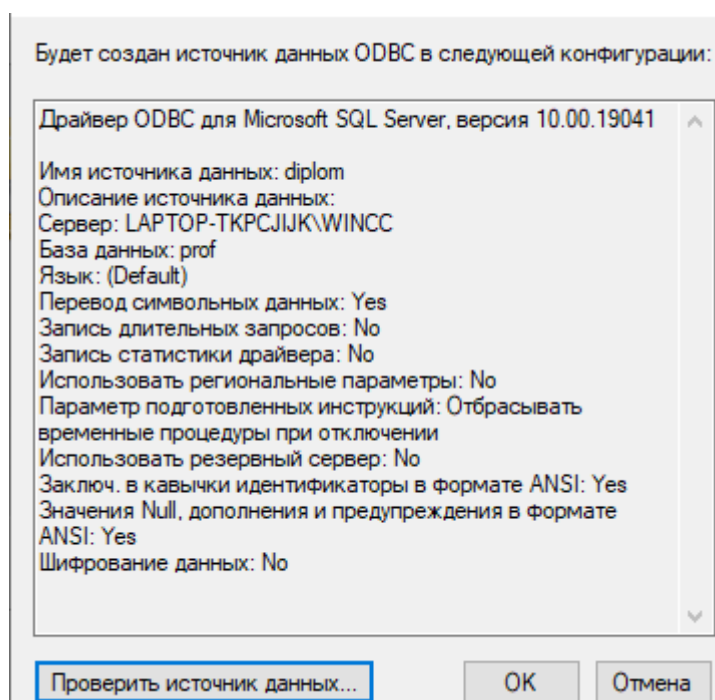


Рисунок 4.23 – Окно ODBC с созданным DSN

Далее в SQL Server Management Studio (SSMS) создаётся таблица с именем *pressure_control*, содержащая колонки *flow* и *discharge_pressure* с типом данных *real*, что обеспечивает хранение числовых значений с плавающей точкой, необходимых для контроля параметров процесса. Окно создания таблицы показано на рисунке 4.24.

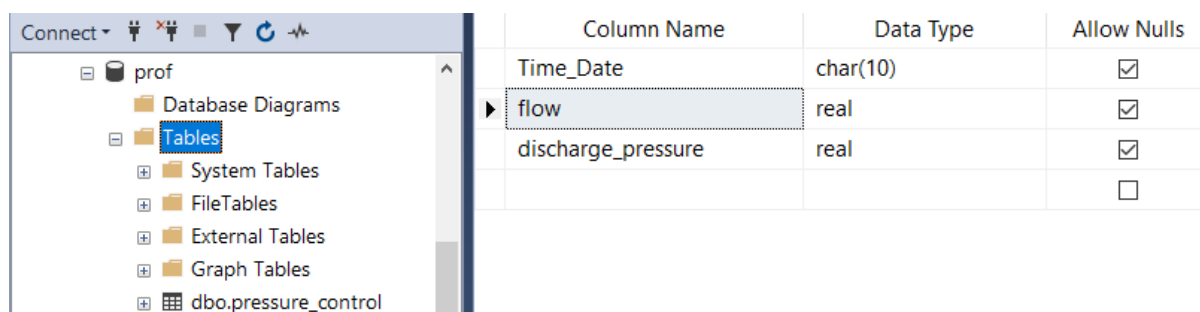


Рисунок 4.24 – Окно SSMS с таблицей

Для записи данных в эту таблицу используется команда INSERT, которая выполняется в первом скрипте VBfunction1. Этот скрипт отвечает за отправку текущих значений параметров из системы в базу данных, обеспечивая актуальное хранение данных. На рисунке 4.25 изображена таблица с данными датчиков расхода и давления.

	time_date	flow	discharge_pressure
1	2025-05-23 19:48:34.073	900	8
2	2025-05-23 20:01:33.177	900	8
3	2025-05-23 20:01:38.103	900	8
4	2025-05-23 20:01:38.300	900	8

Рисунок 4.25 – Таблица с данными в SSMS

Во втором скрипте осуществляется команда SELECT, с помощью которой значения извлекаются из таблицы pressure_control. Полученные данные сохраняются в заранее созданных тегах, предназначенных для работы с данными SQL, что позволяет использовать их в интерфейсе SCADA или для дальнейшего анализа. Оба скрипта представлены в приложении Б и В. На рисунке 4.26 изображены извлеченные данные.



Рисунок 4.26 – Данные с SQL, расположенные в окне с журнала

5 Связь среды TIA Portal с MATLAB/Simulink с помощью OPC UA

Связь TIA Portal с MATLAB/Simulink через протокол OPC UA обеспечивает единое и безопасное взаимодействие между мат. моделью и контроллером. OPC UA – это межплатформенный стандарт обмена данными, позволяющий передавать как реальные значения, так и события и историю в формате объектно-ориентированной архитектуры с поддержкой различных транспортов (TCP, MQTT, WebSockets) и встроенными механизмами безопасности – шифрованием, подписями, аутентификацией и разграничением доступа.

Это открывает возможности глубокого анализа, гибкого моделирования и надёжной реализации алгоритмов управления, что особенно важно для сложных систем, таких как антипомпажный регулятор давления в нефтегазовом трубопроводе.

В рамках реализации связи между средами TIA Portal и MATLAB/Simulink была построена система совместного моделирования, целью которой являлась отладка и проверка ПИД-регулятора, встроенного в ПЛК Siemens S7-1500, на модели объекта в Simulink. Такая интеграция позволяет проводить гибкий анализ переходных процессов, корректировать параметры регулятора в реальном времени и достоверно проверять качество регулирования до ввода системы в эксплуатацию.

Первоначально был выбран шаг дискретизации – один из ключевых параметров цифрового моделирования, определяющий, как часто система будет рассчитывать и обновлять значения переменных. В дискретных системах управления шаг дискретизации определяет частоту опроса датчиков и обновления управляющих воздействий. Его выбор зависит от динамики управляемого процесса: чем быстрее процесс, тем меньшим должен быть шаг. Слишком большой шаг приведет к потере точности и неустойчивости, слишком маленький – к избыточной нагрузке на вычислительные ресурсы.

Для корректного выбора шага использовался частотный анализ разомкнутой системы с помощью АЧХ в MATLAB. Команда `bode()` это способ представления амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристики системы, который позволяет определить полосу пропускания – диапазон частот, на которых система адекватно реагирует на внешние воздействия.

Непрерывный сигнал $x(t)$ с ограниченным частотным спектром в пределах от 0 до $\omega_{\text{пп}}$ полностью определяется последовательностью своих дискретных значений, если интервал прерывания выбран из условия:

$$T_s \leq \frac{1}{2\omega_{\text{пп}}} \quad (5.1)$$

где $\omega_{\text{пп}}$ – полоса пропускания, 1/с.

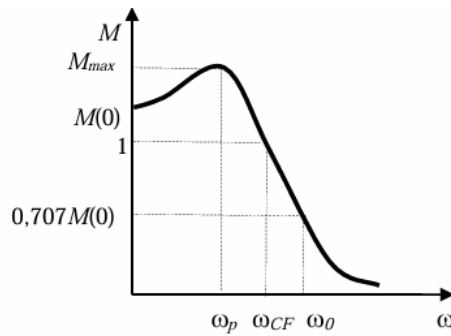


Рисунок 5.1 – Полоса пропускания на АЧХ

Полоса пропускания системы – это интервал частот от $\omega = 0$ до ω при которой выполняется условие: $0.707 M(0) \leq M(\omega)$.

В среде MATLAB была получена АЧХ и определена полоса пропускания на ней, которая изображена на рисунке 5.2.

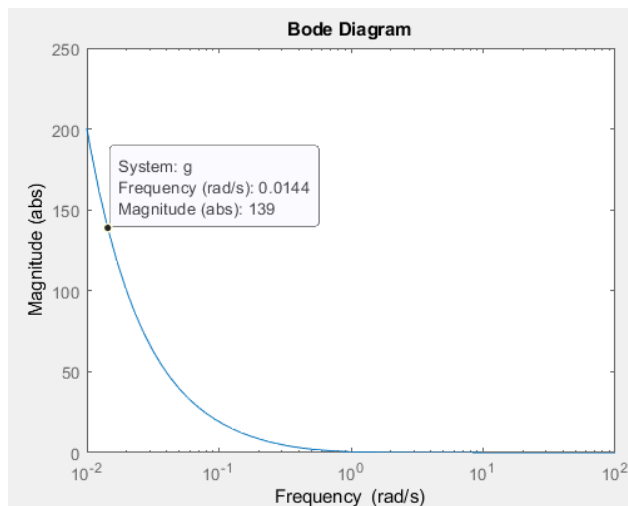


Рисунок 5.2 – Нахождение полосы пропускания на АЧХ с помощью команды bode()

Согласно рисунку 5.2 $\omega_{пп}=0.0144$, используя формулу (5.1) получим следующее

$$T_s \leq \frac{1}{2 * 0.0144}$$

где T_s – шаг дискретизации, $T_s \leq 34.7$

Согласно рекомендациям теории цифрового управления, шаг дискретизации T_s должен быть в 20—100 раз меньше, чем наименьшая постоянная времени в объекте и регуляторе, деленная на коэффициент усиления в данном контуре. Это условие позволяет адекватно аппроксимировать

непрерывную систему дискретной моделью. В качестве шага дискретизации выбран шаг 0.01 секунды (10мс).

Далее для построения схемы симуляции давления нагнетания путем преобразования было получено дифференциальное уравнение по главной передаточной функции (3.4).

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{2}{1.5s^3 + 3.5s^2 + s}, \quad (5.2)$$

$$Y(s) * (1.5s^3 + 3.5s^2 + s) = 2 * U(s) \quad (5.3)$$

Используя обратное преобразование Лапласа получим:

$$1.5y''' + 3.5y'' + y' = 2 * u(t), \quad (5.4)$$

$$y''' = \frac{2}{1.5} u(t) - \frac{3.5}{1.5} y'' - \frac{1}{1.5} y' \quad (5.5)$$

По дифференциальному уравнению была построена схема в симулинк показанная на рисунке 5.3, где в качестве интергатора был выбран интегратор с методом трапеций, позволяющим получить более точное численное интегрирование с учетом выбранного шага Ts. Также был использован блок Delay, реализующий задержку на один дискретный шаг. Такая задержка нужна для синхронизации обмена данными между Simulink и контроллером, поскольку в реальной системе регулятор и объект управления работают с чередованием. На схеме также представлен блок вызывающий функцию связи с OPC UA Connection 1.

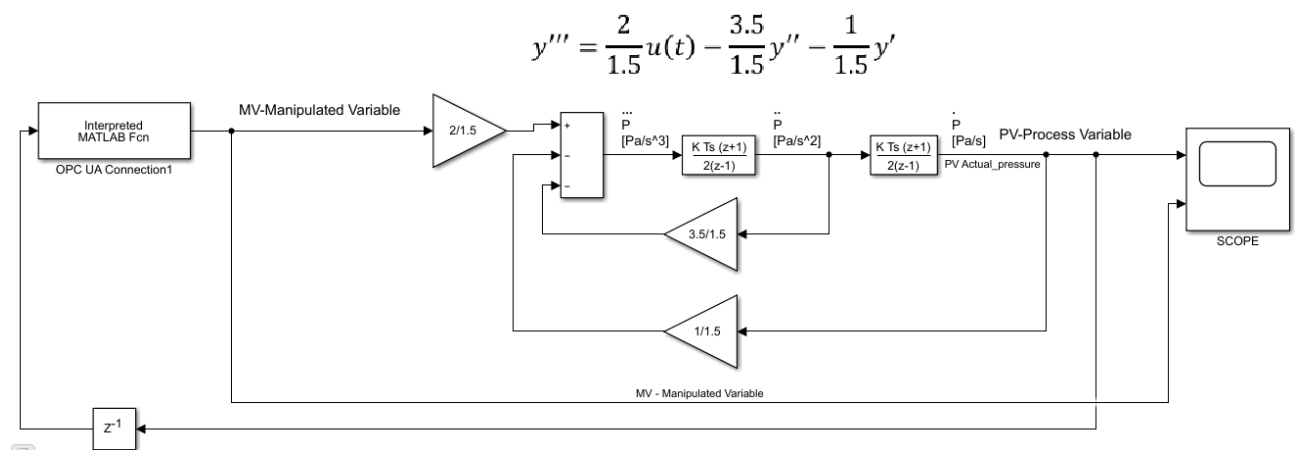


Рисунок 5.3 – Схема симулирующая давление нагнетания в Simulink на которую будет воздействовать ПИД-регулятор из среды TIA Portal

На стороне контроллера в TIA Portal в настройках CPU Siemens S7-1500 была активирована поддержка OPC UA-сервера. OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) – это современный промышленный протокол обмена данными, обеспечивающий кроссплатформенное взаимодействие, шифрование, аутентификацию и объектно-ориентированное представление данных. С его помощью внешние приложения, такие как MATLAB, могут безопасно считывать и записывать значения переменных контроллера.

В блоке циклического прерывания OB31 использован PID compact, работающем с тем же шагом дискретизации, что и модель в Simulink. Выходу которого после нормирования от 0 до 70% был присвоен тэг "OPC_interface.positioning_signal", а входному сигналу "OPC_interface.Actual_pressure".

Для связи MATLAB с OPC UA-сервером контроллера использовался OPC Toolbox специализированный модуль MATLAB, предназначенный для организации связи с промышленными устройствами по OPC-протоколу. С помощью данного модуля и скрипта в приложение Г, осуществляется подключение к нужному адресу IP и порту сервера, а также подписка на нужные теги указанные выше.

Таким образом, благодаря архитектуре OPC UA и функциональности OPC Toolbox MATLAB/Simulink становится полноценным клиентом, опрашивающим серверные данные ПЛК в процессе совместного моделирования.

На следующем этапе в проект TIA Portal была добавлена панель HMI, предназначенная для визуализации переходных процессов, задания уставки давления, а также изменения коэффициентов ПИД-регулятора вручную.

На рисунках 5.4 и 5.5 сравнение переходных процессов в HMI панели и окне Scope.

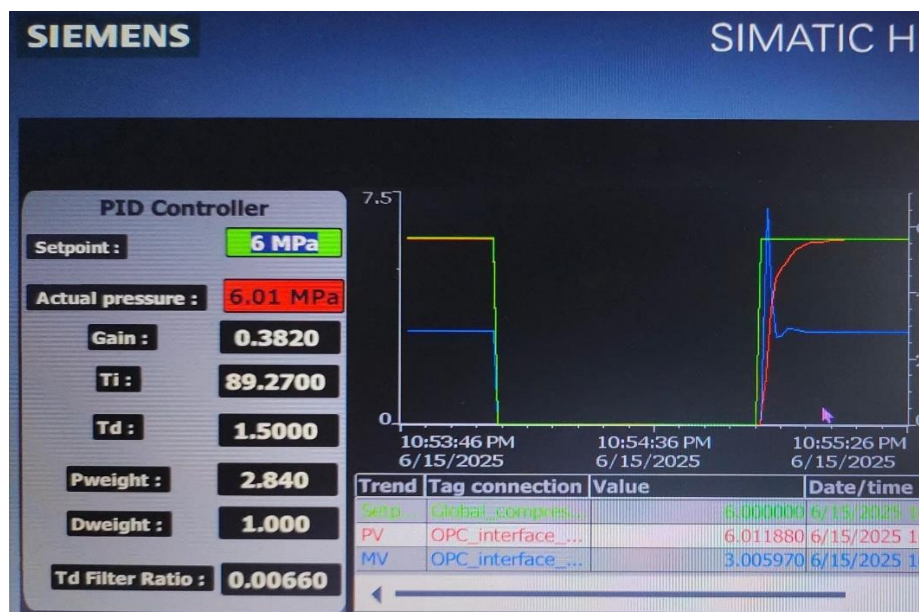


Рисунок 5.4 – Переходные процессы в HMI

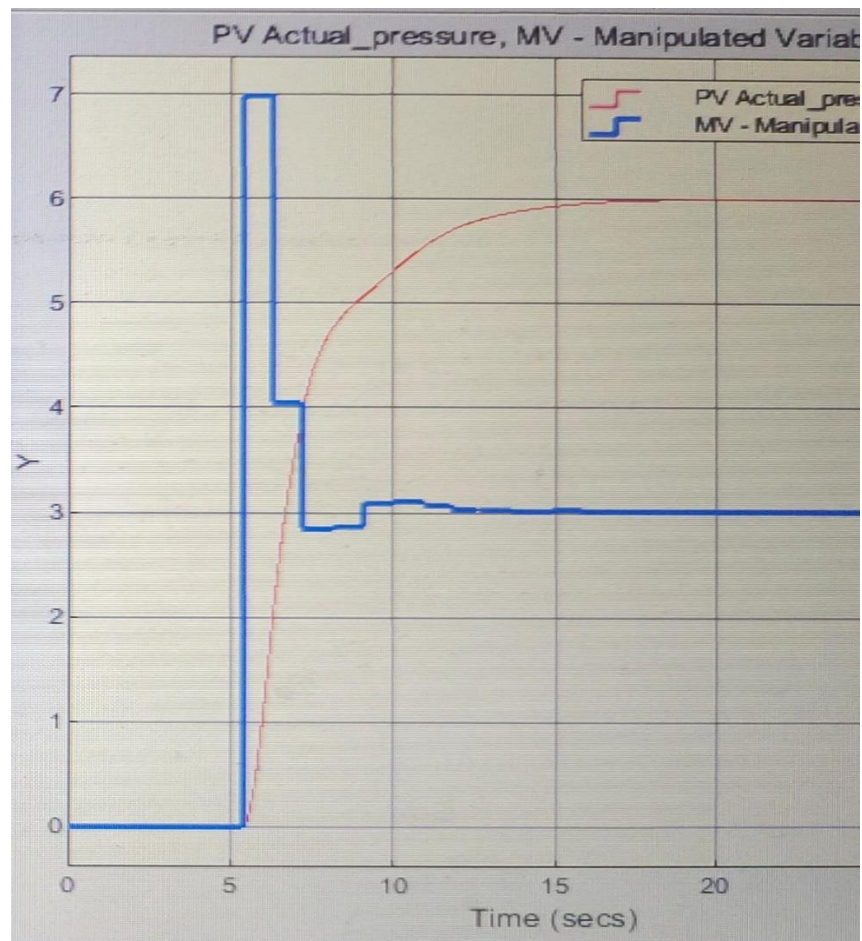


Рисунок 5.4 – Переходные процессы в Simulink

Для проверки корректности работы связи между двумя средами был произведена проверка, в регулятор были введены коэффициенты, полученные расчетным путем по доработанному модифицированному методу Циглера-Николса (3.6), и задана уставка давления 6 МПа. На экране HMI отображался процесс регулирования, график уставки Setpoint, сигналы MV (positioning signal) и PV(actual pressure), одновременно в Simulink в блоке Scope записывались также записывались графики без уставки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дипломном проекте разработана система автоматического антипомпажного регулирования давления нагнетания центробежного компрессора рециркуляции.

На начальном этапе проведен анализ технологического процесса, в ходе которого были выявлены контрольные точки, требующие постоянного мониторинга для предотвращения аварийных режимов. На основе этого анализа была сформирована функциональная схема автоматизации, отражающая последовательность и логику взаимодействия ключевых компонентов системы.

Для обеспечения надёжного сбора данных и управления технологическим процессом был выполнен подбор контрольно-измерительных приборов и оборудования управления. В качестве центрального контроллера выбран ПЛК серии Siemens S7-1500, обладающий широкими возможностями интеграции и высокой производительностью. В рамках системы использованы модули ввода-вывода Siemens SM 1557, модуль аналогового ввода с восемью каналами для подключения пяти аналоговых датчиков давления и температуры, модуль цифрового ввода с четырьмя каналами для обработки сигналов от кнопок и концевых выключателей, а также модуль аналогового выхода с одним каналом для управления регулирующим клапаном.

В расчетной части были определены предельные коэффициенты, необходимые для настройки регуляторов по методам Циглера-Николса (ZN2) и Тиреуса-Люйбена, а также рассмотрен модифицированный вариант метода Циглера-Николса (ZN2). По результатам анализа переходных процессов наибольшую эффективность показал модифицированный метод Циглера-Николса (ZN2), в следствие доработанный путем уменьшения интегрального коэффициента. Такой подход обеспечил более устойчивое поведение системы и удовлетворительное качество регулирования по основным критериям.

В программном разделе был разработан подробный алгоритм управления, адаптированный под специфику оборудования и технологических требований. Программное управление реализовано в среде TIA Portal. Для визуализации состояния процесса и оперативного мониторинга создана SCADA-система, интегрированная с контроллером через протокол PROFINET. В рамках системы налажено подключение к SQL-серверу, что обеспечивает централизованное хранение и последующий анализ технологических данных.

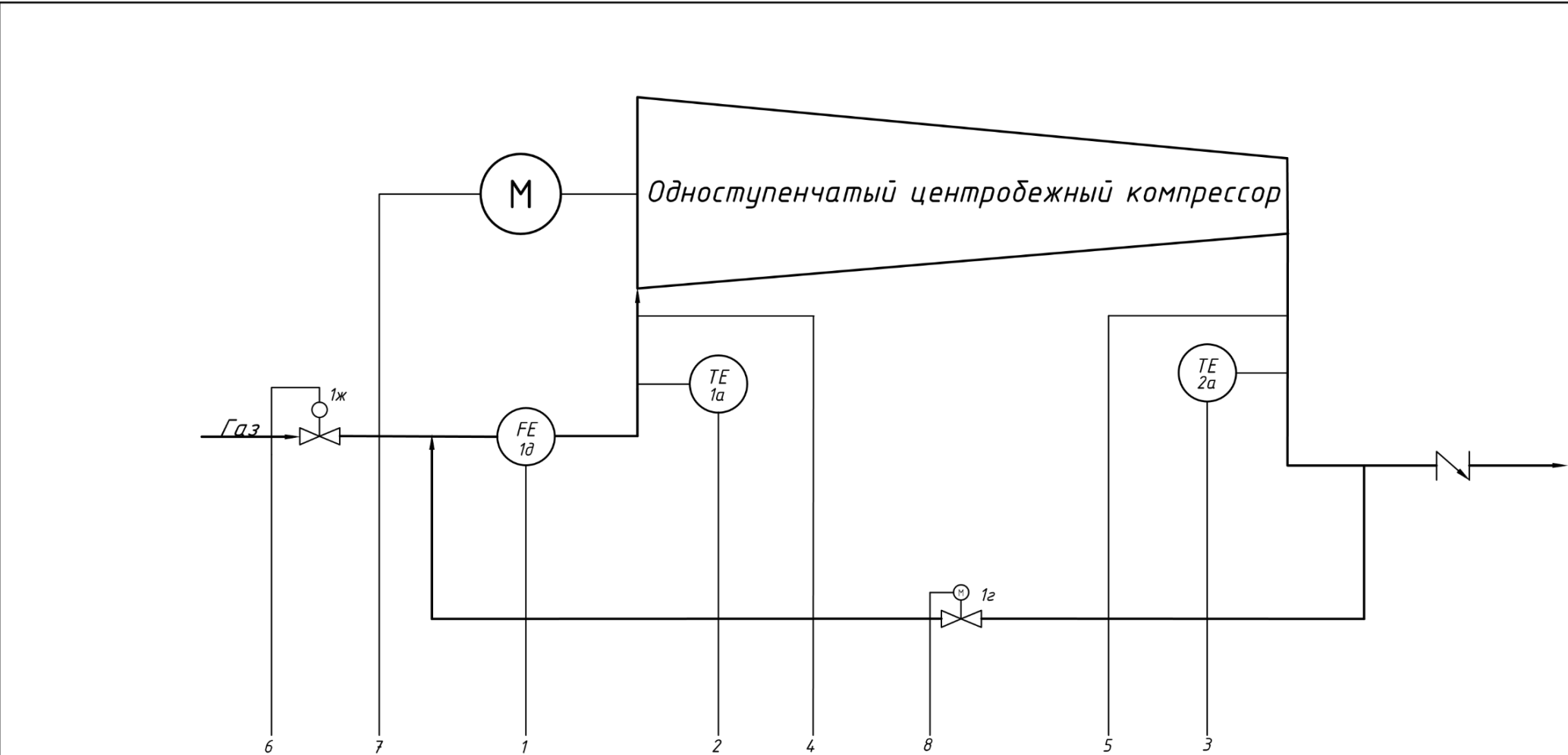
В заключении, выполнена интеграция среды TIA Portal с MATLAB/Simulink с использованием протокола OPC UA. Контроллер Siemens S7-1500 был настроен в качестве OPC UA сервера, а MATLAB выступал в роли клиента, используя встроенный пакет OPC Toolbox. Связь между системами обеспечила двусторонний обмен данными в реальном времени – передача текущего давления на вход PID-регулятора и получение управляющего воздействия в виде процента открытия. Такая интеграция позволила провести моделирование замкнутой системы регулирования с участием реального ПИД-регулятора из TIA Portal в дискретном режиме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Хисамеев И.Г., Максимов В.А., Баткис Г.С., Гузельбаев Я.З. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров / Казань: Изд-во «ФЭН», 2010. – 671 с.
- 2 Пугачев Е.В., Кипервассер М.В., Герасимчук А.В. Исследование воздействия помпажа турбокомпрессора на энергетические характеристики приводного двигателя / Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2015. – 84-90 с.
- 3 Санчугов В.И., Автоматика и управление энергетическими установками с газотурбинным приводом: учебник / Санчугов В.И., Шахматов Е.В. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 260 с.
- 4 Галеркин Ю. Б., Козаченко Л. И. Турбокомпрессоры: Учебное пособие / СПб.: Издательство Политехнического университета, 2008. – 374 с.
- 5 Старосельский С. Встроенная система защиты от помпажа и контроля производительности центробежных компрессоров / Компрессорная техника и пневматика, 2013. – 15 с.
- 6 Ерофеев А.А. Теория автоматического управления: Учебник для вузов / 3-е изд., стереотип. – СПб. Политехника, 2008. – 302 с.
- 7 Никитин К. В. Теория автоматического управления. Дискретные системы управления: Учебное пособие для реализации программ высшего образования по направлению подготовки бакалавров / Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 346 с.

Приложение А

Функциональная схема автоматизации системы автоматического регулирования давления с антипомпажным регулятором



Поз.	Наименование	Кол.	Примечание
1а-2а	Термопреобразователь сопротивления	2	Rosemount 0065
1б-2б	Датчик избыточного давления	2	Rosemount 3051CG
1в	Датчик разности давления	1	Rosemount 3051CD
1д	Трубка Вентури	1	Deltatop DV61S
1е-2е	Измерительный преобразователь	2	Rosemount 644
1ж	Клапан с мембранно-пружинным приводом	1	Masonellan 41005, Type 87/88
1з	Клапан с электроприводом	1	Fisher 67, FIELDVUE

		1	2	3	4	5	6	7	8				
Приборы по месту		FT 1б	TT 1е	TT 2е	PT 1б	PT 2б							
Электро - техническая часть								NS, HS	NS, HS				
Щит контроллера	Приборы на щите												
	SIMATIC S7-1500 CPU 1515-2PN	выход	AI								AI	5	
			DI									DI	
			AQ									AQ	1
			DQ										DQ
SCADA(HMI)		FIR	TIR	TIR	PIR	PIR	PC						
Назначение		Расход газа рециркуляции на всасывании	Температура газа рециркуляции на всасывании	Температура газа рециркуляции в нагнетании	Давление газа рециркуляции на всасывании	Давление газа рециркуляции на нагнетании	Регулирование давления нагнетания клапаном на всасывании	Включение/Выключение электродвигателя центробежного компрессора	Управление открытием и закрытием электроприводом клапана рециркуляции				

						Приложение А									
						Разработка системы автоматического регулирования давления в нефтегазовых трубопроводах с использованием антипомпажного регулятора	Лит.			Масса	Масштаб				
Изм.	Кол.	Лист	N докум.	Подпись	Дата										
Зав.Каф.		Сарсенбаев Н.С.													
Нормконтр.		Манатов Қ.А.													
Руков.		Ширяева О.И.				Функциональная схема автоматизации системы автоматического регулирования давления с антипомпажным регулятором	Лист 1			Листов 1					
							Кафедра АиУ								
Студент		Шаймерденов О.А.													

Приложение Б

Листинг скрипта VBFunction_1

```
Sub VBFunction_1()
Dim objConnection
Dim sqlConnection
Dim query
Dim flow
Dim discharge
Dim objCommand

flow = SmartTags("flow_hmi")
discharge = SmartTags("pressure_hmi")

' Установление соединения с базой данных
sqlConnection = "Provider=MSDASQL;DSN=diplom;UID=;PWD=;"
Set objConnection = CreateObject("ADODB.Connection")
objConnection.ConnectionString = sqlConnection
objConnection.Open

' SQL запрос с текущей датой и временем
query = "INSERT INTO [dbo].[pressure_control] ([time_date], [flow],
[discharge_pressure]) VALUES (GETDATE(), " & CStr(flow) & ", " &
CStr(discharge) & ")"

Set objCommand = CreateObject("ADODB.Command")
objCommand.ActiveConnection = objConnection
objCommand.CommandText = query

objCommand.Execute

Set objCommand = Nothing
objConnection.Close
Set objConnection = Nothing

End Sub
```

Приложение В

Листинг скрипта VBFunction_2

```
Sub VBFunction_2()

Dim objConnection, objCommand, objRecordSet
Dim sqlConnection, query

sqlConnection = "Provider=MSDASQL;DSN=diplom;UID=;PWD=;"
Set objConnection = CreateObject("ADODB.Connection")
objConnection.Open sqlConnection

' SQL-запрос для получения максимальных flow и discharge_pressure
query = "SELECT MAX(flow) AS MaxFlow, MAX(discharge_pressure) AS
MaxPressure FROM [dbo].[pressure_control]"

Set objCommand = CreateObject("ADODB.Command")
objCommand.ActiveConnection = objConnection
objCommand.CommandText = query

Set objRecordSet = objCommand.Execute

If Not objRecordSet.EOF Then
    SmartTags("maxFlow_sql") = objRecordSet("MaxFlow")
    SmartTags("maxPressure_sql") = objRecordSet("MaxPressure")
End If

objRecordSet.Close
Set objRecordSet = Nothing
Set objCommand = Nothing
objConnection.Close
Set objConnection = Nothing

End Sub
```

Приложение Г

Листинг скрипта Read_OPC_Fun

```
function [x] = Read_OPC_Fun(y)

persistent init_Server;
persistent init_Nodes;
persistent uaClient;
persistent Var_Node_In;
persistent Var_Node_Out;
persistent testVal;

if (isempty(init_Server))
    testVal = 0;
    init_Server = 0;
    init_Nodes = 0;
end
if init_Server == 0
    init_Server = 1;
    uaClient = opcua('192.168.0.1',4840);
    setSecurityModel(uaClient,'None');
    connect(uaClient);
end

if uaClient.isConnected == 1 && init_Nodes == 0
    init_Nodes = 1;
    % read out the variables of the OPC UA server
    Var_Node_In = opcuanode("OPC_interface"."positioning_signal",uaClient);
    Var_Node_Out= opcuanode("OPC_interface"."Actual_pressure",uaClient);
end

if uaClient.isConnected == 1 && init_Nodes == 1
    [val, ~, ~] = readValue(uaClient, Var_Node_In);
    writeValue(uaClient, Var_Node_Out, y);
    testVal = val;
end
x = double(testVal);
end
```

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: Шаймерденов Олжас Арманович

Название: Разработка системы автоматического регулирования давления в нефтегазовых трубопроводах с использованием антипомпажного регулятора

Координатор: Ширяева Ольга Ивановна

Коэффициент подобия 1: 0.23%

Коэффициент подобия 2: 0%

Замена букв: 5

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: 0.23% и Коэффициент подобия 2: 0%. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите перед государственной комиссией.

«11» 06 2025 г.

Дата


Подпись научного руководителя

**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: Шаймерденов Олжас Арманович

Название: Разработка системы автоматического регулирования давления в нефтегазовых трубопроводах с использованием антикомпажного регулятора

Координатор: Ширяева Ольга Ивановна

Коэффициент подобия 1: 0.23%

Коэффициент подобия 2: 0%

Замена букв: 5

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: 0.23% и Коэффициент подобия 2: 0%. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите перед государственной комиссией.

«11» 06 2025 г.
Дата


Подпись заведующего кафедрой /
начальника структурного подразделения

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

«11» 06 2025 г.
Дата


Подпись заведующего кафедрой /
начальника структурного подразделения

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

На дипломный проект студента
Шаймерденов Олжас Арманович
6B07103 – Автоматизация и роботизация

Тема: «Разработка системы автоматического регулирования давления в нефтегазовых трубопроводах с использованием антипомпажного регулятора»

Перед дипломантом ставилась задача разработки автоматической системы регулирования давления в нефтегазовых трубопроводах с использованием антипомпажного регулятора.

В первом разделе рассмотрены типы и характеристики центробежных компрессоров, их область применения, объект автоматизации и явление помпажа. Выполнен расчет параметров, характеризующих возникновение помпажа, что позволило обосновать необходимость применения антипомпажного регулирования.

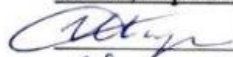
В ходе работы была разработана структурная схема автоматической системы, определены точки контроля, выполнен выбор приборов КИП и ПЛК. Проведен анализ динамических свойств системы, произведен синтез регулятора с применением различных методов настройки. Разработан алгоритм управления в среде TIA Portal, создана SCADA-система и реализована связь с SQL-сервером. Для моделирования и настройки управления выполнена интеграция TIA Portal с MATLAB/Simulink через OPC UA.

В процессе работы автор проекта показал себя дисциплинированным, исполнительным и трудолюбивым с высоким уровнем теоретической подготовки.

Заключение: Считаю, что дипломант справился с поставленной задачей, дипломный проект соответствует требованиям, предъявляемым к дипломным проектам по специальности 6B07103 — Автоматизация и роботизация. На основании характеристик выполненных исследований, уровня и качества выполненных результатов, студент Шаймерденов Олжас Арманович допускается к защите.

Научный руководитель

ассоциированный профессор, канд.техн.наук

 Ширяева О. И.

«29» сент 2025г.

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект студента
Шаймерденова Олжаса Армановича
6B07103 – Автоматизация и роботизация

На тему: «Разработка системы автоматического регулирования давления в нефтегазовых трубопроводах с использованием антипомпажного регулятора»

Выполнено:

а) пояснительная записка на _____ страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Дипломный проект посвящен разработке системы автоматического регулирования давления в нефтегазовых трубопроводах с использованием антипомпажного регулятора. Актуальность работы определяется необходимостью повышения надежности и устойчивости работы центробежных компрессоров, предотвращения аварийных режимов, а также обеспечения стабильной и безопасной эксплуатации оборудования на объектах нефтегазовой отрасли. Целью проекта является построение автоматизированной системы, способной обеспечить предотвращение явления помпажа за счет эффективного регулирования давления.

В первой части рассмотрены основные характеристики центробежных компрессоров, области их применения и особенности функционирования. Выполнен анализ объекта автоматизации, а также описана его газодинамическая характеристика. Особое внимание уделено явлению помпажа, его причинам и последствиям. Проведен расчет параметра, характеризующего границу устойчивости, что подтвердило необходимость внедрения системы антипомпажного регулирования.

Во второй части проведено проектирование структурной схемы системы автоматического управления. Определены ключевые точки контроля технологического процесса, подобраны приборы КИП и программируемый логический контроллер (ПЛК). Уделено внимание функциональному анализу, обеспечивающему корректную интеграцию оборудования в систему.

В третьей части выполнен анализ динамических свойств системы управления и проведен синтез типового регулятора. Рассмотрены различные методы настройки регуляторов, включая замкнутый и модифицированный методы Циглера-Николса, а также метод Тиреуса-Люйбена. Автор выполнил сопоставление методов и на основе анализа выбрал оптимальный подход к построению системы регулирования с учетом специфики объекта.

В четвертой части реализована программная часть проекта. Разработаны блоки алгоритма управления в среде TIA Portal. Также выполнено построение SCADA-системы для визуального отображения параметров компрессора и управления им в реальном времени. Также

реализована связь SCADA-системы с SQL-сервером для сбора, хранения и последующего анализа технологических данных.

В пятой части рассмотрено взаимодействие среды TIA Portal с MATLAB/Simulink посредством OPC UA. Такое программное решение обеспечивает возможность предварительного моделирования процессов, апробации алгоритмов регулирования и повышения точности управления. Связь между инженерными средами позволяет реализовать сквозное проектирование от моделирования до внедрения, что соответствует современным требованиям цифровой трансформации промышленной автоматизации.

Замечания:

1. В TIA Portal реализован двухпозиционный режим, но можно усилить работу за счёт адаптивной настройки уставки с учётом градиента изменения давления.

Оценка работы

Учитывая вышеизложенное, считаю, что дипломный проект заслуживает оценки отлично «95%», а студент Шаймерденов Олжас Арманович присвоения академической степени бакалавра по специальности 6В07103 – Автоматизация и роботизация.

Рецензент

зав. кафедрой “АиУ”
АУЭС им. Г. Даукеева
доктор PhD



Абжанова Л. К.