

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации

Кафедра автоматизации и управления

Кокишев Дамир Алтынбекович

Исследование системы автоматического управления процессом переработки  
нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе на основе Smart-  
технологий

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

Специальность 5В070200 - Автоматизация и управление

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации

Кафедра автоматизации и управления

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой АиУ

д-р. техн. наук, профессор

 Сулейменов Б.А.

«28» мая 2020 г.

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

На тему: «Исследование системы автоматического управления процессами переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе на основе Smart-технологий»

По специальности: 5B070200 - Автоматизация и управление

Выполнил

Кокишев Д.А.

Научный руководитель

канд. техн. наук,

ассоциированный профессор

 Ширяева О. И.

(подпись)

«20» мая 2020 г.

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации

Кафедра автоматизации и управления

5B070200 - Автоматизации и управления

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой АиУ

д-р. техн. наук, профессор

Сулейменов Б.А.

«28» мая 2020г.



**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломной работы**

Обучающемуся Кокишеву Д.А.

Тема «Исследование системы автоматического управления процессами переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе на основе Smart-технологий».

Утвержден приказом Ректора Университета № 762-б от «27» января 2020 г.

Срок сдачи законченного проекта: «5» мая 2020 г.

Исходные данные дипломному проекту: математическая модель технологического проекта автоматического управления процессами переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов или краткое содержание дипломной работы: а) технологический процесс переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе б) применение Smart-технологии для синтеза типового регулятора системы автоматического управления процессами переработки нефти.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): принципиальная схема сепаратора, структурная схема сепаратора.

Рекомендуемая основная литература: техническая литература по автоматизации технологических процессов и математическому моделированию в нефтегазовой промышленности из 7 наименований.

**ГРАФИК**  
подготовки дипломной работы

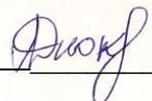
Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Технологический раздел	1 марта 2020 г.	
Специальный раздел	20 апреля 2020 г.	

**Подписи**

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Научный руководитель, консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Технологический раздел	канд.техн.наук, ассоц. профессор Ширяева О.И.	20.05.2020	
Специальный раздел	канд.техн.наук, ассоц. профессор Ширяева О.И.	20.05.2020	
Нормоконтролер	канд.техн.наук, ассистент профессор Сарсенбаев Н.С.	28.05.2020	

Научный руководитель  Ширяева О.И.

Задание принял к исполнению обучающийся  Кокишев Д.А.

Дата "27" января 2020 г.

## АҢДАТПА

Дипломдық жұмыста Smart-технология негізінде Павлодар мұнай-химия зауытында мұнайды өңдеу процесін автоматты басқару жүйесі зерттелді.

Дипломдық жұмыстың бірінші бөлімінде Павлодар мұнай-химия зауытында мұнайды өңдеудің технологиялық процесі қарастырылады. Басқару объектісі ретінде мұнайды газ бен судан тазарту кезінде маңызды рөл атқаратын үш фазалы сепаратор таңдалды. Сондай-ақ технологиялық процеске байланысты сепараторлардың жіктелуі қарастырылады.

Дипломдық жұмыстың екінші бөлімінде үшфазалы сепаратордың математикалық моделі, өтпелі процесс графиктерін алу, математикалық модельдің динамикалық қасиеттерін талдау, жүйенің орнықтылығын тексеру, жүйенің шекті параметрлерін есептеу, жүйенің өтпелі процессінің сапаларына тікелей және жанама баға алу құрылған. Осы нәтижелер негізінде жалпы процесті жақсарту мақсатында ПИД-реттегіш салынды. ПИД-реттеуіш параметрлері жасанды интеллект пайдалану арқылы алынған. Бұл жұмыста жасанды интеллект бөлшектер Рой алгоритмі ұсынылған, ол бүгінгі күні көптеген тіршілік салаларында кеңінен қолданылады.

Қорытындыда орындалған жұмыстың қорытындысы шығарылады, ПИД-реттеуіштің параметрлерін бөлшек Рой алгоритмімен есептеу артықшылығы негізделеді

## АННОТАЦИЯ

В дипломной работе исследована система автоматического управления процессами переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе на основе Smart-технологий.

В первой части дипломной работы рассматривается технологический процесс переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе. В качестве объекта управления выбран трехфазный сепаратор, играющий важнейшую роль при очистке нефти от газа и воды. Также рассматривается классификация сепараторов в зависимости от технологического процесса.

Во второй части дипломной работы построена математическая модель трехфазного сепаратора, получение графиков переходного процесса, произведение анализа динамических свойств математической модели, проверка на устойчивость системы, высчитывание предельных параметров системы, получение прямых и косвенных оценок качеств переходного процесса системы. На основе данных результатов построен ПИД-регулятор с целью улучшения процесса в целом. Параметры ПИД-регулятора получены путем использования искусственного интеллекта. Искусственный интеллект в данной работе представлен алгоритмом роя частиц, который на сегодняшний день широко применим во многих отраслях жизнедеятельности.

В заключении подводятся итоги выполненной работы, обосновывается преимущества расчета параметров ПИД-регулятора алгоритмом роя частиц.

## ANNOTATION

In the thesis, the system of automatic control of oil refining processes at the Pavlodar petrochemical plant based on Smart technologies is studied.

In the first part of the thesis, the technological process of oil refining at the Pavlodar petrochemical plant is considered. A three-phase separator has been selected as the control object, which plays an important role in the purification of oil from gas and water. The classification of separators depending on the technological process is also considered.

In the second part of the thesis built a mathematical model of three-phase separator, to obtain a graph of the transition process, the analysis of the dynamic properties of mathematical models, checking for system stability, decide limiting parameters of the system, receiving direct and indirect evaluations of the qualities of the transition process. Based on these results, a PID controller is built to improve the process as a whole. Parameters of the PID controller are obtained by using artificial intelligence. Artificial intelligence in this paper is represented by the particle swarm algorithm, which is currently widely used in many sectors of life.

In conclusion, the results of the work performed are summarized, the advantages of calculating the parameters of the PID controller by the particle swarm algorithm are justified

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Технологический процесс переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе	10
2 Расчетная часть	15
2.1 Разработка схем и моделирование процессов переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе	15
2.2 Получение результатов моделирования системы автоматического управления процессами переработки нефти	19
2.3 Анализ динамических свойств системы автоматического управления процессами переработки нефти	23
2.4 Оценки качества переходного процесса замкнутой системы автоматического управления процессами переработки нефти	26
2.5 Применение Smart-технологии (метода роевого интеллекта) для синтеза типового регулятора системы автоматического управления процессами переработки нефти	31
Заключение	40
Список использованной литературы	41

## ВВЕДЕНИЕ

Бурный прогресс в развитии технологий дал огромный толчок в появлении новой науки – искусственного интеллекта. В свою очередь, искусственный интеллект широко применяется во многих сферах жизнедеятельности, в том числе и автоматизации. На сегодняшний день невозможно представить любую сферу производства без автоматизации.

Одной из сфер производства, активно внедряющие искусственный интеллект в свои автоматизированные системы, является нефтеперерабатывающая промышленность. Важнейшим этапом нефтепереработки является разделение нефти, газа и воды друг от друга, протекающем в трехфазном сепараторе. Трехфазный сепаратор представляет собой вертикальный сосуд, в котором происходит процесс разделения нефти, газа и воды. Сырая нефть по трубопроводу из скважин вытекает в сосуд. Затем эта жидкость отделяется друг от друга благодаря разнице в плотностях. Газ занимает самый верхний слой в сосуде, за которым следуют нефть и затем вода.

Уникальность трехфазного сепаратора по сравнению с двухфазным сепаратором заключается в том, что в трехфазном сепараторе разделение нефти, газа и воды происходит одновременно, тогда как в двухфазном сепараторе полностью отделяется только сырой газ, тогда как между нефтью и водой все еще существует элемент жидкой смеси. Для того чтобы полностью отделить смесь масла и воды, необходимо провести еще один процесс разделения.

Целью данной дипломной работы является исследование системы автоматического управления процессами переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе с использованием одного из методов искусственного интеллекта – метода роя частиц.

В первой части дипломной работы будет описан технологический процесс переработки газа на Павлодарском нефтехимическом заводе.

Во второй части дипломной работы будет описана расчетная часть: получение математической модели трехфазного сепаратора, моделирование и идентификация трехфазного сепаратора, анализ устойчивости системы, прямые оценки качества, косвенные оценки качества, построение ПИД-регулятора методом роя частиц.

В заключении будут представлены итоги данной работы.

## **1 Технологический процесс переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе**

Нефть представляет собой сложную смесь углеводородов различной молекулярной массы, других химических соединений, различных газообразных, жидких и твердых веществ, содержащих более 100 атомов углерода, кислорода и т.д., природная жидкость со своеобразным запахом, состоящая из гетерогенных соединений серы и смеси металлов. Нефть является наиболее важным типом минерала, расположенного в осадочном слое, который является маслянистым, коричневым, легковоспламеняющимся, иногда черным или зеленовато-желтым, и даже бесцветным [1].

Процесс добычи нефти, добычи газа в целом является сложным процессом. Технология добычи нефти означает извлечение смеси углеводородов из нефти, попутного газа, минерализованной воды и механических примесей посредством нефтяных скважин. Нефть, добываемая из нефтяных скважин, требует дальнейшей переработки, то есть разделение (рафинирование) углеводородов на нефть, нефтяной газ и пластовую воду, которая затем повторно перекачивается в производственный процесс. Добыча нефти включает в себя разведку, бурение и строительство скважин, их ремонт, очистку добываемой нефти от воды, серы, парафина. Понятно, что в стволе скважины всегда есть жидкость. Наиболее важной частью процесса бурения скважины является буровой раствор. Когда бурение завершено, оно заменяется технической водой в качестве верха. В результате, согласно обзору скважины, скважина заполняется пластовым флюидом (нефть или вода, содержащая нефть). Затем, данный флюид выкачивается из скважины и по трубопроводам идет на нефтеперерабатывающий завод, в котором и происходит процесс рафинирования [2].

Процесс рафинирования на Павлодарском нефтехимическом заводе происходит в трехфазном сепараторе. Трехфазный сепаратор представляет собой сосуд, который может быть расположен как вертикально, так и горизонтально. Основные области применения трехфазных сепараторов: нефтехимия, нефтепереработка и другие отрасли, требующие разделения нефтяных эмульсий.

В трехфазном сепараторе происходит процесс отделения нефти от газа из воды. Блок проходит несколько этапов, количество которых зависит от объема дегазированного масла, извлеченного из пластовой жидкости. Принцип работы сепаратора основан на воздействии центробежной силы со стороны среды, которая разделяет жидкость на твердую и жидкую фазы. Суспензия поступает в верхнюю часть барабана через основную трубу, где очищается от тяжелых элементов, из которых она выталкивается в каналы тарелки, а затем - в разделительную камеру. В процессе подъема жидкости из скважин к центральной точке сбора и подготовки нефти, газа и воды давление постепенно снижается, и газ выделяется из нефти. Объем выделяемого газа увеличивается с уменьшением давления в системе и обычно превышает объем

жидкости в несколько десятков раз. Поэтому неуместно хранить их вместе под низким давлением, а иногда и собирать. Их нужно собирать и хранить отдельно.

На рисунке 1.1 представлена принципиальная схема трехфазного сепаратора.

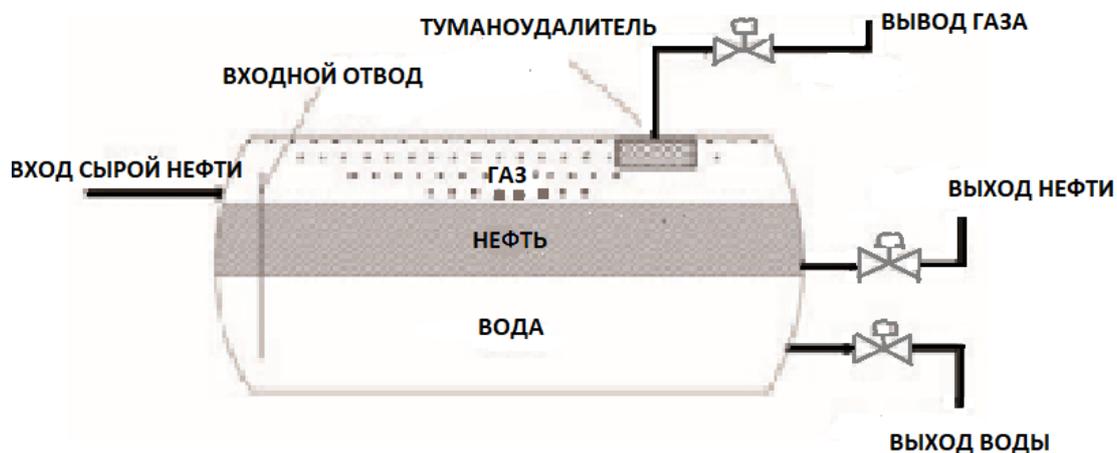


Рисунок 1.1 – Схематическое представление трехфазного сепаратора

В современных системах сбора нефти и газа сепараторы оснащены автоматизированными групповыми дозирующими узлами всех узлов (кроме узлов, оборудованных измерителями массового расхода), насосными станциями и центральными пунктами сбора и подготовки нефти, газа и воды.

В блочных автоматических дозаторах отделение газа от нефти осуществляется только с целью раздельного измерения дебита газа и жидкости. После измерения нефть и газ снова смешиваются и подаются в общий резервуар нефти и газа. Многоступенчатое разделение используется для постепенного отвода свободного газа при снижении давления. Используется при высоком давлении на устье скважины. Поскольку маслоотделитель является непрерывным процессом, он очень опасен.

Сепаратор является неотъемлемой частью любой технологической схемы в области добычи нефти и газа. Сепараторы классифицируются в соответствии с основными функциональными и конструктивными особенностями.

Сепараторы делятся на следующие типы в зависимости от положения [3]:

- вертикальный;
- горизонтальный;
- гидроциклоны.

В зависимости от рабочего давления [4]:

- 1,0 до 1,0,6 МПа;
- от 2,0,6 до 2,5 МПа;
- Более 3,2,5 МПа.

Вертикальный сепаратор представляет собой цилиндрический корпус, снабженный короткими трубками для входа и выхода жидких и газообразных

форм, фитингами для хранения и регулировки, а также специальными элементами для отделения жидкости.

Горизонтальный сепаратор включает в себя резервуар с 2 полками, расположенными на склоне, пенный огнетушитель, сепаратор жидкости и устройство для предотвращения образования воронки при сливе масла. Горизонтальный сепаратор оснащен трубкой для впуска жидкости, фазами и форсунками для выхода люка.

На рисунке 1.2 представлена схема трехфазного горизонтального сепаратора, где 1 – это корпус сепаратора, 2 – вход исходной жидкости, 3 – выход нефти, 4 – выход газа, 5 – выход воды, 6 – устройство приема и распределения смеси жидкого газа, 7 – распределительно-коалесцирующие устройства, 8 – переточная перегородка, 9 – устройства улавливания капельной жидкости [5].

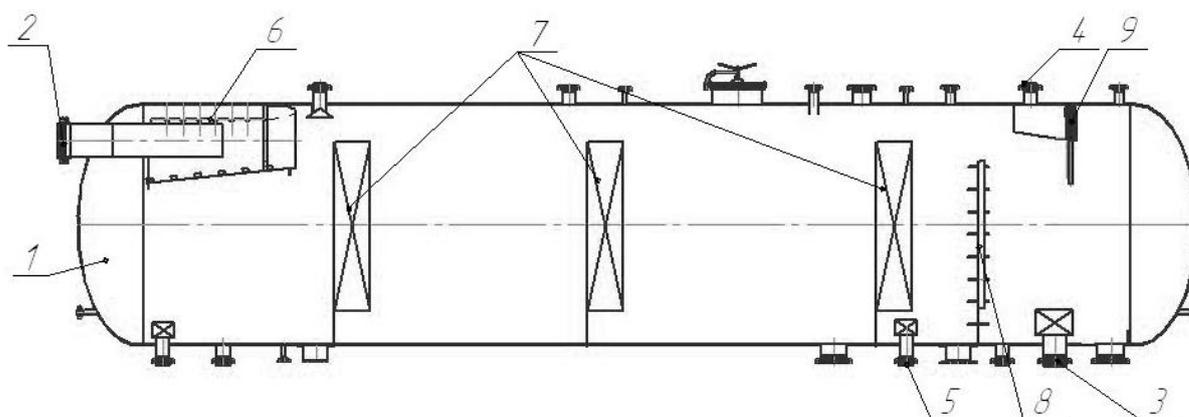


Рисунок 1.2 – Схема горизонтального трехфазного сепаратора

Гидроциклонный сепаратор представляет собой горизонтальную скважину, состоящую из одного точечного гидроциклона. Циклон с одним потоком представляет собой цилиндрическое устройство, которое вводит касательную в пластовую жидкость, направляющую трубу и секцию потока.

Горизонтальные сепараторы обычно можно встретить на нефтеперерабатывающих заводах. Они устанавливаются на первом и последнем этапах разделения нефти. Основным преимуществом горизонтальных цилиндрических сепараторов является то, что они имеют высокую производительность. Данные сепараторы предназначены для разделения газожидкостных смесей с высоким содержанием жидкости или склонных к пенообразованию жидкостей. Недостатком является сложность и большой объем удаления твердых отходов из сепаратора. Всем известно, что смесь нефти и газа, поступающая в центральную точку сборки, содержит большое количество механических примесей. В таких случаях наиболее рационально использовать вертикальные сепараторы, которые образуют хороший поток. В таких случаях наиболее рационально использование высокопоточных вертикальных сепараторов. Также удобно регулировать уровень

жидкости в вертикальных сепараторах. Такие сепараторы требуют меньше места для установки, но из-за их высоты затрудняют их установку и ремонт.

На рисунке 1.3 представлен горизонтальный сепаратор (а), а также вертикальный сепаратор (б).

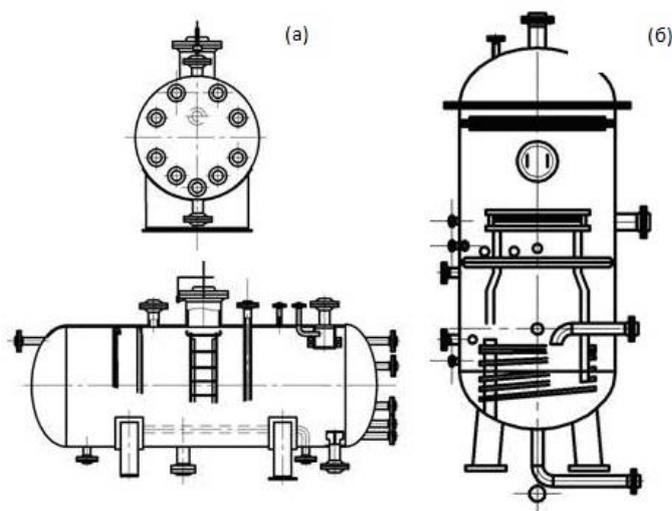


Рисунок 1.3 – Горизонтальный (а) и вертикальный (б) сепараторы

Нефтегазовые сепараторы состоят из четырех секций:

1) Основная часть сепаратора, где происходит процесс отделения нефти от свободного газа.

2) Отделение свободных капель и частично растворенных газов от нефти в зависимости от нефти, которая делится на часть осадка.

3) Секция хранения и добычи нефти в сепараторе.

4) Капельная пробка - служит для улавливания мельчайших капель жидкости, транспортируемых потоком газа. Для первоначального извлечения свободного газа из нефти устанавливается специальное устройство – депульсатор, который служит для увеличения производительности перед входом в сепаратор. Качество разделения повышается при смешивании масла за счет повышения температуры и снижения давления. Наиболее эффективным является барботирование газа. На заключительном этапе разделения капля нефти в газе увеличивается в среднем на 0,05 кг / м<sup>3</sup>.

В качестве объекта управления в данной работе будет рассматриваться горизонтальный трехфазный сепаратор V-3340, который используется в Павлодарском Нефтехимическом заводе. Уровень нефти и воды, а также давление газа внутри сепаратора контролируются несколькими отдельными системами управления показано на рисунке 1.4.

Уровень жидкости (а также давление газа) в многофазном сепараторе необходимо контролировать, чтобы обеспечить безопасную работу и справиться с потенциальной проблемой перенапряжения. В общем случае управление уровнем можно разделить на две категории: первая категория — это те обычные системы управления уровнем, в которых уровень управляется

сам по себе, например, сервоуправление уровнем в системах ядерных реакторов [6], [7]. Другая категория — это те системы управления, где точный уровень не имеет значения, пока уровень удерживается в некотором допустимом диапазоне, так что потенциальный вход пульсации может быть затушен, позволяя уровню подниматься и опускаться в допустимом диапазоне. С технической точки зрения контроль уровня V-3440 относится ко второй категории. Часто при текущей ежедневной работе могут наблюдаться некоторые большие колебания оттока газа, нефти и воды.

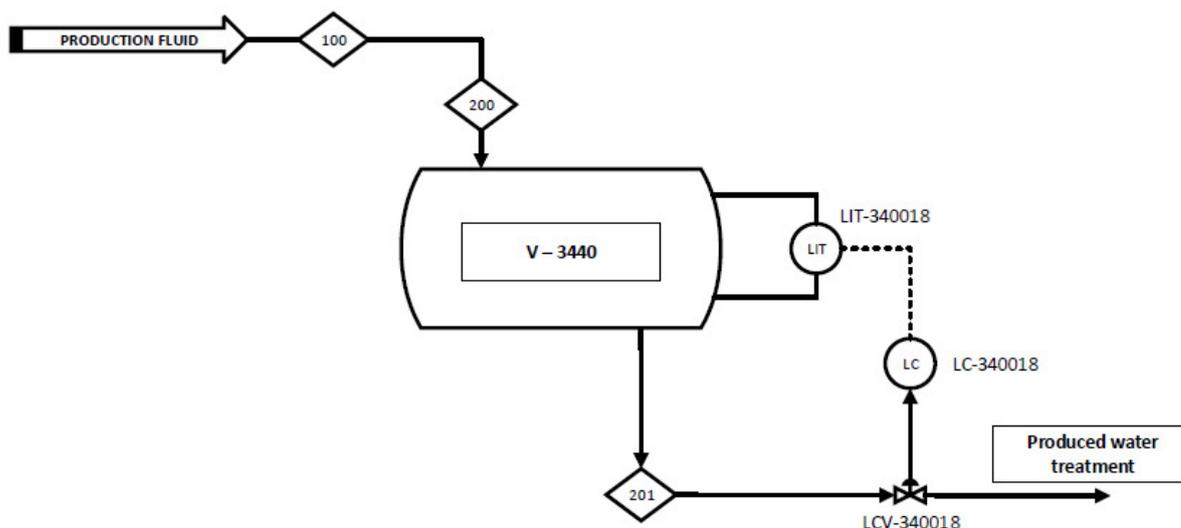


Рисунок 1.4 – Функциональная схема автоматизации сепаратора V-3340

Если сосредоточиться на контуре управления уровнем воды, то можно заметить, что для измерения уровня воды внутри сепаратора используется датчик индикатора уровня с меткой LIT-340018. Измеренный сигнал уровня передается на регулятор уровня с меткой LC-340018. Регулятор уровня выполняет алгоритм PI-типа и посылает управляющий сигнал на регулирующий клапан уровня с меткой LCV-340018. LCV-340018 регулирует отток воды, чтобы контролировать уровень воды внутри сепаратора. Можно заметить, что датчик индикатора расхода, названный FIT-340012, используется для измерения расхода воды в некоторых других целях. Это измерение не используется текущим регулятором уровня. Тем не менее, это измерение имеет важное значение для оценки расхода входного потока (воды) и тем самым проверки нового контроллера в процессе моделирования.

## 2 Расчетная часть

### 2.1 Разработка схем и моделирование процессов переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе

Некоторые эксплуатационные данные по расходам воды и нефти показаны на рисунке 2.1. Здесь наблюдаются явные колебания скорости оттока воды.

Уровни воды и нефти внутри сепаратора показаны на рисунке 2.2. Можно наблюдать, что колебания уровня воды находятся в гораздо меньшем масштабе (процентах) по сравнению с колебаниями скорости оттока воды, как показано на рисунке 2.1, особенно после первых 1000 сек. Некоторые проблемы с перенапряжением также можно наблюдать, анализируя эти данные.

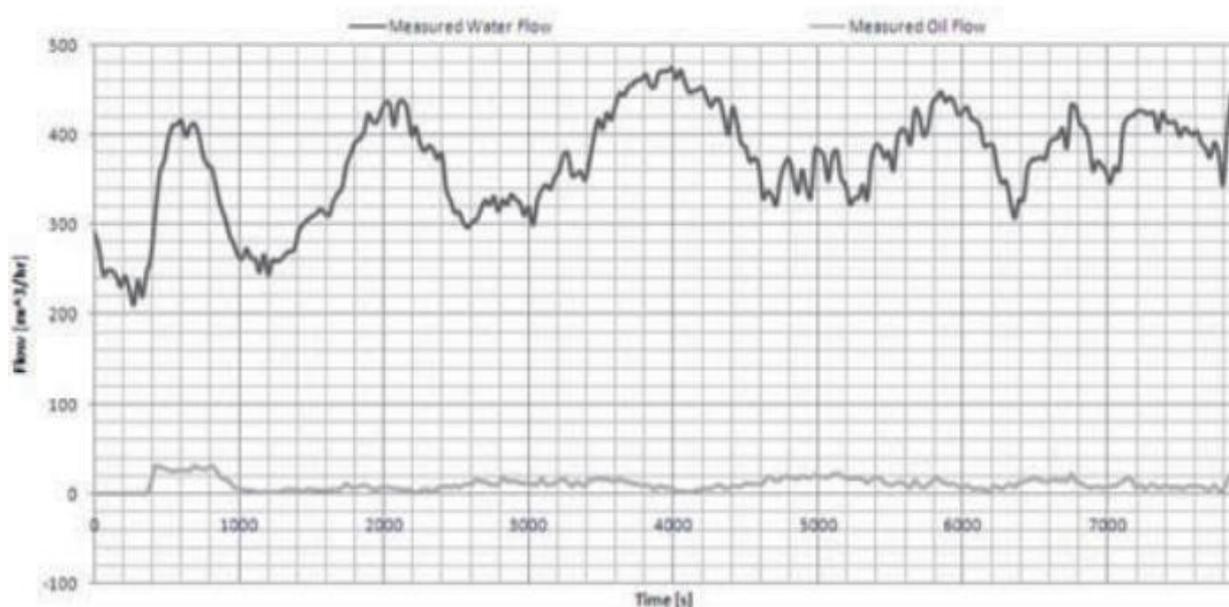


Рисунок 2.1 – Измеренные скорости оттока воды и нефти за определенный промежуток времени

Например, в течение периода 3900 сек. до 4100 сек., из рисунка 2.2, уровень воды немного ниже среднего, в то время как из рисунка 2.2 очевидно, что скорость оттока воды увеличивается.

Между тем, скорость оттока нефти довольно низка, и уровень нефти в этот период снижается. Все эти наблюдения позволяют сделать вывод о том, что в этот период происходили большие всплески воды или газа [8].

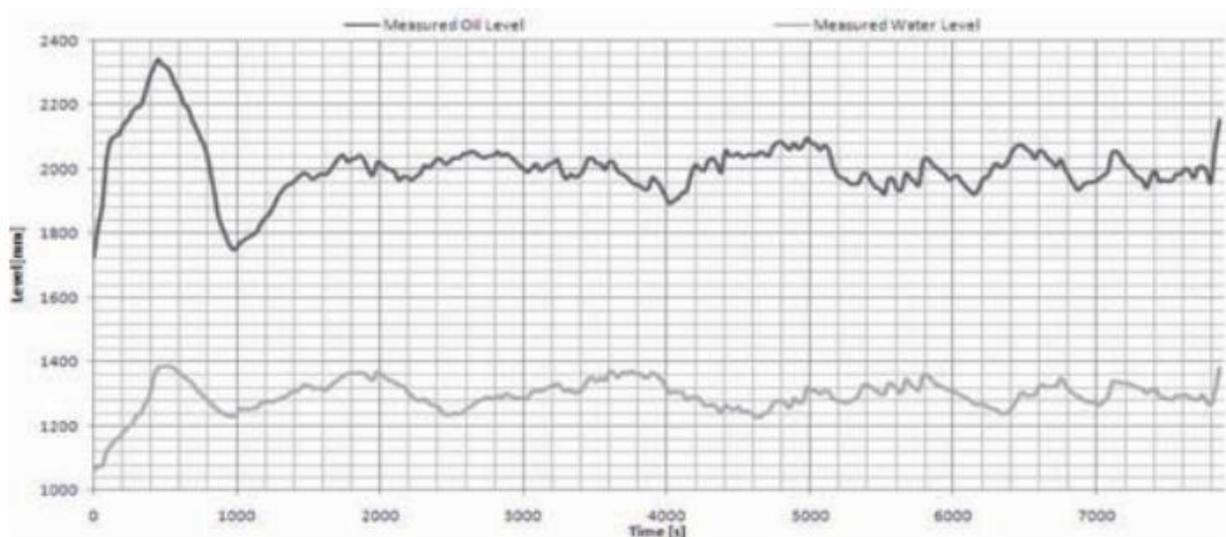


Рисунок 2.2 – Измеренные уровни воды и нефти в течение определенного интервала времени

Системные параметры и переменные, используемые ниже, перечислены в таблице 2.1

Таблица 2.1 - Системные переменные и параметры

Обозначение	Описание	Единица измерения
$h(t)$	Уровень воды внутри сепаратора	m
$Q_{in}(t)$	скорость притока воды	$m^3/h$
$Q_{out}(t)$	скорость оттока воды	$m^3/h$
$r$	радиус поперечного сечения сепаратора	m
$L$	длина водного участка	m
$h_0(t)$	уровень нефти внутри сепаратора	m
$P_g(t)$	давление газа внутри сепаратора	Pa
$C_v$	Коэффициент выпуска выпускного клапана	-
$u(t)$	процент открытости клапана	-
$\rho_w$	плотность воды при рабочей температуре.	$kg/m^2$
$\rho_o$	плотность масла при рабочей температуре.	$kg/m^2$
$P_w$	давление клапана вниз по потоку	Pa
$U_{max}$	максимальная площадь открытия регулирующего клапана	$m^2$
$\Delta P_{out}$	перепад давления над регулирующим клапаном	Pa

В соответствии с геометрией сепаратора, объем воды внутри сепаратора является функцией уровня воды  $h$  и имеет определенное соотношение как:

$$V(h) = (r^2 \cos^{-1} \left( \frac{r-h}{r} \right) - (r-h) \sqrt{2rh - h^2}) L. \quad (1)$$

Поскольку для нормальной работы требуется уровень воды между уровнем тревоги высокого уровня (LАН) и уровнем сигнала тревоги низкого уровня (LAL), таким образом, соотношение (1) может быть упрощено как линейная зависимость в течение этого интервала, то есть  $V(h) = ALh(t)$  где  $A \approx \pi r^2$ .

Динамика объема воды внутри сепаратора соответствует принципу баланса масс, т. е.:

$$\frac{dV(t)}{dt} \approx AL \frac{dh(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t). \quad (2)$$

Согласно теории динамики потока, расход воды через клапан LCV-340018 можно определить как:

$$Q_{out} = C_v f(u) \sqrt{\frac{\Delta P_{out}}{\rho_w}}, \quad (3)$$

где  $f(u)$  представляет характеристики клапана зоны открытости, относящиеся к проценту открытости  $u$ . Для этого конкретного линейного клапана LCV-340018 линейное соотношение хорошо соблюдается. Таким образом, существует  $f(u) = uU_{max}$ . Перепад давления на клапане, обозначенный как  $P_{out}$ , можно оценить как:

$$\Delta P_{out}(t) = P_g(t) + \rho_0 g h_0(t) + \rho_w g h(t) - P_w(t). \quad (4)$$

Коэффициент  $C_v$  клапана в (3) оценивается с использованием метода наименьших квадратов на основе записанных данных о расходе воды, уровнях воды и масла внутри сепаратора, давлении газа внутри сепаратора и давлении воды на выходе. При условии, что плотность воды постоянна, значение  $C_v$  будет решением:

$$\min_{C_v} \sum_i |Q_{out}(i) - C_v u(i) U_{max} \sqrt{\frac{\Delta P_{out}(i)}{\rho_w}}|^2.$$

Проверка полученной модели системы показана на рисунке 2.3. В общем случае погрешность предсказания ограничена в пределах 10%. Валидация данной модели находится в пределах допустимых значений.

В предположении, что давление газа, давление ниже по потоку водяного клапана и уровень масла внутри сепаратора являются постоянными или их отклонения от средних значений игнорируются, нелинейная модель системы линеаризуется при нормальных условиях эксплуатации.

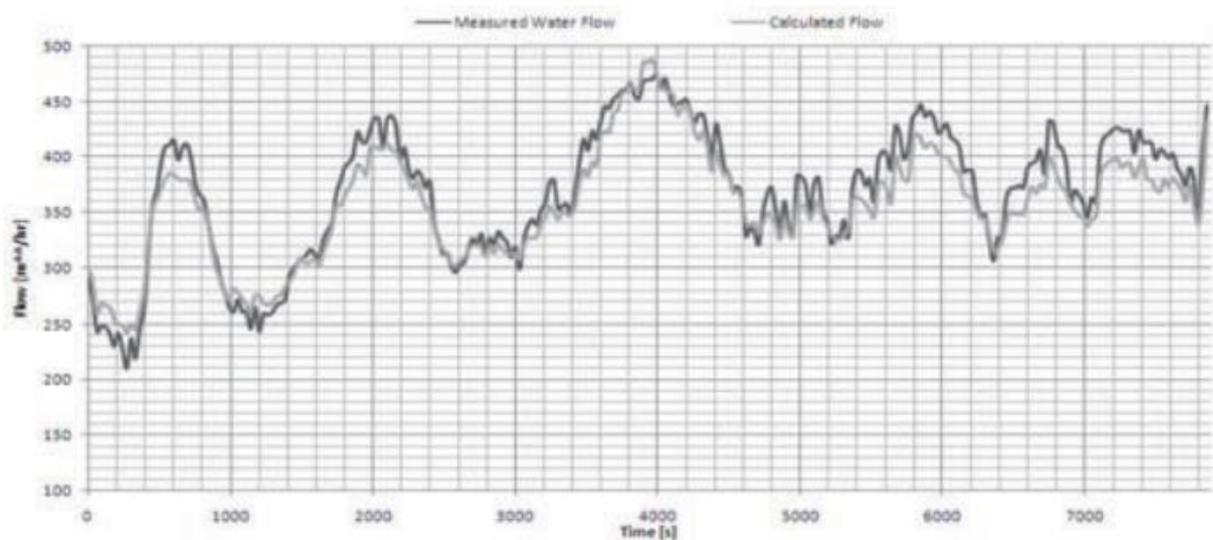


Рисунок 2.3 – Валидация модели: измеренные и прогнозируемые скорости оттока

В предположении, что давление газа, давление ниже по потоку водяного клапана и уровень масла внутри сепаратора являются постоянными или их отклонения от средних значений игнорируются, нелинейная модель системы линеаризуется при нормальных условиях эксплуатации. Вставляя конкретные параметры системы, линеаризованная модель приводит к форме:

$$47.55 \frac{d\Delta h(t)}{dt} = Q_{in}(t) - 1.81\Delta h(t) - 10.82\Delta u(t),$$

где  $\Delta h(t)$  ( $\Delta u(t)$ ) представляет отклонения уровня воды (положение клапана) до равновесия. Таким образом, передаточная функция, представляющие отношения от неизвестного возмущения  $Q_{in}(t)$  и управляющего входа  $u(t)$  к выходу  $h(t)$ , соответственно, будет выглядеть вот так:

$$G(s) = \frac{243.5s+4382}{47.55s^2+245.3s+4382}. \quad (5)$$

На рисунке 2.4 представлена структурная схема математической модели в Simulink.

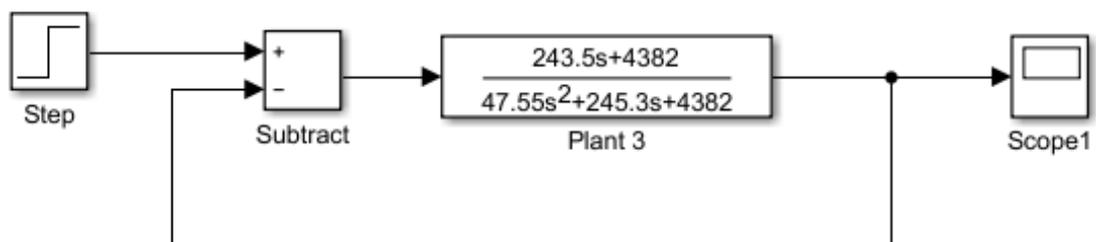


Рисунок 2.4 – Структурная схема в матлабе

Результаты моделирования представлено на рисунке 2.5.

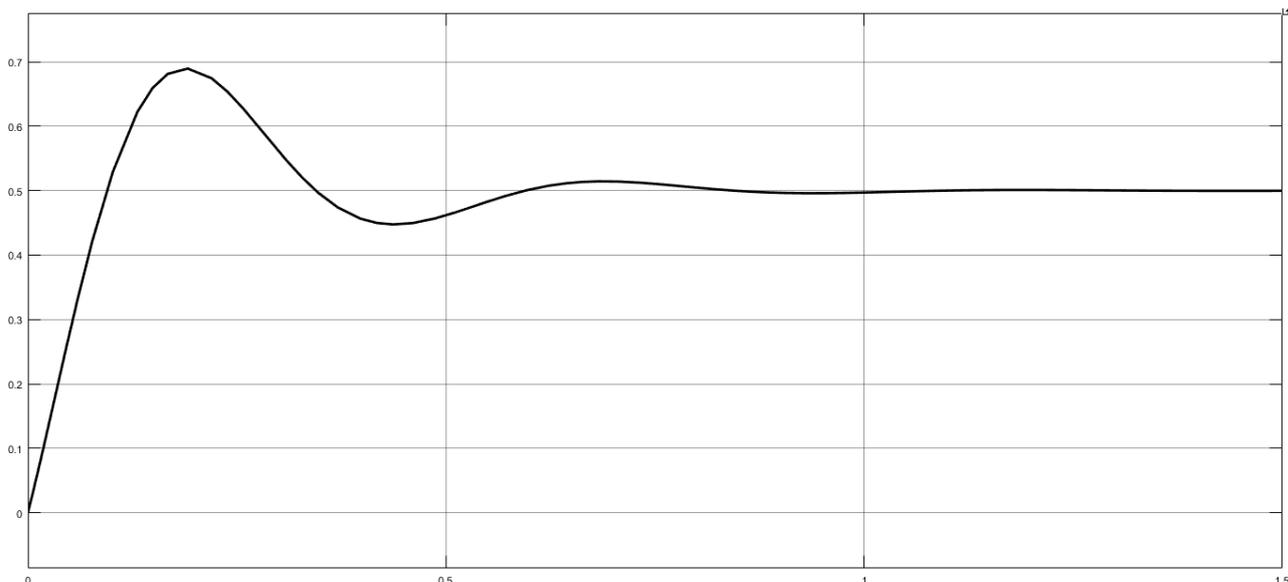


Рисунок 2.5 – Результат моделирования структурной схемы

Как видно из рисунка, система устойчива, но не приходит к желаемому значению (1) и имеется перерегулирование. С целью улучшения динамики системы синтезируем типовой регулятор.

## 2.2 Получение результатов моделирования системы автоматического управления процессами переработки нефти

Построение АФЧХ разомкнутой системы. Для построения АФЧХ сначала необходимо определить мнимые и действительные части характеристического уравнения разомкнутой системы:

$$T(s) = \frac{243.5s+4382}{47.55s^2+490.6s+8764}. \quad (6)$$

Далее нужно использовать постановку с оператора Лапласа  $s$  в комплексную переменную  $j\omega$ :

$$T(j\omega) = \frac{j243.5\omega+4382}{j^2 47.55\omega^2+j490.6\omega+8764}.$$

Для упрощения этого выражения необходимо избавиться от мнимой части в знаменателе:

$$T(j\omega) = \frac{-j11578.425\omega^3-88903\omega^2-j157752\omega+38403848}{76807696-592768.04\omega^2+2261.0025\omega^4}.$$

Отделяем действительную и мнимую часть по формуле:

$$T(jw) = \text{Re}(w) + j\text{Im}(w). \quad (7)$$

$$T(jw) = \frac{-88903w^2+38403848}{76807696-592768w^2+2261w^4} - j \frac{11578.425w^3+157752w}{76807696-592768w^2+2261w^4}.$$

Извлекаем из выражения действительную и мнимую часть:

$$\text{Re}(w) = \frac{-88903w^2+38403848}{76807696-592768.04w^2+2261.0025w^4}, \quad (8)$$

$$\text{Im}(w) = -\frac{11578.425w^3+157752w}{76807696-592768.04w^2+2261.0025w^4}. \quad (9)$$

Подбирая различные частоты, заполняется таблица 2.2

Таблица 2.2 – Таблица значений реальной и мнимой части

w	0	5	10	15	$\infty$
Re(w)	0.5	0.57	0.735	0.321	0
Im(w)	$\infty$	-0.0239	-0.296	-0.679	0

Используя данные в таблице 2.2, построим график АФЧХ разомкнутой системы, который представлен на рисунке 2.6.

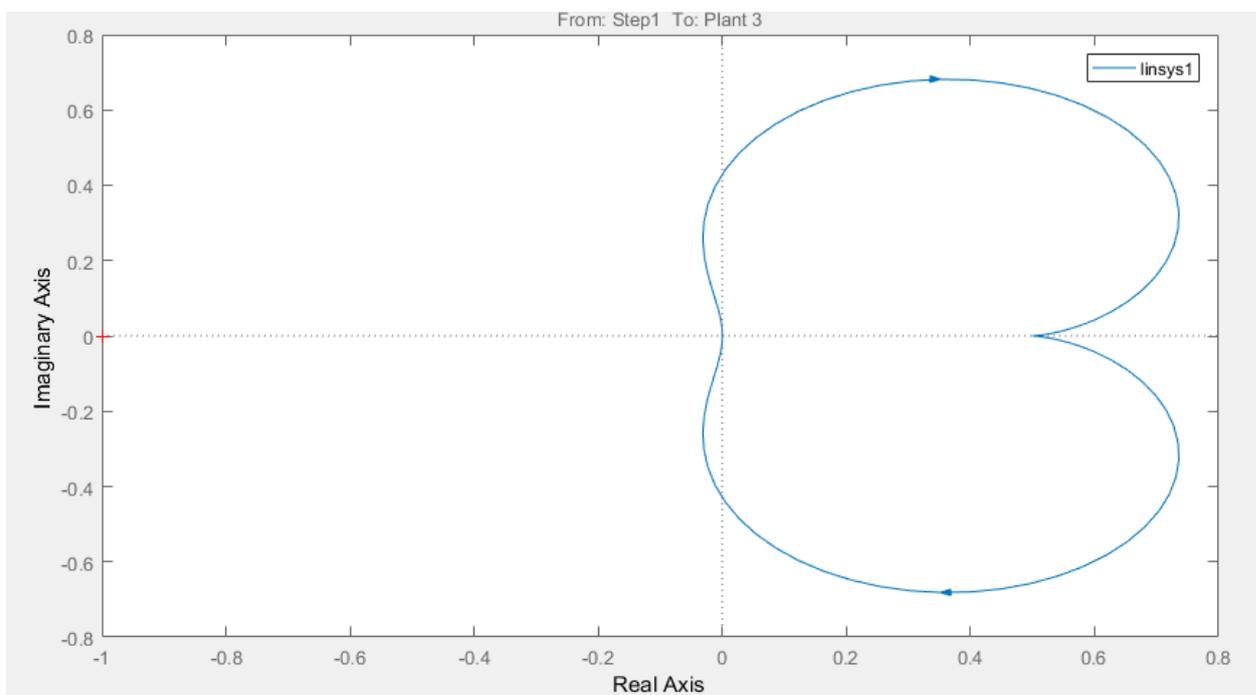


Рисунок 2.6 – График АФЧХ разомкнутой САУ

Построение АЧХ и ФЧХ разомкнутой системы. Для построения амплитудно-частотной характеристики используется нижеследующая формула

$$A(\omega) = \sqrt{\operatorname{Re}^2(\omega) + \operatorname{Im}^2(\omega)}$$

Подставляем уравнения из 8 и 9 формулы и составляем таблицу значений АЧХ.

Таблица 2.3 – Таблица значений АЧХ

$\omega$	0	10	100	$\infty$
$A(\omega)$	$\infty$	0.794	0.05	0

Используя данные в таблице 2.3, построим график АЧХ разомкнутой системы, который представлен на рисунке 2.7.

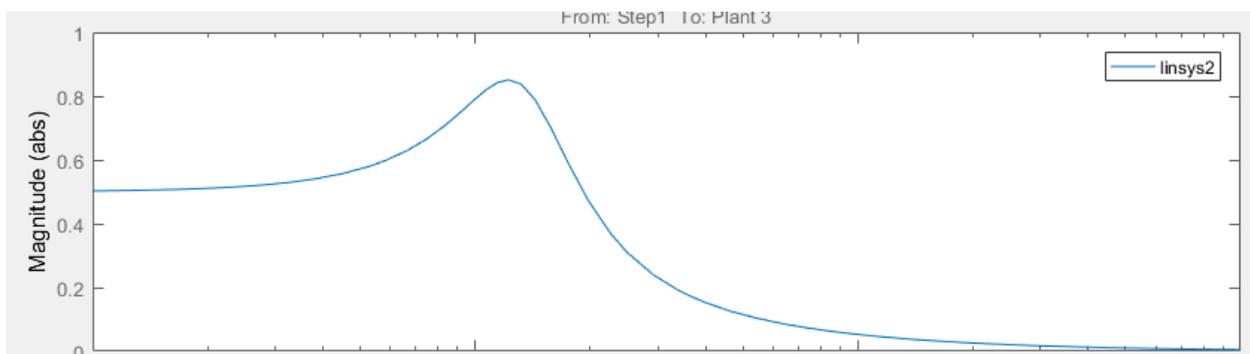


Рисунок 2.7 – График АЧХ разомкнутой системы

Для построения же фаза-частотной характеристики используется следующая формула:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{atan} \frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)}$$

Также как в предыдущих случаях давая значения  $\omega \in [0; +\infty]$ , составляется таблица 2.4 значений ФЧХ.

Таблица 2.4 – Таблица значений ФЧХ

$\omega$	0	1	10	100	1000	$\infty$
$\varphi(\omega)$	0	-0.0447	-24.1	-94.2	-90	-90

Используя данные в таблице 2.4, построим график ФЧХ разомкнутой системы, который представлен на рисунке 2.8.

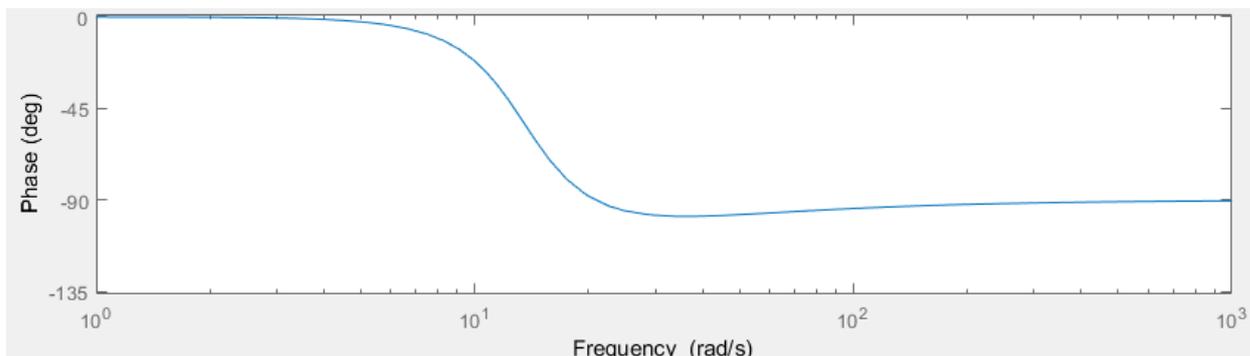


Рисунок 2.8 – График ФЧХ разомкнутой системы

Построение ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы. Для построения используется следующая формула:

$$L(\omega) = 20 \lg(A(\omega)).$$

Подставляя значения  $\omega \in [0; +\infty]$ , заполняется нижняя таблица

Таблица 2.4 – Таблица значений ЛАЧХ разомкнутой системы

$\omega$	0	1	10	100	1000
$\varphi(\omega)$	0	-5.97	-2.01	-25.6	-45

Используя данные в таблице 2.4, построим график ЛАЧХ разомкнутой системы, который представлен на рисунке 2.9.

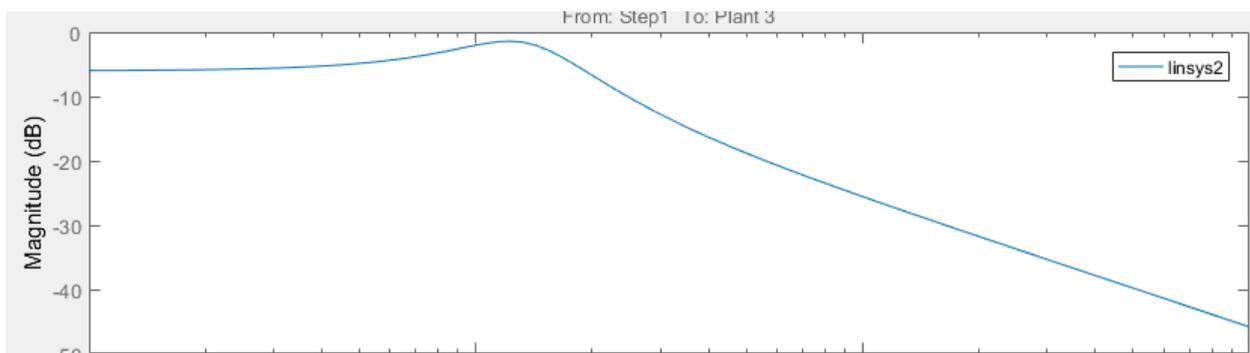


Рисунок 2.9 – График ЛАЧХ разомкнутой системы

Для ЛФЧХ используется следующая формула:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{atan} \frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)}.$$

По таблице 2.5 строится график, как показано на рисунке 2.11.

Таблица 2.5 – Таблица значений ЛФЧХ разомкнутой системы

$\omega$	0	1	10	100	1000	$\infty$
$\varphi(\omega)$	0	-0.0461	-22.1	-94.2	-90	-90

Используя данные в таблице 2.5, построим график ЛФЧХ разомкнутой системы, который представлен на рисунке 2.10.

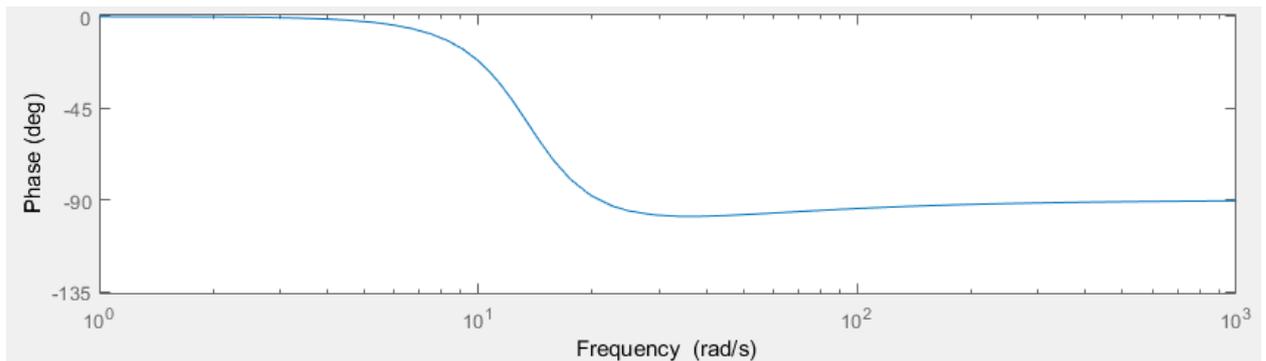


Рисунок 2.10 – График ЛФЧХ разомкнутой системы

На рисунках 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 показаны частотных характеристики математической модели (6) разомкнутой системы.

### 2.3 Анализ динамических свойств системы автоматического управления процессами переработки нефти

Исследование на устойчивость по первому методу Ляпунова разомкнутой и замкнутой системы. Передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

$$G(s) = \frac{243.5s + 4382}{47.55s^2 + 245.3s + 4382}$$

где характеристическое уравнение будет

$$47.5s^2 + 245.3s + 4382 = 0. \quad (10)$$

Корни данного уравнения:

$$\begin{aligned} s_1 &= -2.5821 + 9.2515j, \\ s_2 &= -2.5821 - 9.2515j. \end{aligned}$$

Согласно первой теореме Ляпунова, замкнутая система устойчива, так как все действительные части корней характеристического уравнения меньше нуля.

Передаточная функция разомкнутой системы записывается из формулы 6:

$$T(s) = \frac{243.5s + 4382}{47.55s^2 + 490.6s + 8764},$$

где характеристическое уравнение будет

$$47.5s^2 + 490.6s + 8764 = 0. \quad (11)$$

Решив уравнение, получится корни:

$$\begin{aligned} s_1 &= -5.1642 + 12.5632j, \\ s_2 &= -5.1642 - 12.5632j. \end{aligned}$$

Согласно первой теореме Ляпунова, разомкнутая система устойчива, так как все действительные части корней характеристического уравнения отрицательные.

Исследование разомкнутой дистанционной следящей системы на устойчивость по критерию устойчивости Гурвица. В качестве исходных данных для исследования разомкнутой системы на устойчивость по критерию Гурвица используется её характеристическое уравнение (11). Откуда следует, что параметры равны [9].

$$\begin{aligned} a_0 &= 47.5, \\ a_1 &= 490.6, \\ a_2 &= 8764. \end{aligned}$$

Затем по данным параметрам была построена матрица Гурвица:

$$\begin{vmatrix} 490.5 & 0 \\ 47.5 & 8764 \end{vmatrix},$$

Определители главных миноров равны:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= 490.5, \\ \Delta_2 &= 4298742. \end{aligned}$$

В соответствии с критерием Гурвица, разомкнутая система является устойчивой, так как все определители главных диагональных миноров больше нуля.

Исследование замкнутой дистанционной следящей системы на устойчивость по критерию устойчивости Гурвица. В качестве исходных

данных для исследования замкнутой системы на устойчивость по критерию Гурвица используется её характеристическое уравнение (10). Откуда следует, что параметры равны:

$$\begin{aligned} a_0 &= 47.5, \\ a_1 &= 243.5, \\ a_2 &= 4382. \end{aligned}$$

Затем по данным параметрам была построена матрица Гурвица:

$$\begin{vmatrix} 243.5 & 0 \\ 47.5 & 4382 \end{vmatrix}.$$

Определители главных миноров равны:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= 243.5, \\ \Delta_2 &= 1067017. \end{aligned}$$

В соответствии с критерием Гурвица, замкнутая система является устойчивой, так как все определители главных диагональных миноров больше нуля.

Исследование замкнутой системы на предельный критерий усиления и нахождения области значения коэффициента усиления для устойчивости системы. Для исследования замкнутой системы на предельный критерий усиления необходимо использовать передаточную функцию разомкнутой системы [10]:

$$T(s) = \frac{243.5s+4382}{47.55s^2+490.6s+8764}.$$

Далее необходимо разложить знаменатель на множители:

$$T(s) = \frac{235.5s+4382}{(s+10.37)(47.55s+665)}.$$

Затем нужно найти предельный коэффициент усиления, а после заменить его на  $k$ .

$$T(s) = \frac{81.3(0.18s+1)}{(s+10.37)(47.55s+665)}.$$

$$T(s) = \frac{k(0.18s+1)}{(s+10.37)(47.55s+665)}. \quad (12)$$

Далее из предаточной функции разомкнутой системы (12) получим передаточную функцию замкнутой системы с предельным коэффициентом усиления  $k$ :

$$T(s) = \frac{k(0.18s+1)}{(s+10.37)(47.55s+665)+k(0.18s+1)}. \quad (13)$$

Для того, чтобы найти области значения коэффициента усиления для устойчивости системы необходимо рассмотреть характеристическое уравнение (выражение 13) и затем построить матрицу Гурвица:

$$(s + 10.37)(47.55s + 665) + k(0.18s + 1) = 0,$$

$$47.55s^2 + (712.31 + 0.18k)s + 689.3 + k = 0,$$

$$\begin{vmatrix} 712.31 + 0.18k & 0 \\ 47.55 & 689.3 + k \end{vmatrix}.$$

Далее найдем определитель матрицы:

$$\Delta = 0.18k^2 + 208.31k + 301 > 0. \quad (14)$$

Решим неравенство 14:

$$k_1 > 0,$$

$$k_2 \in (-32.8; 28.31),$$

$$k \in (0; 28.31).$$

Была найдена область значений коэффициента усиления для устойчивости, а также найден предельный коэффициент усиления замкнутой системы  $k_{пр1} = 0, k_{пр2} = 28.31$ .

#### **2.4 Оценки качества переходного процесса замкнутой системы автоматического управления процессами переработки нефти**

Прямые оценки качества переходного процесса замкнутой системы автоматического управления процессами переработки нефти. Исходными данными для прямой оценки качества переходного процесса является замкнутая система. Используя Liner Analysis Point обозначаются входные и выходные точки для оценки качества системы. Через контекстное меню Analysis – Control Design – Liner Analys открывается окно для прямой оценки, которое показано на рисунке 2.11. После получения переходного процесса объекта управления, необходимо отобразить основные данные оценки

качества нажатием на правую клавишу мыши и выбрав в контекстном меню пункты Characteristics – Peak Response; Rise Time; Settling Time; Steady State.

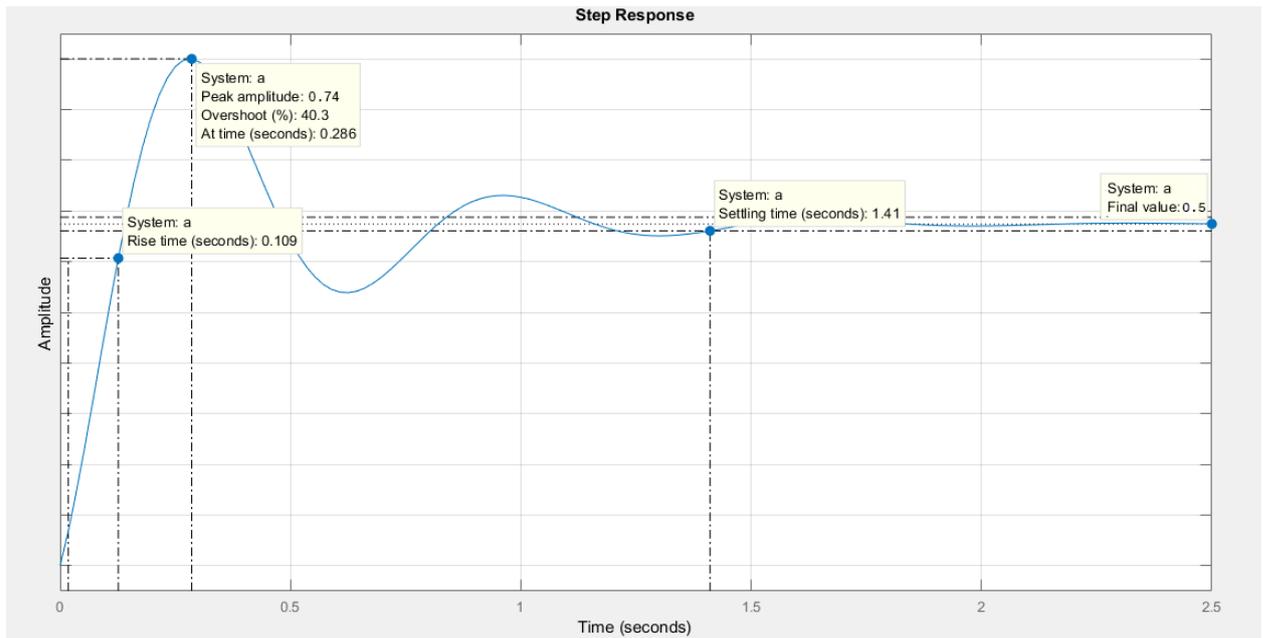


Рисунок 2.11 – Переходной процесс замкнутой системы

Из графика можно получить следующие данные касательно прямой оценки:

- Перерегулирование:  $P_{ov} = 40,3\%$ , время достижения первого максимума:  $T_{I_{max}} = 0,286$  секунд;
- Время регулирования:  $T_{set} = 1,41$  секунд;
- Установившийся значение:  $y_{ss} = 0.5$ ;
- Время нарастания:  $T_{set} = 0.109$  секунд.

По этим данным можно получить полную прямые оценки качества замкнутой системы:

- Время регулирования:  $T_{set} = 1,41$ ;
- Перерегулирование:  $P_{ov} = 40,3\%$ ;
- Количество колебаний:  $n = 2$ ;
- Колебательность:  $\mu = 0.08/0.40 * 100\% = 20\%$ ;
- Частота колебаний:  $w = 2\pi/T = 9.2$ ;
- Время достижения первого максимума:  $T_{I_{max}} = 0,286$ ;
- Время нарастания:  $T_r = 0.109$ ;
- Установившийся ошибка:  $e_{ss} = 0.5$
- Декремент затухания:  $\chi = 6$ .

Косвенные оценки качества переходного процесса замкнутой системы автоматического управления процессами переработки нефти. Исходными данными для косвенной оценки качества переходного процесса является замкнутая система. Также как с прямыми оценками через LTI viewer создаются входные и выходные точки и добавляются в окно LTI analysis.

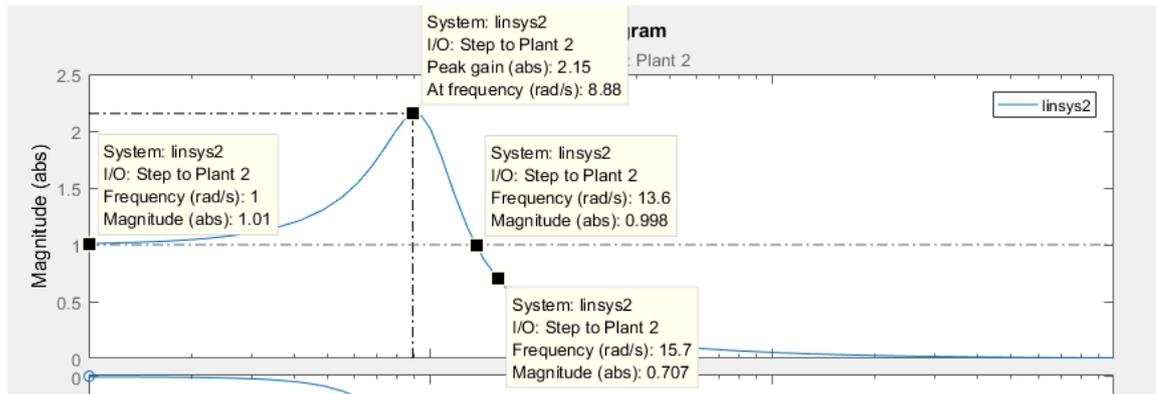


Рисунок 2.12 – Косвенные оценки качества замкнутой системы

Из графика можно получить следующие данные, по косвенной оценке, качества:

- Частота среза: 13.8
- Полоса пропускания:  $[0; 15.7]$ ;
- Резонансная частота:  $\omega_r = 8.88$  при  $A_{\max} = 2.15$

По этим данным можно получить полные косвенные оценки качества замкнутой системы:

- Резонансная частота:  $\omega_r = 8.88$
- Полоса пропускания системы:  $[0; 15.7]$ ;
- Колебательность системы:  $\mu = 2.15/1 = 2.15$ ;
- Частота среза: 13.8;

Далее необходимо получить косвенные оценки качества замкнутой системы автоматического управления процессами переработки нефти на основе корневых методов. Используя LTI viewer, можно получить карту нулей и полюсов, как показано на рисунке 2.13.

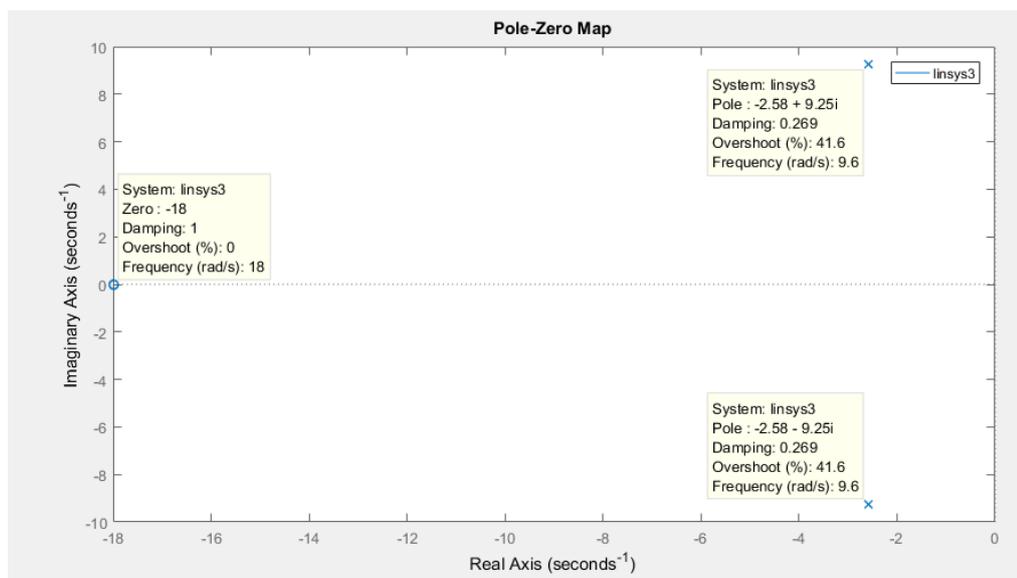


Рисунок 2.13 – Полюса и ноль на комплексной плоскости

По графику можно получить следующие данные:

$$s_1, s_2 = -2.58 \pm j9.25, \\ s_3 = -18.$$

Получим следующие оценки качества замкнутой системы автоматического управления процессами переработки нефти:

1. Время регулирования:

$$T_{\text{set}} = \frac{4}{|\sigma|} = \frac{4}{2.58} = 1.55 \text{ с.}$$

2. Перерегулирование:

$$P_{\text{ov}} = e^{-\frac{\varepsilon \cdot \pi}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}} * 100\% = e^{-8.77} * 100\% = 41\%.$$

3. Максимальное значение,  $y_{\text{max}}$ :

$$y_{\text{max}} = y_f \left( 1 + \frac{P_{\text{ov}}}{100} \right) = 1.4.$$

4. Степень колебательности:

$$\mu = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{9.25}{2.58} = 3.58\%.$$

5. Частота колебаний:

$$\omega = \omega_n \sqrt{1 - \varepsilon^2} = 9.6 \sqrt{1 - 0.269^2} = 9.2 \text{ с}^{-1}.$$

6. Время достижения первого максимума:

$$T_{1\text{max}} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \varepsilon^2}} = \frac{3.14}{9.6 \sqrt{1 - 0.269^2}} = 0.34 \text{ с.}$$

7. Быстродействие и степень устойчивости:

$$\eta = |\sigma_{\text{min}}| = 2.58.$$

Полученные данные косвенных оценок вставляется в таблицу 2.6 и сравнивается с прямыми оценками качества.

Таблица 2.6 – Оценки качества замкнутой системы

	№	Оценка качества		Прямые	Косвенные	Соответствие требованиям
Основные	1	Время регулирования	$T_{set}$	1.41	1.55	Не соответствует
	2	Перерегулирование	$P_{ov}$	48.3%	41%	Не соответствует
	3	Число колебаний	$n$	2	2	Соответствует
	4	Колебательность	$\mu$	16%	3.58%	Не соответствует
	5	Частота колебаний	$w$	9.2	9.2	Соответствует
	6	Установившаяся ошибка	$e$	0	0	Соответствует
Дополните	7	Время достижения первого максимума	$T_{lmax}$	0.286	0.34	
	8	Время нарастания	$T_r$	0.109	-	
	9	Декремент затухания	$\chi$	6	-	

Вывод: Перерегулирование составляет 48.3%, что не соответствует желаемому значению 30%, колебательность составляет 16%, что также не соответствует желаемым требованиям. В соответствии с этим необходимо синтезировать типовой регулятор. С целью улучшения перерегулирования введем интегрирующую составляющую в регулятор, с целью уменьшения колебательности введем дифференцирующую составляющую, с целью уменьшения времени регулирования введем пропорциональную составляющую. В качестве критерия качества выберем квадратично-интегральный критерий качества, так как он дает общую оценку времени регулирования и степень отклонения заданной величины от желаемого значения в переходном процессе.

## 2.5 Применение Smart-технологии (метода роевого интеллекта) для синтеза типового регулятора системы автоматического управления процессами переработки нефти

**Постановка задач:** для математической модели объекта управления (6) необходимо синтезировать ПИД-регулятор:

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{d(t)},$$

используя алгоритм роя частиц, где рассматривается целевая функция  $f(x)$ :

$$f(x) = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \rightarrow \min,$$

которая непрерывно ограничена областью  $ub$  и  $lb$  и найти приближенное минимальное значение функции  $f^*(x)_{\min}$  или координату  $x^*_{\min}$ , в которой это значение достигается с заданной допустимой  $vMax$  и  $vMin$ .

$$f_{\min} = \min f(x) = f(x_{\min}), \quad (15)$$

$$f^*_{\min} = f(x^*_{\min}) \leq f_{\min} + \varepsilon, \quad (16)$$

где  $\varepsilon$  – допустимая скорость, в нашем случае  $vMax$ ,  $vMin$ .

Трехфазные сепараторы используются для разделения скважинной сырой нефти на три части: воду, нефть и газ. Для обеспечения оптимальной работы трехфазного сепаратора должна быть создана соответствующая система управления. Текущая методика настройки ПИД не обеспечивает оптимальную реакцию системы сепаратора. Реакция на превышение скорости, смещение, установившаяся ошибка и нестабильность системы – вот некоторые из проблем, с которыми приходится сталкиваться. Кроме того, используемый в настоящее время метод основан исключительно на пробах и ошибках, что отнимает много времени. [11]

Существует возможность для совершенствования существующей методики настройки ПИД. Для улучшения отклика системы трехфазного сепаратора вводится метод ПИД-настройки искусственного интеллекта (AI), называемый оптимизацией роя частиц (PSO) [12].

Алгоритм PSO имитирует поведение стаи птиц и стай рыб, стремящихся к своему глобальному наилучшему положению [13]. В нашем случае глобальная наилучшая позиция заменяется оптимизированными параметрами настройки ПИД для сепаратора. Алгоритм PSO был использован в нескольких других приложениях, таких как бесщеточный двигатель постоянного тока и в системе управления шариком и Лучом. Это оказалось эффективным методом

настройки. Настройка трехфазного сепаратора с помощью PSO может оказаться эффективным решением для нефтегазовой промышленности.

Для настройки регулятора уровня трехфазного сепаратора был введен метод искусственного интеллекта (ИИ), известный как оптимизация роя частиц (PSO).

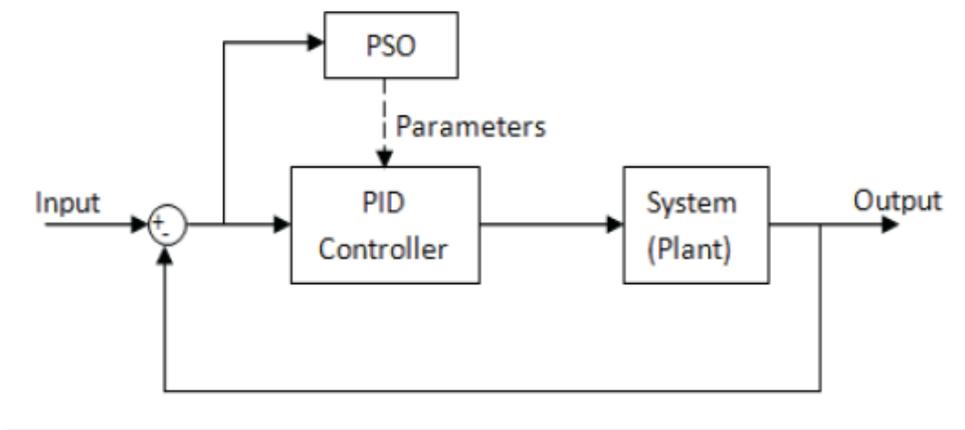


Рисунок 2.14 – Реализация PSO в ПИД-регуляторе

Рассматривая рой с частицами  $P$ , существует вектор положения  $X_i^t = (x_{i1} x_{i2} x_{i3} \dots x_{in})^T$  и вектор скорости  $V_i^t = (v_{i1} v_{i2} v_{i3} \dots v_{in})^T$  на  $t$ -й итерации для каждой из составляющих ее  $i$ -частиц. Эти векторы обновляются через размерность  $j$  в соответствии со следующими уравнениями:

$$V_{ij}^{t+1} = wV_{ij}^t + c_1 r_1^t (pbest_{ij} - X_{ij}^t) + c_2 r_2^t (gbest_j - X_{ij}^t), \quad (17)$$

$$X_{ij}^{t+1} = X_{ij}^t + V_{ij}^{t+1}. \quad (18)$$

Уравнение 17 изменяет вектор скорости при каждой итерации. Уравнение 18 обновляет положение частицы. Этот параметр важен для балансировки глобального поиска, также известного как разведка (когда установлены более высокие значения), и локального поиска, известного как эксплуатация (когда установлены более низкие значения).

Первое слагаемое уравнения обновления скорости, формула 17, является произведением между параметром  $w$  и предыдущей скоростью частицы, поэтому он обозначает предыдущее движение частицы в текущую. Следовательно, например, если  $w = 1$ , то движение частицы полностью зависит от ее предыдущего движения, поэтому частица может продолжать двигаться в том же направлении. С другой стороны, если  $0 \leq w < 1$ , то такое влияние уменьшается, а это значит, что частица скорее переходит в другие области области поиска. Таким образом, по мере уменьшения параметра инерционного веса рой может исследовать больше областей в области поиска, а это означает, что шансы найти глобальный оптимум могут увеличиться.

Однако существует цена при использовании более низких значений  $w$ , то есть моделирование оказывается более трудоемким.

Второе слагаемое уравнения вычисляется с помощью разности между собственным лучшим положением частицы, в этом случае  $pbest_{ij}$ , и ее текущим положением  $X_{ij}^t$ . Концепция, лежащая в основе этого слагаемого, заключается в том, что по мере удаления частицы от положения  $pbest_{ij}$  разница  $(pbest_{ij} - X_{ij}^t)$  должна увеличиваться; следовательно, это слагаемое увеличивается, привлекая частицу к ее лучшему собственному положению. Параметр  $C1$ , существующий как произведение в этом выражении, является положительной константой, и он взвешивает важность собственного предыдущего опыта частицы. Другим параметром, составляющим произведение второго члена, является  $r1$ , и это случайный параметр с диапазоном  $[0,1]$ . Этот случайный параметр играет важную роль, так как позволяет избежать преждевременных конвергенций, увеличивая наиболее вероятные глобальные оптимумы.

Наконец, третье слагаемое – это социальное обучение. Благодаря этому все частицы в рое способны делиться информацией о наилучшей достигнутой точке независимо от того, какая частица ее нашла, например  $gbest_j$ . Его вид точно такой же, как и второе слагаемое, тот, что касается индивидуального обучения. Таким образом, разность  $(gbest_j - X_{ij}^t)$  действует как притяжение частиц к лучшей точке, пока не будет найдена на некоторой  $t$ -й итерации. Точно так же  $c2$  – это параметр социального обучения, и он взвешивает важность глобального обучения Роя и  $r2$  играет точно такую же роль, как и  $r1$ .

На рисунке 2.15 показана логика роя частиц для оптимизации ПИД-регулятора:

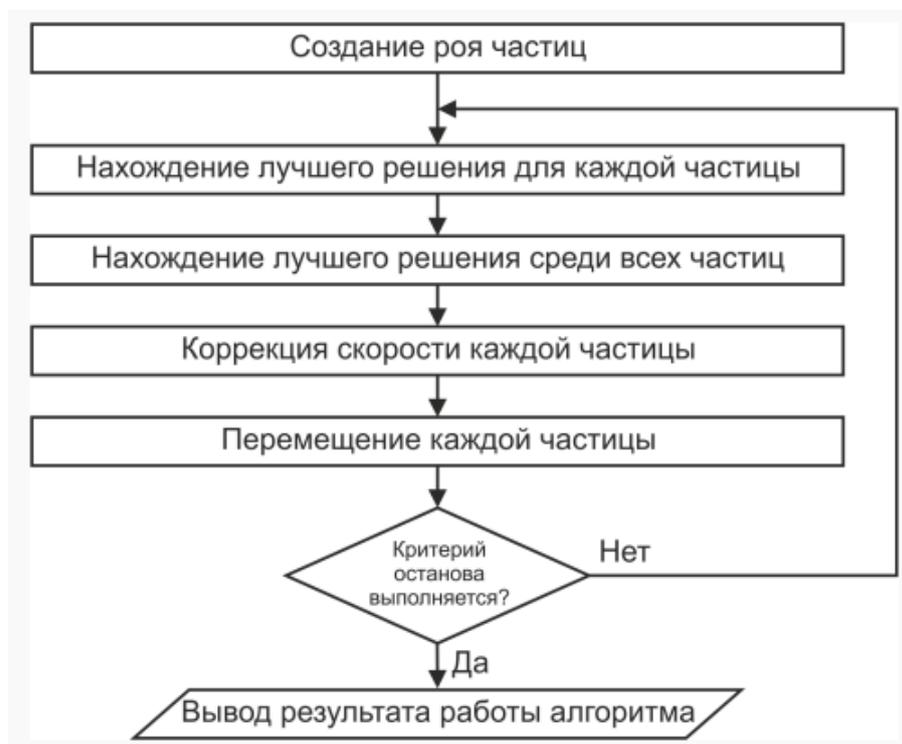


Рисунок 2.15 – Логика роя частиц

В начале в некоей плоскости (область поиска) случайно создается рой частиц, где у каждой частицы свой вектор скорости. В каждой точке координат, где была частица высчитывается значение целевой функции. Каждая частица запоминает самое лучшее значение и его координаты. После каждой итерации частицы корректируют свою скорость относительно лучшему значению целевой функции, чтобы быть как можно ближе к нему уменьшая расстояние, то есть ошибку также быть ближе к глобальному лучшему значению. Через некоторое время частицы должны собраться в одном месте и найти самое подходящее значение с допустимой погрешностью  $\varepsilon$  [14].

Логика алгоритма для данной работы показана на рисунке 2.16.

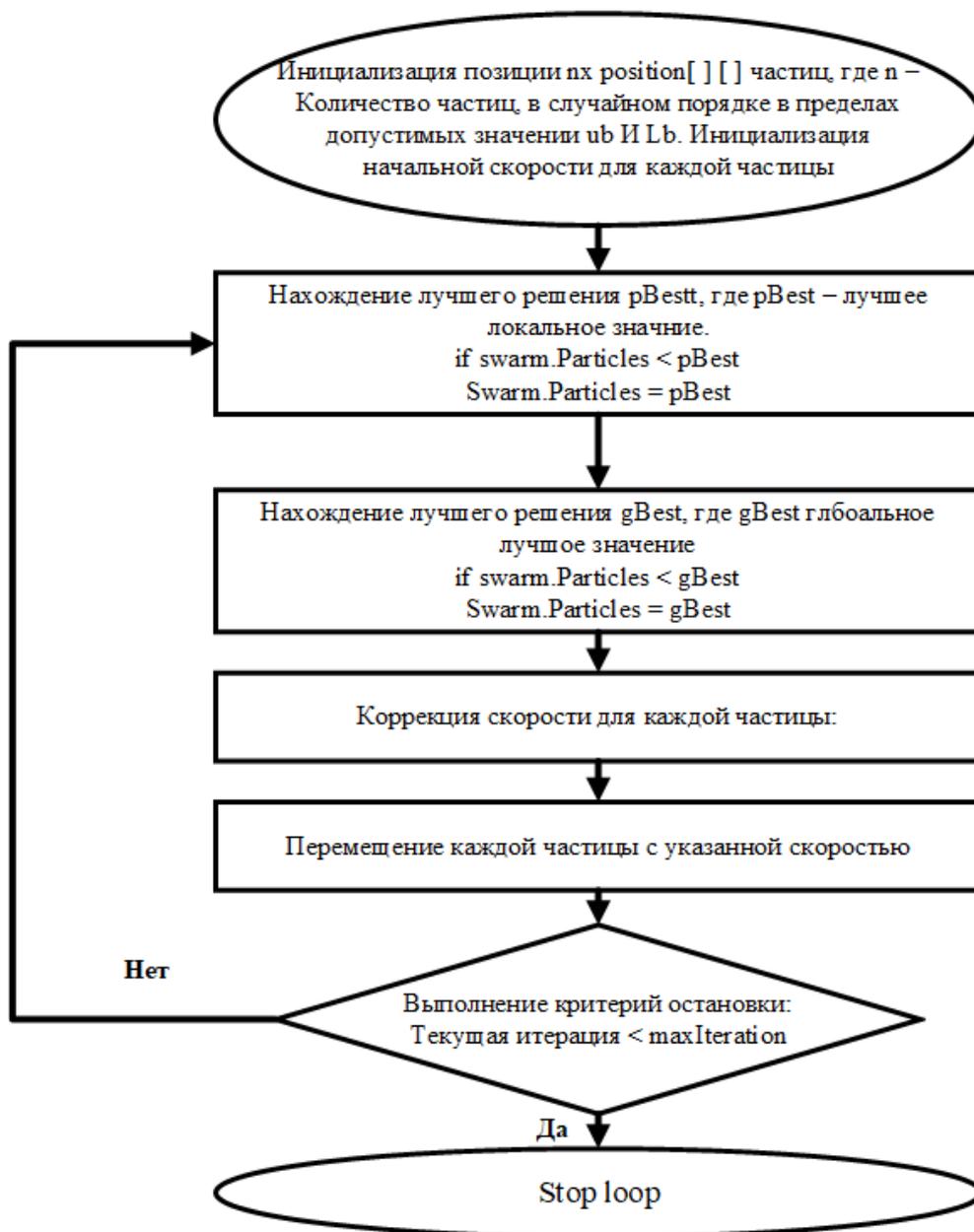


Рисунок 2.16 – Алгоритм PSO для объекта управления

На основе этой логики и будет построен алгоритм для оптимизации ПИД-регулятора. Сначала необходимо объявить переменные начальной популяции роя, максимальное количество роя (птиц), инерция и скорость движения роя, рисунок 2.17 [15].

```
clear
clc
n = 50;           % Size of the swarm " no of birds "
bird_setp = 50;  % Maximum number of "birds steps"
dim = 2;         % Dimension of the problem

c2 = 1.2;        % PSO parameter C1
c1 = 0.12;       % PSO parameter C2
w = 0.9;         % pso momentum or inertia
fitness=0*ones(n,bird_setp);
```

Рисунок 2.17 – Дефолтная функция объявления переменных

Необходимо инициализировать начальные позиции роя, их скорость и лучшую позицию, рисунок 2.18.

```
current_position = 10*(rand(dim, n)-.5);
velocity = .3*randn(dim, n) ;
local_best_position = current_position ;
```

Рисунок 2.18 – Инициализация начальных условий

Создается начальная популяция, рисунок 2.19.

```
for i = 1:n
    current_fitness(i) = tracklsq(current_position(:,i));
end

local_best_fitness = current_fitness ;
[global_best_fitness,g] = min(local_best_fitness) ;

for i=1:n
    globl_best_position(:,i) = local_best_position(:,g) ;
end
```

Рисунок 2.19 – Создание начальной популяции

Вычисляется значение частицы, рисунок 2.20.

```
for k = 1 : noP
    currentX = Swarm.Particles(k) .X;
    Swarm.Particles(k) .O = fobj(currentX) ;
```

Рисунок 2.20 – Вычисление значения частицы

Далее необходимо найти локальное лучшее значение частицы pBest, если текущее значение лучше pBest, нужно обновить их, рисунок 2.21.

```
if Swarm.Particles(k).O < Swarm.Particles(k).PBEST.O
    Swarm.Particles(k).PBEST.X = currentX;
    Swarm.Particles(k).PBEST.O = Swarm.Particles(k).O;
end
```

Рисунок 2.21 – Нахождение и обновление pBest

Согласно нарисованному на рисунке 2.16 алгоритму необходимо найти глобальное лучшее значение частицы gBest и обновить его, рисунок 2.22.

```
if Swarm.Particles(k).O < Swarm.GBEST.O
    Swarm.GBEST.X = currentX;
    Swarm.GBEST.O = Swarm.Particles(k).O;
end
```

Рисунок 2.22 – Нахождение и обновление gBest

Далее нужно изменить инерционность исходя из количества итерации, показан на рисунке 2.23.

```
% Update the X and V vectors
w = wMax - t .* ((wMax - wMin) / maxIter);
```

Рисунок 2.23 – Изменение инерционности

При приближении к лучшему значению необходимо обновить скорость роя, рисунок 2.24.

```
velocity = w *velocity + c1*(R1.*(local_best_position-current_position)) + c2*(R2.*(globl_best_position-current_position));
```

Рисунок 2.24 – Обновление скорости

После изменения скорости нужно проверить скорость согласно ограничениям vMax и vMin, рисунок 2.25

```
index1 = find(Swarm.Particles(k).V > vMax);
index2 = find(Swarm.Particles(k).V < vMin);

Swarm.Particles(k).V(index1) = vMax(index1);
Swarm.Particles(k).V(index2) = vMin(index2);

Swarm.Particles(k).X = Swarm.Particles(k).X + Swarm.Particles(k).V;
```

Рисунок 2.25 – Проверка скорости

Далее нужно проверить позиции согласно ограничениям  $ub$  и  $lb$ , рисунок 2.26.

```
index1 = find(Swarm.Particles(k).X > ub);  
index2 = find(Swarm.Particles(k).X < lb);  
  
Swarm.Particles(k).X(index1) = ub(index1);  
Swarm.Particles(k).X(index2) = lb(index2);
```

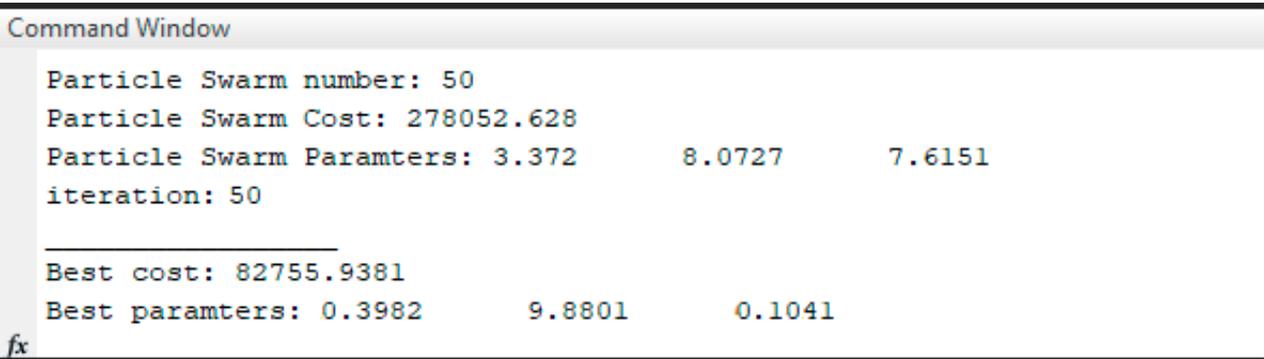
Рисунок 2.26 – Проверка позиции

Интегральный критерий качества относительно абсолютного значения от ошибки пишется в другой файл для удобства, рисунок 2.27.

```
err = 1-y;  
error1=err*err';  
ise=abs(sum(err))  
o = ise;  
end
```

Рисунок 2.27 – Интегральный критерий качества

При успешном написании кода в конце командной строке выйдут параметры ПИД-регулятора, как показано на рисунке 2.28.



```
Command Window  
Particle Swarm number: 50  
Particle Swarm Cost: 278052.628  
Particle Swarm Paramters: 3.372      8.0727      7.6151  
iteration: 50  
  
Best cost: 82755.9381  
Best paramters: 0.3982      9.8801      0.1041  
fx
```

Рисунок 2.28 – Результат выполнения алгоритма роя частиц (PSO)

В итоге получены параметры  $K_p = 0.3982$ ;  $K_i = 9.8801$ ;  $K_d = 0.1041$  для ПИД-регулятора:

$$u(t) = 0.3982 \cdot e(t) + \frac{1}{9.8801} \int e(t)dt + 0.1041 \frac{de(t)}{d(t)}. \quad (19)$$

Далее эти коэффициенты вводятся в настройки ПИД-регулятора и сравнивается с обычной системой без регулятора в среде MATLAB.

На рисунке 2.29 представлена схема моделирования в среде Simulink математической модели трехфазного сепаратора с ПИД-регулятором PSO (19), ПИД регулятором Autotune и без ПИД-регулятора.

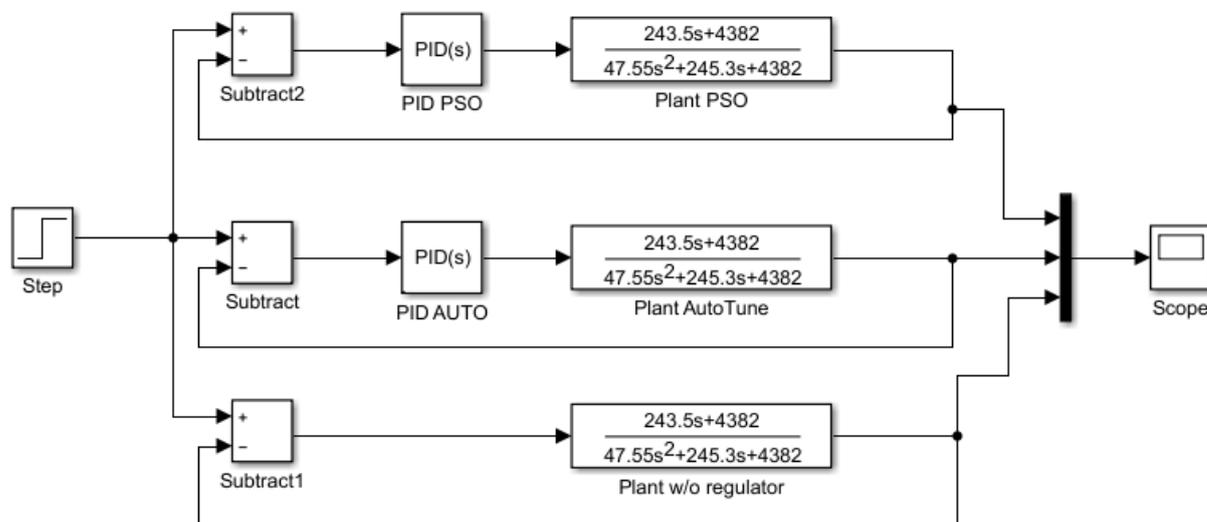


Рисунок 2.29 – Структурная схема для сравнения переходных процессов с регулятором и без регулятора

На рисунке 2.30 показан график переходного процесса системы с ПИД-регулятором PSO показана черным цветом, ПИД-регулятором AutoTune показана красным цветом и системы без ПИД-регулятора, показана синим цветом.

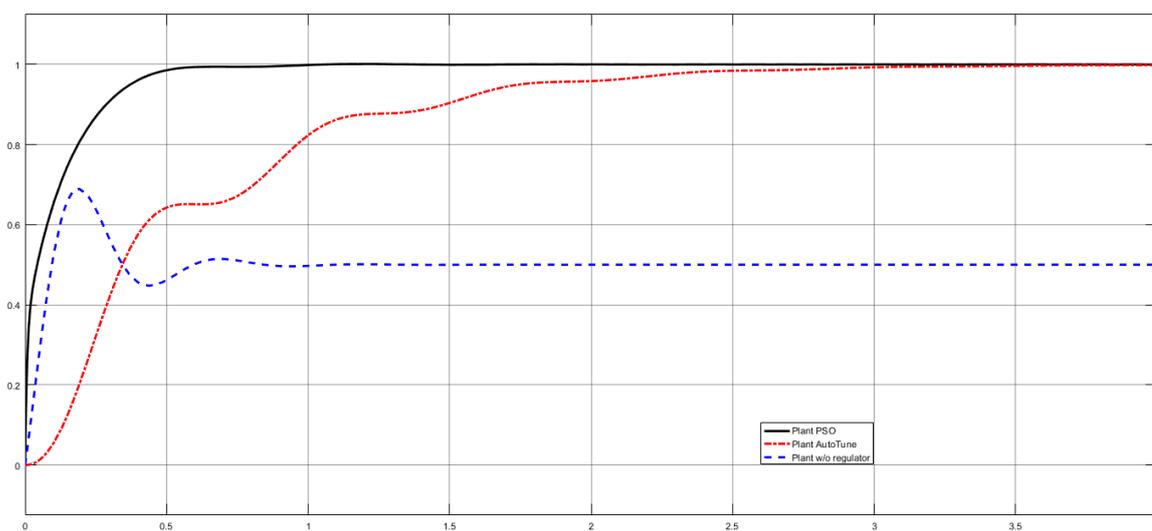


Рисунок 2.30 – График переходных процессов

Как видно из рисунка, график системы с ПИД-регулятором приходит к установившемуся значению, сводя ошибку к нулю, улучшилось быстродействие системы. Для более наглядного сравнения системы с ПИД-

регулятором на основе алгоритма роя частиц, с ПИД-регулятором AutoTune и без ПИД-регулятора составим таблицу 2.7.

Таблица 2.7 – Оценки качества замкнутой системы с регуляторами

	№	Оценка качества		Без регулятора	TUNE	PSO
Основные	1	Время регулирования	$T_{set}$	1.41	3.6	1
	2	Перерегулирование	$P_{ov}$	40.3%	0%	0%
	3	Число колебаний	$n$	2	3	0
	4	Колебательность	$\mu$	16%	0	0
	5	Частота колебаний	$w$	9.2	0	0
	6	Установившаяся ошибка	$e$	0.5	0	0
Дополните	7	Время достижения первого максимума	$T_{1max}$	0.286	0.65	1
	8	Время нарастания	$T_r$	0.109	0.5	0.8
	9	Декремент затухания	$\chi$	6	3.1	0

Исходя из данных в таблице, можно сделать вывод, что система с ПИД-регулятором на основе алгоритма роя частиц обладает лучшим временем регулирования – 1с, отсутствие перерегулирования, система монотонна, установившаяся ошибка равна 0. Система с ПИД-регулятором AutoTune обладает довольно таки большим временем регулирования по сравнению с системами без ПИД-регулятора и с ПИД-регулятором PSO и равна 3.6с. Также отсутствует перерегулирование, но при этом имеется 3 колебания. Установившаяся ошибка равна нулю. Система без ПИД-регулятора обладает перерегулированием 40.3%, что превосходит допустимое значение в 30%, также установившаяся ошибка равна 0.5, что и является главной проблемой, задача которой была решена с использованием ПИД-регулятора на основе метода роя частиц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первой главе был описан технологический процесс переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе. Также, были рассмотрены виды сепараторов, их главные отличия, преимущества и недостатки. Затем был подробно разобран трехфазный вертикальный сепаратор, установленный на Павлодарском нефтехимическом заводе, который играет важную роль в очистке нефти от газа и воды.

Во второй главе была разработана схема переработки газа на Павлодарском нефтехимическом заводе, было произведено моделирование и получение результатов моделирования системы автоматического управления процессами переработки нефти. Был произведен анализ динамических свойств системы автоматического управления процессами переработки нефти. Как результат, система устойчива.

Были произведены расчеты оценок качества переходного процесса автоматического управления процессами переработки нефти. Система имела перерегулирование 40.3% , значение ошибки было 0.5, а также были 2 колебания. Процент колебательности составил 16% . С целью улучшения данной системы был построен ПИД-регулятор на основе Smart технологий с использованием алгоритма роя частиц. Система с ПИД-регулятором на основе роя частиц имеет время регулирования 1с, что является нормальным показателем, отсутствуют колебания, а также была решена главная задача построенного ПИД-регулятора – установившаяся ошибка стала равна нулю.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Проскурякова В.А. Химия нефти и газа - СПб: Химия, 2005. – 358 с.
- 2 Черножуков Н.И. Технология переработки нефти и газа. - М.: Химия, 2005. – 378 с.
- 3 ГОСТ 8.346-79 – Резервуары стальные горизонтальные. Методы и средства. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ).
- 4 РТМ 108.711.02-79 Пропускная способность регулирующего клапана.
- 5 ГОСТ 21.208-2013 – Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации.
- 6 Selvi J., Radhakrishnan T., Sundaram S. Performance assessment of pid and imc tuning methods for a mixing process with time delay. ISA Transactions, 2007 – pp 391-397.
- 7 Wu K., Yu C, Cheng Y. A two degree of freedom level control. Journal of Process Control, 2001 – pp 311-319.
- 8 Zhenyu Y., Juhl M., Lohndorf B. On the innovation of level control of an offshore three-phase separator. Mechatronics and Automation (ICMA), 2010. pp. 1348-1353.
- 9 Воронов А.А. Теория автоматического управления. Часть 1. - Москва: Высшая школа, 1986. – 367 с
- 10 Воронов А. А. Теория автоматического управления. Часть 2. - Москва: Высшая школа, 1986. – 367 с
- 11 Sayda A.F., Taylor J. H. Modeling and Control of Three-Phase Gravity Separators in Oil Production Facilities. American Control Conference, 2007 – pp. 4847-4853.
- 12 Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы вдохновленные природой: учебное пособие / А. П. Карпенко. - 2-е изд. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 44с.
- 13 Мусаев, А.А. Интеллектуальный анализ данных: учебное пособие. – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2018. – 56 с.
- 14 Nasri M., Nezamabadi-Pour H., Maghfoori M. A PSO-based optimum design of PID controller for a linear brushless DC motor. World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 26, 2007 – pp.211-215.
- 15 Del Valle Y., Venayagamoorthy G. K., Mohagheghi S., Hernandez J.-C. Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems. Evolutionary Computation, IEEE Transactions, vol. 12. 2008 – pp. 171-195.

**ОТЗЫВ  
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

На дипломную работу  
Кокишев Дамир Алтынбекович  
5В070200 – Автоматизация и управление

Тема: «Исследование системы автоматического управления процессами переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе на основе Smart-технологий»

Перед дипломантом ставилась задача исследования системы автоматического управления процессами переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе на основе Smart-технологий.

В первом разделе данной дипломной работы был исследован технологический процесс переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе.

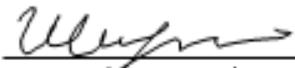
Во втором разделе разработана схема и проведено моделирование процессов переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе. Получены результаты моделирования системы автоматического управления процессами переработки нефти. Проведён анализ динамических свойств системы автоматического управления процессами переработки нефти. Получены оценки качества переходного процесса замкнутой системы автоматического управления процессами переработки нефти.

На основе результатов моделирования был применён метод роевого интеллекта, в качестве Smart-технологии, для синтеза типового регулятора системы автоматического управления процессами переработки нефти.

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

Заключение: Считаю, что дипломант справился с поставленной задачей, дипломная работа соответствует требованиям, предъявляемым к дипломным работам по специальности 5В070200 – Автоматизация и управление. На основании характеристики выполненных исследований, уровня и качества выполненных результатов студент Кокишев Д.А. допускается к защите.

**Научный руководитель**  
ассоциированный профессор, канд.техн.наук

 Ширяева О.И.  
(подпись)

«20» мая 2020 г.

## 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:** Кокишев Дамир

**Название:** Исследование системы автоматического управления процессом переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе на основе Smart-технологий

**Координатор:** Ольга Ширяева

**Коэффициент подобия 1:** 9

**Коэффициент подобия 2:** 1.9

**Замена букв:** 8

**Интервалы:** 0

**Микропробелы:** 0

**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: 9 и Коэффициент подобия 2: 1.9. Не нулевые коэффициенты подобия объясняются тем, что в дипломной работе были использованы общепринятые термины теории управления. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. Обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными. В связи с этим, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите перед государственной комиссией.

28.05.2020

Дата



Подпись Научного руководителя

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

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

**Автор:** Кокишев Дамир

**Название:** Исследование системы автоматического управления процессом переработки нефти на Павлодарском нефтехимическом заводе на основе Smart-технологий

**Координатор:** Ольга Ширяева

**Коэффициент подобия 1:** 9

**Коэффициент подобия 2:** 1.9

**Замена букв:** 8

**Интервалы:** 0

**Микропробелы:** 0

**Белые знаки:** 0

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

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, работа признается самостоятельной и допускается 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, работа не допускается к защите.
- Обоснование: В результате проверки на антиплагиат были получены практически нулевые коэффициенты: Коэффициент подобия 1: 9 и Коэффициент подобия 2: 1.9. Не нулевые коэффициенты подобия объясняются тем, что в дипломной работе были использованы общепринятые термины теории управления. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, работа признается самостоятельной и допускается к защите.

28.05.2020

Дата



\_\_\_\_\_  
Подпись заведующего кафедрой /  
начальника структурного подразделения

Окончательное решение в отношении допуска к защите, включая обоснование:  
Дипломная работа допускается к защите.

28.05.2020

Дата



\_\_\_\_\_  
Подпись заведующего кафедрой /  
начальника структурного подразделения