

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

Гурбанбердиев Юсуп Мухамметхасанович

Автоматизация технологического процесса фильтрации

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: «Автоматизация технологического процесса фильтрации»

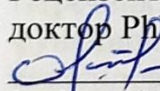
6B07103 – Автоматизация и роботизация

Выполнил

Гурбанбердиев Ю.М.

Рецензент

доктор PhD, доц.

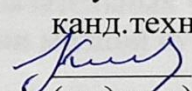
 Оракбаев Е.Ж.

(подпись)

«11» 06 2025 г.

Научный руководитель

канд. техн. наук, ассоц. проф.

 Кошимбаев Ш.К.

(подпись)

«26» 05 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 Гурбанбердиев Ю.М.

Тема: «Автоматизация технологического процесса фильтрации».

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

Срок сдачи законченной работы: «26» мая 2025 г.

Исходные данные к проекту: входные и выходные данные системы вакуумного насоса.

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов:

- а) описание технологической части;
- б) расчетная часть;
- в) техническая реализация автоматизации

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

функциональная схема автоматизации процесса фильтрации медной суспензии с использованием барабанного вакуум фильтра.

Рекомендуемая основная литература:

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования – СПб.: Профессия, 2004. – 749 с.;
2. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс – СПб.: Питер, 2005. – 512 с.;
3. Гудвин Г.К., Греббе С.Ф., Сальдаго М.Э. Проектирование систем управления, М.: Издательство БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 911 с.

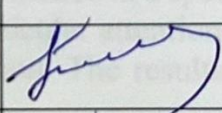
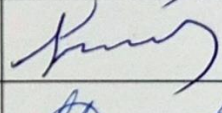
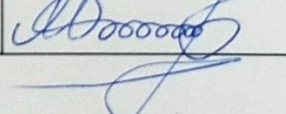
ГРАФИК

подготовки дипломного проекта

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологический раздел Технологический процесс фильтрации медной суспензии	17.02.2025 г.	
Технологический раздел Разработка функциональной схемы автоматизации системы управления процессом	26.02.2025 г.	
Расчетный раздел Анализ и синтез систем автоматического регулирования вакуумного насоса	27.03.2025 г.	
Расчетный раздел Разработка логической программы управления	26.05.2025 г.	

Подписи

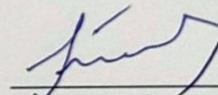
консультантов и нормоконтролера на законченный дипломный проект с указанием относящихся к ним разделов проекта

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Технологический раздел	Ш.К. Кошимбаев канд. техн. Наук	19.02.2025	
Расчетный раздел	Ш. К. Кошимбаев канд. техн. наук	23.05.2025	
Нормоконтролер	Қ. А. Манатов магистр техн. наук	02.06.2025	

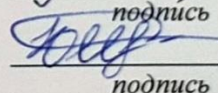
Научный руководитель

Задание принял к исполнению обучающийся

Дата



подпись



подпись

Кошимбаев Ш. К.

Гурбанбердиев Ю.М.

«12» 0.6 2025 г.

АНДАТПА

Дипломдық жұмыс мыс концентратының суспензиясын барабанды вакуумдық сүзгінің көмегімен сүзу процесін автоматты басқару жүйесін әзірлеуге арналған. Жұмыста фильтрацияның технологиялық процесі, басқару объектісі зерттеледі және заманауи баптау әдістерін қолдана отырып, әртүрлі типтегі реттегіштер синтезделеді. Логикалық басқарудың алгоритмі әзірленуде, мамандандырылған бағдарламалау ортасында іске асырылуда, процесті визуализациялау жүйесі құрылуда. Тұрақтылықты, сүзу тиімділігін арттыруға және жабдық жұмысын оңтайландыруға ерекше назар аударылады. Жұмыстың нәтижелері тау-кен өнеркәсібінде автоматтандыруды енгізу үшін пайдаланылуы мүмкін.

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа посвящена разработке системы автоматического управления процессом фильтрации суспензии медного концентрата с использованием барабанного вакуум-фильтра. В работе рассматривается технологический процесс фильтрации, объект управления, а также синтезируются регуляторы различных типов с использованием современных методов настройки. Разрабатывается алгоритм логического управления, реализуемый в специализированной среде программирования, а также создаётся система визуализации процесса. Особое внимание уделяется повышению стабильности, эффективности фильтрации и оптимизации работы оборудования. Результаты работы могут быть использованы для внедрения автоматизации в горнодобывающей промышленности.

ANNOTATION

The diploma work is devoted to the development of an automatic control system for a copper concentrate suspension filter using a drum vacuum filter. In the work of the method of the regulator of technological processes, filtration of control objects is used, and various types are synthesized using modern tuning methods. A logical control algorithm is developed, implemented in a specialized programming environment, and a process visualization system is created. Particular attention is paid to ensuring stability, filter efficiency and optimization of equipment operation. The results of the work can be used to modernize the mining industry.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Технологическая часть	8
1.1 Технологический процесс фильтрации суспензии медного концентрата	8
1.2 Устройство и принцип действия барабанного вакуум-фильтра	10
1.3 Барабанный вакуум-фильтр как объект управления	10
1.4 Анализ возмущений и их компенсация	11
1.5 Постановка задачи автоматизации	12
2 Расчетная часть	14
2.1 Функциональная схема процесса фильтрации суспензии медного концентрата	14
2.2 Математическая модель САР вакуума в барабанном вакуум фильтре	15
2.3 Анализ динамических свойств системы	17
2.4 Синтез регуляторов с заданными показателями качества переходного процесса	24
3 Техническая реализация автоматизации	35
3.1 Выбор аппаратной базы	35
3.2 Программная реализация контура логического управления барабанным вакуум фильтром в среде Owen Logic	41
Заключение	45
Список литературы	46
Приложение А	47

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация технологических процессов играет ключевую роль в повышении эффективности и стабильности современного производства. В горнодобывающей и металлургической промышленности, где точность и качество обработки сырья напрямую влияют на конечный результат, внедрение систем автоматического управления становится необходимым условием конкурентоспособности.

Фильтрация суспензии медного концентрата важный этап обогащения, требующий точного контроля технологических параметров. Барабанный вакуум-фильтр является основным оборудованием для отделения твёрдой фазы от жидкой, однако его эффективная эксплуатация невозможна без автоматизированной системы управления, способной учитывать изменение технологических условий и компенсировать возмущения.

Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения производительности и качества фильтрации в условиях растущих требований к экономии ресурсов и снижению операционных затрат на предприятиях горнодобывающей отрасли. Современные системы автоматизации позволяют обеспечить более точное и быстрое регулирование процесса, что снижает потери материала, уменьшает энергозатраты и повышает безопасность производства.

Цель данной работы разработка системы автоматизации процесса фильтрации суспензии медного концентрата с использованием барабанного вакуум-фильтра. Для этого решаются задачи анализа технологического процесса и объекта управления, построения математической модели, синтеза регуляторов с заданными требованиями к качеству регулирования, а также реализации алгоритмов управления на промышленном контроллере.

Структура работы включает описание технологического процесса, расчетную часть с математическим моделированием и синтезом регуляторов, а также техническую реализацию с выбором аппаратуры и программированием системы управления.

Внедрение разработанной системы позволит повысить стабильность и качество фильтрации, оптимизировать расход ресурсов и обеспечить эффективное управление технологическим процессом на предприятии.

1 Технологическая часть

1.1 Технологический процесс фильтрации суспензии медного концентрата

Фильтрация медной суспензии очень важный этап в металлургии. Этот процесс осуществляется с помощью барабанного вакуум-фильтра, внутри которого создаётся разряжение, отделяющее жидкую часть суспензии от твёрдого осадка. В данном процессе исключена стадия промывки осадка, чтобы экономить воду и упростить эксплуатацию оборудования.

Процесс фильтрации медной суспензии помогает подготовить осадок к дальнейшей переработке, например, сушке, обжигу или плавке. На этом этапе следует очень внимательно следить за параметрами, так как при нестабильных условиях фильтрации, качество конечного продукта может ухудшиться.

Процесс фильтрации медного концентрата состоит из следующих этапов: подача суспензии, фильтрация, осушение осадка, снятие осадка и регенерация фильтровальной ткани [1].

Суспензия попадает в корыто барабанного вакуум-фильтра, где в последующем равномерно распределяется по барабану вакуум фильтра. Фильтруемая суспензия состоит из твёрдых частиц медного концентрата и жидкой фазы, воды с растворенными в ней примесями.

Чтобы процесс шёл стабильно, необходимо контролировать уровень суспензии в корыте, так как при колебаниях уровня, суспензия распределится по барабану неравномерно. Что в свою очередь может привести к потере качества конечной продукции.

Процесс начинается с того, что барабан начинает вращаться. Пока он вращается, внутри его полостей создаётся разряжение, которое втягивает жидкую часть суспензии, отделяя её от осадка. Сам осадок остаётся на фильтровальной ткани, которая находится на поверхности барабанного вакуум-фильтра.

Когда барабан выходит из зоны суспензии, осадок дополнительно обезвоживается под действием вакуума. Этот этап очень важный, потому что он помогает убрать лишнюю влагу до того, как осадок снимут с барабана. Если влажность останется высокой, это приведет к росту энергозатрат на дальнейшую переработку, например, на сушку осадка. Следовательно на этом этапе следует обеспечивать оптимальные условия обезвоживания.

Когда осадок доходит до зоны съёма, его аккуратно снимают механическим способом с поверхности барабана. Скребок нож срезает высушенный осадок который называют «кек», после чего этот «кек» отправляют на дальнейшую переработку. Для эффективного удаления, механизм съёма осадка должен быть стабильным: если давление будет слишком сильным, фильтровальная ткань быстро изнашивается, а при слабом давлении часть осадка останется на поверхности барабана, что в последующем плохо скажется на качестве фильтрации.

Последний этап - регенерация фильтровальной ткани. Она нужна, чтобы убрать остатки осадка и восстановить проницаемость ткани. Очистку делают либо механическим способом, либо продувкой воздухом. От того, насколько хорошо эта процедура пройдёт, зависит не только срок службы ткани, но и то, как эффективно будут работать следующие циклы фильтрации. Поэтому этот этап очень важен для стабильной работы вакуум-фильтра при длительной эксплуатации.

Обезвоживание медного концентрата, в отличие от некоторых других технологий фильтрации, проходит без этапа промывки осадка. Такое решение связано с несколькими технологическими и экономическими причинами. Во-первых, отказ от промывки позволяет значительно сэкономить воду, что очень важно при ограниченных ресурсах водоснабжения. Во-вторых, такой подход ускоряет сам процесс фильтрации, так как исключается дополнительный этап с подачей и удалением промывной воды.

Отказ от промывки осадка помогает сохранить его структуру, из-за чего он не размывается и твёрдые частицы равномерно распределяются в «кеке». Это очень важно для следующих этапов переработки, например, для сушки и плавки, потому что в значительной мере устраняет необходимость повторного осаждения и дополнительного обезвоживания осадка. Можно сказать, что промывка осадка практически не влияет на качество конечного продукта. Контроль влажности при этом достигается с помощью точной настройки вакуума и скорости вращения барабана.

Для поддержания стабильности процесса фильтрации, используют четыре основных датчика, которые контролируют важные параметры. Уровнемер регулирует подачу суспензии в корыто фильтра и не даёт уровню жидкости колебаться, так как это может повлиять на толщину слоя осадка и, как следствие, повлиять на качество фильтрации. Вакуумметр измеряет уровень разрежения в барабане, и от этого зависит, как быстро удаляется жидкость и эффективность обезвоживания осадка.

Скорость вращения барабана – еще один важный параметр, который измеряется тахометром. Регулируя скорость, можно оптимизировать время нахождения осадка под воздействием вакуума, чтобы поможет найти баланс между производительностью и качеством обезвоживания. Температурный датчик следит за тем, как меняется температура суспензии, так как вязкость жидкости зависит от температуры, что в свою очередь влияет на скорость прохождения жидкости через фильтровальную ткань.

Информация от датчиков поступает в систему управления, которая помогает автоматизировать процесс фильтрации и вовремя менять параметры, чтобы оборудование работало стабильно. Такая автоматизация сильно уменьшает риск ошибок из-за человеческого фактора, улучшает точность настроек и снижает шансы аварий. В итоге процесс становится более эффективным и предсказуемым.

1.2 Устройство и принцип действия барабанного вакуум-фильтра

Барабанный вакуум-фильтр — это устройство непрерывного действия, которая разделяет суспензию на жидкую и твёрдую части с помощью вакуумной фильтрации. Основные его части состоят из цилиндрического барабана, который частично погружён в корыто с суспензией, системы вакуумного отсоса, механизма съёма осадка и устройства для очистки фильтровальной ткани [2].

Во время работы барабан медленно вращается, а его нижняя часть находится в корыте с суспензией. Внутри барабана есть несколько секций, которые соединены с вакуумной системой через распределительную головку. А на поверхности барабана крепится фильтровальная ткань, которая удерживает твёрдые частицы.

Когда барабан вращается, каждая его секция по очереди проходит через несколько зон. В зоне фильтрации, которая находится в корыте с суспензией, жидкая часть втягивается вакуумом, проходит через фильтровальную ткань и уходит как фильтрат, а твёрдые частицы остаются на ткани и образуют осадок.

После того как барабан выходит из корыта, осадок попадает в зону сушки, где вакуум и атмосферный воздух продолжают удалять из него жидкость. На следующем этапе осадок поступает в зону съёма, где ножевой механизм и сжатый воздух отделяют его от фильтровальной ткани, а затем направляют на дальнейшую переработку.

После удаления осадка фильтровальная ткань проходит этап регенерации, включающий очистку от остатков осадка и восстановление её проницаемости. Этот процесс может выполняться механическим способом или с использованием воздушной продувки, что в последующем сможет обеспечить долговечность и высокую эффективность фильтра при повторении цикла повторно.

1.3 Барабанный вакуум-фильтр как объект управления

Барабанный вакуум-фильтр - это объект управления, в котором следует поддерживать стабильные условия фильтрации, чтобы процесс шел стабильно и эффективно. Работа фильтра зависит от многих параметров, которые надо регулировать, а также от разных внешних возмущений, которые могут влиять на качество фильтрации. Чтобы всё это контролировать и корректировать, используют систему управления, которая работает с данными от четырёх основных датчиков.

Фильтрацию можно представить как управляемую систему с входными и выходными параметрами, а также с возмущающими воздействиями. Входные параметры задают условия работы фильтра и их может контролировать либо оператор, либо автоматическая система. К таким параметрам относятся скорость вращения барабана, уровень вакуума, подача суспензии в корыто и температура суспензии.

Скорость вращения барабана влияет на толщину осадочного слоя и время его обезвоживания. Вакуум создаёт разрежение, которое влияет на то, как быстро жидкость удаляется из осадка. Подача суспензии отвечает за равномерное распределение слоя осадка на фильтровальной ткани, а температура суспензии влияет на её вязкость и, соответственно, скорость фильтрации.

Выходные параметры показывают, как работает система и насколько эффективен процесс. К ним относятся производительность фильтра - то сколько суспензии обработано за единицу времени, влажность осадка после фильтрации, качество фильтрата, которое показывает, насколько хорошо очищена жидкость, и толщина слоя осадка на барабане. Чтобы понять, как работает фильтр, и принять решение о настройках, необходимо следить за этими показателями.

Во время работы фильтра, могут появляться разные возмущения, которые сложно сразу контролировать, но с помощью автоматического управления их влияние можно уменьшить. Одно из таких это колебания концентрации твёрдых частиц в суспензии, которые меняют, фильтруемость суспензии, что требует корректировки параметров фильтрации. Температурные изменения влияют на вязкость жидкости и на скорость, с которой она проходит через фильтровальную ткань. Перепады вакуума, которые возникают из-за нестабильной работы вакуумной системы, снижают эффективность удаления влаги из осадка. А если фильтровальная ткань изнашивается, её проницаемость падает, и тогда необходимо либо увеличить вакуум, либо уменьшить скорость вращения барабана.

Для контроля и регулирования процесса используются четыре датчика. Уровнемер следит за уровнем суспензии в корыте и регулирует её подачу, чтобы не было резких скачков. Вакуумметр измеряет разрежение в системе, тем самым позволяет системе управления корректировать работу вакуумного насоса. Тахометр измеряет скорость вращения барабана, чтобы она подходила под технологические требования. Температурный датчик контролирует температуру суспензии, которая влияет на вязкость жидкости и скорость фильтрации.

Автоматическая система регулирования помогает компенсировать влияние разных внешних возмущений и держать процесс фильтрации в оптимальном режиме. Это обеспечивает стабильное качество очистки, снижает затраты на эксплуатацию и продлевает срок службы фильтровальной ткани. Благодаря автоматизации, управление барабанным вакуум-фильтром становится более предсказуемым, эффективным и экономичным.

1.4 Анализ возмущений и их компенсация

Во время эксплуатации барабанного вакуум-фильтра могут возникать различные возмущения, которые способны негативно влиять на эффективность процесса фильтрации и качество конечного продукта. Для обеспечения стабильной работы системы необходимо выявлять эти возмущения и разрабатывать методы для их компенсации [2].

Одним из основных факторов, влияющих на процесс фильтрации, является изменение свойств суспензии. Изменения концентрации твёрдой фазы, размера частиц или вязкости могут заметно повлиять на эффективность работы фильтра. Например, повышение концентрации твёрдых частиц приводит к утолщению осадочного слоя на фильтровальной ткани, что затрудняет его обезвоживание и снижает производительность фильтра. Чтобы компенсировать такие изменения, используют датчик уровня суспензии, который контролирует подачу материала в корыто фильтра. Этот датчик будет поддерживать оптимальный уровень для равномерного распределения и фильтрации.

Температурные колебания существенно влияют на процесс фильтрации. Изменения температуры окружающей среды или самой суспензии меняют вязкость жидкости, что, в свою очередь, влияет на скорость фильтрации и качество осадка. Чтобы компенсировать эти изменения, в системе установлен температурный датчик, который фиксирует колебания температуры суспензии. По его показаниям система управления может корректировать такие параметры, как скорость вращения барабана или уровень вакуума, обеспечивая тем самым стабильность фильтрации.

Перепады уровня вакуума, вызванные нестабильной работой вакуумной системы или утечками, негативно влияют на процесс обезвоживания осадка. Для контроля этого параметра применяется вакуумметр, который отслеживает разрежение в системе. При выявлении отклонений система управления регулирует работу вакуумного насоса или принимает другие меры для восстановления необходимого уровня вакуума.

Со временем фильтровальная ткань изнашивается, и из-за этого её проницаемость становится меньше, а эффективность фильтрации ухудшается. Для того чтобы компенсировать такое возмущение, нужно регулярно проверять состояние ткани и вовремя её менять, при обнаружении износа. Кроме того, система управления может учитывать, насколько сильно ткань изношена, и настраивать параметры работы, чтобы исключить негативное влияние на качество фильтрации.

Эффективная компенсация всех этих проблем достигается с помощью автоматической системы управления, которая работает на данных с ключевых датчиков. Благодаря этому процесс фильтрации получается стабильным, а качество продукта высоким. К тому же, это помогает дольше сохранять оборудование в рабочем состоянии.

1.5 Постановка задачи автоматизации

Цель автоматизации процесса фильтрации суспензии медного концентрата с использованием барабанного вакуум-фильтра обеспечить стабильную и эффективную работу всего технологического процесса, с минимальными отклонениями параметров от заданных значений.

В рамках настоящей работы сформулированы следующие основные задачи

автоматизации:

Задача 1. На основе разработанной математической модели замкнутой системы управления необходимо синтезировать типовой регулятор, который обеспечит оптимальные показатели качества управления: устойчивость, быстродействие, минимальное перерегулирование и отсутствие статической ошибки. Данный регулятор должен обеспечивать надёжное поддержание параметров фильтрационного процесса в заданных пределах при воздействии возмущений и изменениях технологических условий.

Задача 2. На основании технического задания разработать алгоритм логического управления для контура управления барабанным вакуум-фильтром, реализуемый в среде программирования Owen Logic. Алгоритм должен обеспечивать автоматическую работу фильтра с возможностью реагирования на аварийные и нестандартные ситуации, а также предоставлять средства для мониторинга и контроля процесса.

Решение данных задач позволит повысить качество и надёжность процесса фильтрации, снизить энергозатраты и оптимизировать работу оборудования.

2 Расчетная часть

2.1 Функциональная схема процесса фильтрации суспензии медного концентрата

Функциональная схема автоматизации процесса фильтрации суспензии медного концентрата отображает последовательность управления и контроля технологическим процессом с использованием измерительных приборов, исполнительных механизмов и программируемого логического контроллера (ПЛК).

Для контроля параметров используется датчик давления ОВЕН ПД100И. Он контролирует уровень разрежения в вакуумной магистрали, что позволяет поддерживать оптимальные условия работы вакуумного насоса, который на схеме обозначен как VP01. Датчик уровня суспензии Siemens SITRANS Probe LU в корыте барабана, обеспечивает контроль объема фильтруемой суспензии, предотвращая переполнение или недостаток жидкости. Температурный датчик ОВЕН ТСМ50, фиксирует температуру суспензии перед фильтром, что влияет на качество фильтрации и стабильность процесса. Датчик скорости вращения барабана TURCK Ri360P1-QR14 контролирует скорость вращения барабана фильтра, что позволяет регулировать толщину осадка и параметры фильтрации.

Исполнительные механизмы включают или отключают вакуумный насос. Он управляется ПЛК и включается или выключается в зависимости от показаний датчика вакуума для поддержания заданного уровня разрежения. Насос подачи суспензии PV01, регулирует поступление суспензии в фильтр, управляется по сигналам датчика уровня. Электромагнитный клапан VA01, управляется ПЛК и регулирует поток суспензии перед насосом подачи.

ПЛК – ОВЕН ПР102-24.2416.06.1, принимает аналоговые сигналы с датчиков вакуума, уровня, температуры и скорости, обрабатывает их и на основании заложенной программы формирует управляющие команды для исполнительных механизмов - насосов, клапана и преобразователя частоты.

Обмен данными между датчиками, механизмами и ПЛК происходит через аналоговые и дискретные входы и выходы. Аналоговые сигналы от датчиков поступают на соответствующие входы ПЛК, а дискретные сигналы от концевых выключателей и аварийных устройств подключены к дискретным входам ПЛК. Управляющие выходы ПЛК соединены с исполнительными механизмами.

Вся информация о состоянии процесса и параметрах отображается на операторском интерфейсе или персональном компьютере, что позволяет оператору контролировать процесс в реальном времени и при необходимости осуществлять ручное вмешательство.

Таким образом, функциональная схема автоматизации обеспечивает комплексное управление процессом фильтрации суспензии медного концентрата, поддерживая стабильные технологические параметры, своевременно реагируя на отклонения и оптимизируя работу оборудования.

Графическое представление функциональной схемы автоматизации

процесса фильтрации суспензии медного концентрата приведено в Приложении А.

2.2 Математическая модель САР вакуума в барабанном вакуум фильтре

Для управления процессом фильтрации суспензии медного концентрата в барабанном вакуум-фильтре будет разработана математическая модель системы автоматического регулирования вакуума. Но сначала построим функциональную схему (рисунок 2.1) которая является основой для синтеза регуляторов. На функциональной схеме показаны основные компоненты системы: регулятор, исполнительный механизм, регулируемый орган, объект управления и датчик обратной связи.

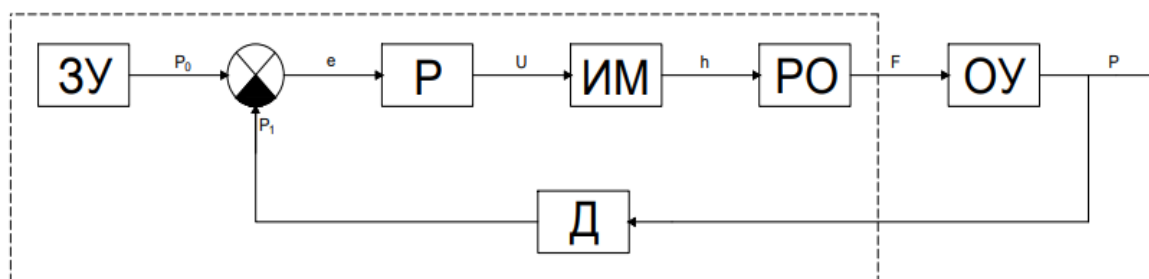


Рисунок 2.1 – Функциональная схема контура регулирования вакуума в барабанном вакуум фильтре

Здесь:

- ЗУ - задающее устройство;
- Р - регулятор;
- ИМ - исполнительный механизм;
- РО - регулирующий орган;
- ОУ - барабанный вакуум фильтр;
- Д - датчик давления;
- P_0 - вакуум в системе барабанного вакуум фильтра;
- e - ошибка, возникающая при отклонении параметра от задания;
- U – напряжение;
- h - перемещение регулирующего органа;
- F - расход воздуха.

В ходе проведения анализа технологического процесса фильтрации медного концентрата был определён входной и выходной параметры для системы. Входным параметром является мощность вакуумного насоса, а выходным параметром уровень вакуума в системе барабанного вакуум-фильтра. Исходные значения этих параметров представлены в таблице 2.1, что позволяет произвести дальнейшее моделирование и оптимизацию процесса управления.

Таблица 2.1 – Исходные значения

Мощность насоса(%)	Расход воздуха(л/с)
5	0.25
10	0.5
15	0.75
20	1
25	1.3
30	1.6
35	1.9
40	2.2
45	2.5
50	2.8
55	3.1
60	3.4
65	3.7
70	4
75	4.3
80	4.6
85	4.9
90	5.2
95	5.5
100	5.8

Используя пакет System Identification Toolbox (рисунок 2.2) в системе MATLAB, проведем построение математической модели системы автоматического регулирования барабанного вакуум-фильтра, опираясь на исходные данные входного параметра мощности насоса, и выходного параметра уровня вакуума в системе.

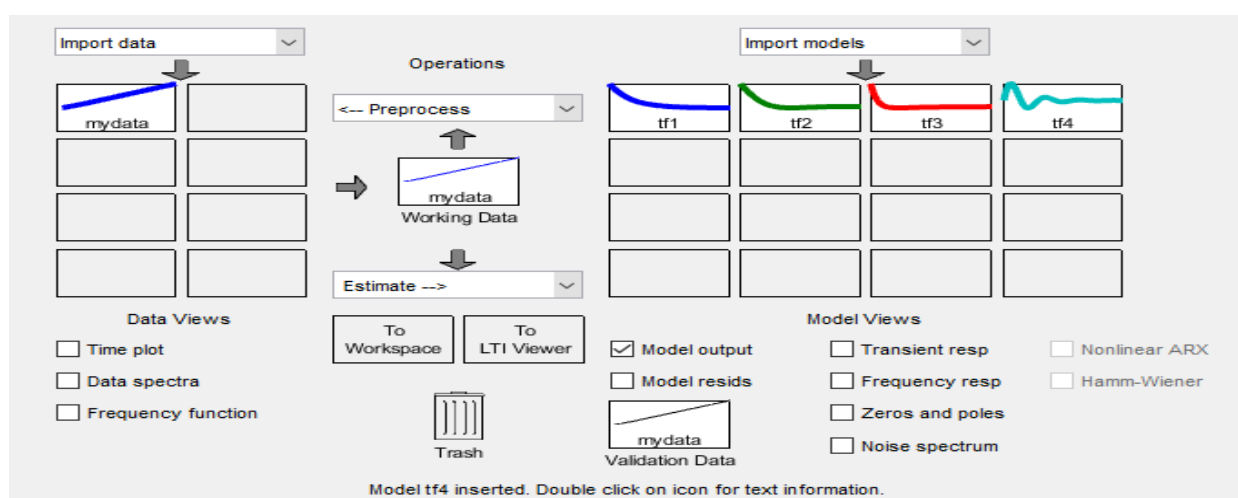


Рисунок 2.2 – Моделирование в Matlab System Identification

При построении математической модели ключевым моментом является оценка её адекватности. При тестировании различных передаточных функций наиболее подходящей оказалась модель под номером 2 (рисунок 2.3), которая продемонстрировала процент адекватности на уровне 99,83 процентов.

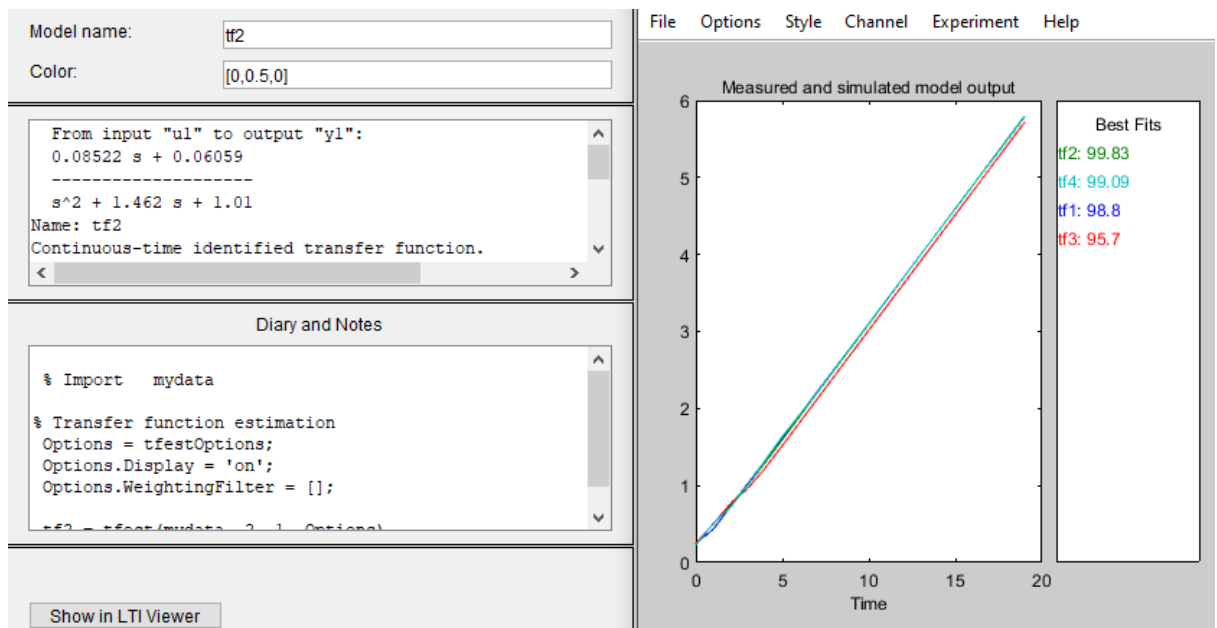


Рисунок 2.3 – Математическая модель и процент адекватности моделей, выведенные через Matlab System Identification

Согласно рисунку 2.3 математическая модель САР барабанного вакуум фильтра имеет вид разомкнутой системы 2-го порядка

$$G_{0y}(s) = \frac{0.08522s + 0.06059}{s^2 + 1.462s + 1.01}. \quad (2.1)$$

Для обеспечения точности и стабильности процесса регулирования вакуума в системе барабанного вакуум фильтра необходимо учитывать не только динамику объекта управления, но и характеристики исполнительного механизма (насос) и регулирующего органа (клапан). Это связано с тем, что каждый из этих компонентов имеет свои динамические особенности, которые влияют на реакцию системы на изменения управляющего сигнала.

Определим передаточную функцию исполнительного механизма, которым является насос. Для вакуумных пластинчато-роторных насосов типа Edwards E2M-80 на линиях примерно 8 метров задержка установления разряжения обычно от 0.4 до 0.6 секунд.

Возьмем усредненное значение:

$$G_{им}(s) = \frac{K_H}{T_H s + 1} \quad (2.2)$$

Здесь:

- $K_H = 0.12$ Мпа/ед – коэффициент усиления насоса. $K_H = 0.12$ даёт при полном сигнале ($u=1$) разряжение порядка минус 0.1 МПа, что совпадает с паспортными данными насоса;

- $T_H = 0.5$ с. – постоянная времени, описывает инерционность насоса и вакуумной линии.

Подставив значения в формулу (2.2) получим следующую передаточную функцию исполнительного механизма:

$$G_{\text{им}}(s) = \frac{0.12}{0.5s + 1} \quad (2.3)$$

Определим передаточную функцию регулирующего органа – клапан. Для дроссель-клапанов DN25-DN32 с расходным коэффициентом равным 1.8 характерно плавное открытие с электропневмоприводом ($0 \div 100$ % за 0.15...0.25 секунд)

Формула для регулирующего органа будет выглядеть следующим образом:

$$G_{\text{ро}}(s) = \frac{K_K}{T_K s + 1} \quad (2.4)$$

Здесь:

- $K_K = \frac{1}{K_H} = 1.2$ – коэффициент усиления клапана;

- $T_K = 0.2$ с. – постоянная времени клапана.

Подставив значения в формулу (2.4) получим следующую передаточную функцию исполнительного механизма:

$$G_{\text{ро}}(s) = \frac{1.2}{0.2s + 1} \quad (2.5)$$

Теперь получим общую передаточную функцию контура управления вакуумом:

$$G_{\text{разомк}} = G_{\text{им}}(s) * G_{\text{ро}}(s) * G_{\text{оу}}(s) = \frac{0.12}{0.5s + 1} * \frac{1.2}{0.2s + 1} * \frac{0.08522s + 0.06059}{s^2 + 1.462s + 1.01}$$
$$G_{\text{разомк}}(s) = \frac{0.0123s + 0.00872}{0.1s^4 + 0.8462s^3 + 2.1244s^2 + 2.169s + 1.01} \quad (2.6)$$

Отсюда передаточная функция замкнутой системы контура управления вакуумом имеет следующий вид:

$$G_{\text{замк}}(s) = \frac{0.0123s + 0.00872}{0.1s^4 + 0.8462s^3 + 2.1244s^2 + 2.1813s + 1.01872} \quad (2.7)$$

2.3 Анализ динамических свойств системы

Для анализа устойчивости разомкнутой и замкнутой систем применим первый метод Ляпунова. Для этого определим полюса этих систем используя командную строку в Matlab (рисунок 2.4).

```
>> G=tf([0.0123 0.00872],[0.1 0.8462 2.1244 2.169 1.01])

G =

          0.0123 s + 0.00872
-----
    0.1 s^4 + 0.8462 s^3 + 2.124 s^2 + 2.169 s + 1.01

Continuous-time transfer function.
Model Properties
>> pole(G)

ans =

-5.0000 + 0.0000i
-2.0000 + 0.0000i
-0.7310 + 0.6897i
-0.7310 - 0.6897i
```

Рисунок 2.4 – Нахождение полюсов разомкнутой САР

Изобразим полученные полюса на комплексной плоскости через команду pzmap в Matlab (рисунок 2.5)

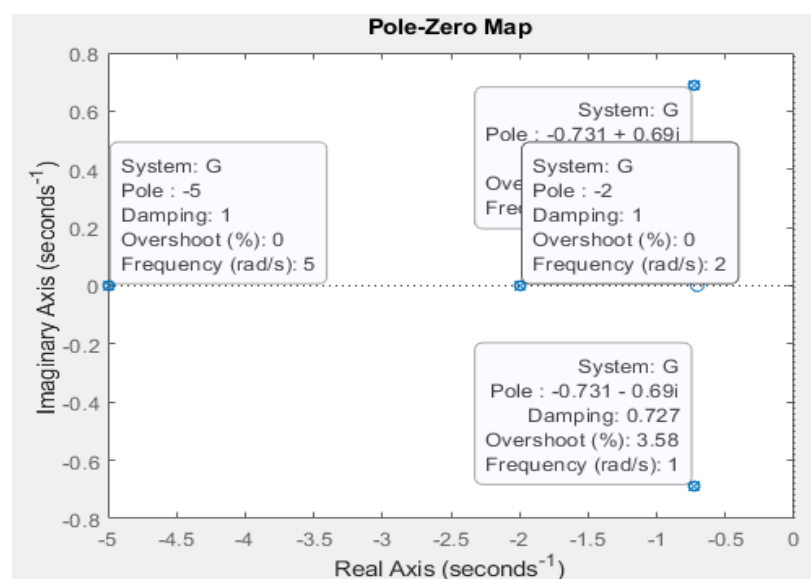


Рисунок 2.5 - полюса РСАР на комплексной плоскости

Полюса разомкнутой системы автоматического регулирования имеют отрицательные действительные части, что, согласно первому методу Ляпунова, подтверждает её устойчивость.

Точно также, для проверки устойчивости замкнутой системы (рисунок 2.6) применим первый метод Ляпунова.

```
>> G1=tf([0.0123 0.00872],[0.1 0.8462 2.1244 2.1813 1.01872])

G1 =

          0.0123 s + 0.00872
-----
0.1 s^4 + 0.8462 s^3 + 2.124 s^2 + 2.181 s + 1.019

Continuous-time transfer function.
Model Properties
>> pole(G1)

ans =

-5.0094 + 0.0000i
-1.9746 + 0.0000i
-0.7390 + 0.6955i
-0.7390 - 0.6955i
```

Рисунок 2.6 – Нахождение полюсов замкнутой САР

Шаг 4. Изобразим полученные полюса на комплексной плоскости через команду pzmap в Matlab (рисунок 2.7).

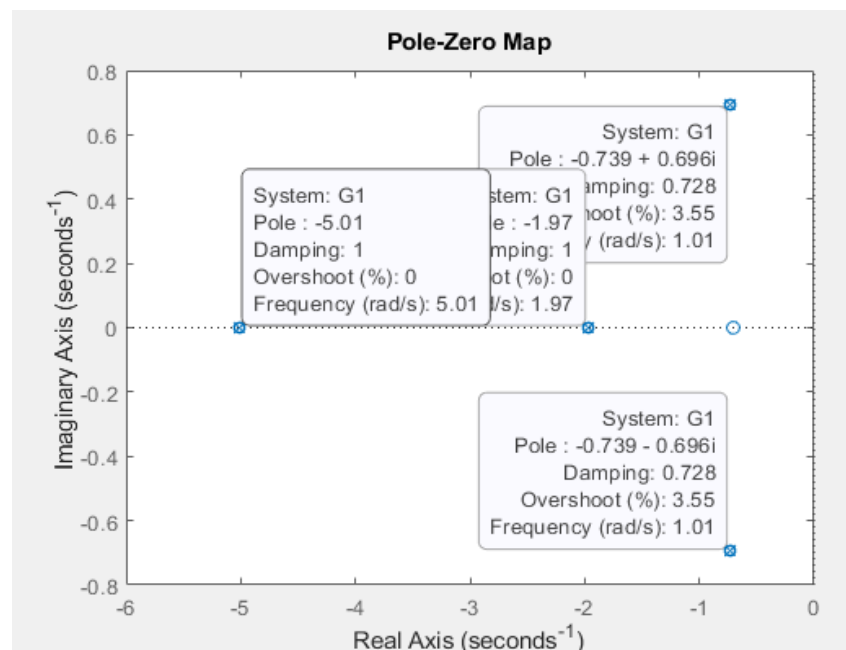


Рисунок 2.7 – Полюса ЗСАР на комплексной плоскости

Полюса замкнутой системы имеют отрицательные действительные части,

что, согласно теореме Ляпунова, подтверждает её устойчивость.

Следующим этапом анализа системы автоматического регулирования вакуума в барабанном вакуум-фильтре является определение оценок качества замкнутой системы. Оценки качества подразделяются на прямые по переходному процессу, и косвенные по расположению полюсов системы. Анализ качества замкнутой системы управления вакуумом проведён на основе переходного процесса (рисунок 2.8), а полученные прямые и косвенные оценки качества сведены в таблицу 2.2.

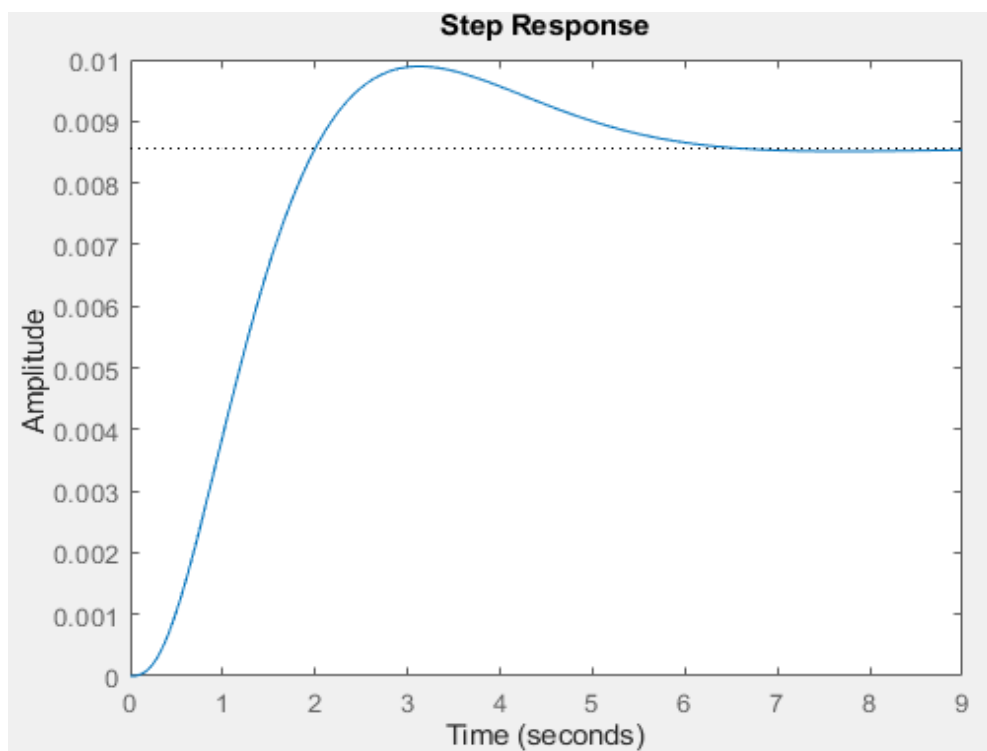


Рисунок 2.8 – Переходной процесс ЗСАР

Таблица 2.2 – Прямые и косвенные оценки качества системы без регулятора

№	Оценки качества	Обозначение	По переходному процессу
1	Время регулирования	T_{set}	4.95 с
2	Перерегулирование	P_{ov}	15%
3	Число колебаний	M	0
4	Колебательность	μ	-
5	Период колебаний	T	-
6	Установившаяся ошибка	e_{ss}	0.9914
7	Время достижения первого максимума	T_P	3.18 с
8	Время нарастания	T_R	1.08 с
9	Декремент затухания	χ	-

Оценку качества системы по корням характеристического уравнения проведём, используя расположение полюсов на комплексной плоскости.

Корневые оценки качества:

а) Характеристика №1

$$T_{set} = \frac{4}{|\sigma_{min}|} = \frac{4}{|-5|} = 0.8 \text{ с.}$$

где σ_{min} - минимальный полюс с действительным значением

Согласно данным на рисунке 2.7, полюсом с действительным значением является число минус 5.

б) Характеристика №2. Степень устойчивости

$$\eta = |\sigma_{min}| = 5$$

Запасы устойчивости по амплитуде и фазе определим с помощью графиков ЛАЧХ и ЛФЧХ (рисунок 2.9). Результаты корневого анализа качества сведены в таблицу 2.3.

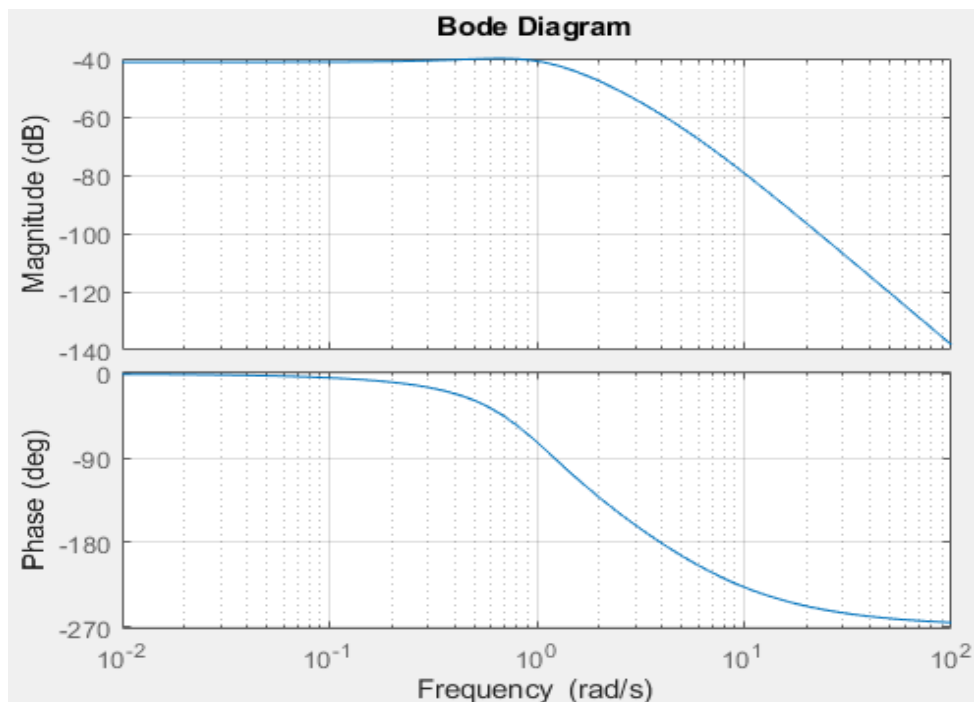


Рисунок 2.9 – Запасы устойчивости по амплитуде и фазе разомкнутой системы без регулятора

Запасы устойчивости по амплитуде равна 59 dB а по фазе равно бесконечности. Допустимый предел запасов устойчивости по амплитуде равен 10 ÷ 15 dB, по фазе (30° ÷ 40°). Следовательно, полученные запасы устойчивости не соответствуют вышеуказанным требованиям.

Проанализировав полученные оценки качества, можно отметить, что система без регулятора обладает заметным перерегулированием, равным 15 процентов, что указывает на присутствие значительных колебаний и превышение целевого значения. Число колебаний при этом равно нулю, что свидетельствует об отсутствии устойчивых колебательных процессов. Быстродействие системы характеризуется временем регулирования 4.95 секунд и временем нарастания 1.08 секунд, что указывает на относительно медленный общий отклик при достаточно быстром начальном подъёме сигнала. Установившаяся ошибка составляет 0.9914, что говорит о недостаточной точности системы и необходимости её улучшения.

Главным недостатком системы является её неточность и заметное перерегулирование, поэтому целесообразно синтезировать регулятор, способный уменьшить эти недостатки. Рассмотрение системы с PID-регулятором будет оправданным, поскольку интегрирующая составляющая повысит точность, пропорциональная обеспечит требуемое быстродействие, а дифференциальная позволит предсказывать изменение ошибки и оперативно реагировать на изменения в системе. Это обеспечит быструю адаптацию регулятора к изменениям и стабильность выходного сигнала.

2.4 Синтез регуляторов с заданными показателями качества переходного процесса

Для объекта управления, представляющего собой процесс фильтрации суспензии медного концентрата с использованием барабанного вакуум-фильтра, необходимо синтезировать PID-регулятор, с целью обеспечения заданных показателей качества системы автоматического регулирования.

В качестве базового метода настройки выбран первый метод Циглера-Никольса (ZN1), основанный на определении коэффициента передачи K , постоянной времени T и времени запаздывания L [3].

Метод заключается в следующем:

По переходному процессу разомкнутой системы находим такие параметры как постоянная времени, коэффициент передачи и время запаздывания (рисунок 2.10).

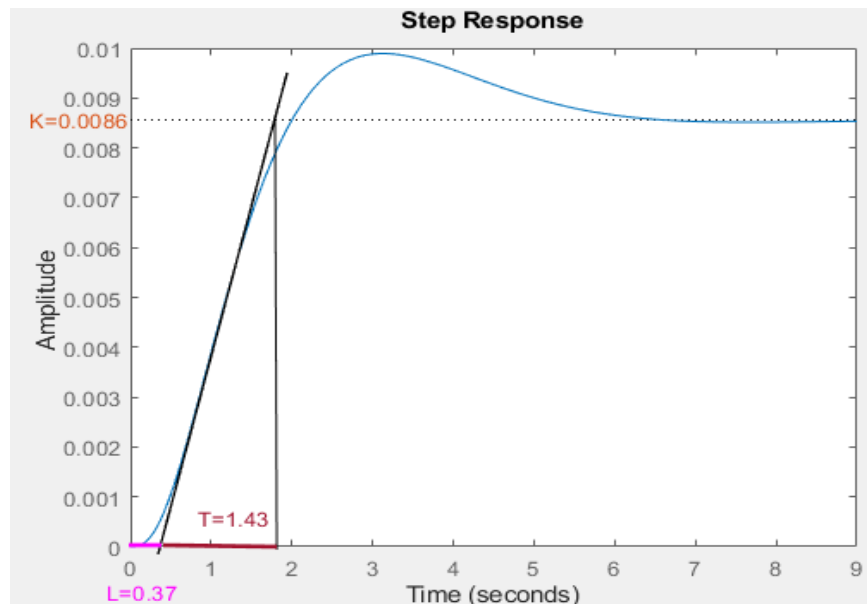


Рисунок 2.10 – Переходной процесс разомкнутой системы

Для нахождения неизвестных параметров необходимо определить точку перегиба переходной характеристики, а затем провести к ней касательную. Время запаздывания определяется как интервал времени от момента подачи входного ступенчатого воздействия до начала движения сигнала, L равна 0.37 секунд. Коэффициент передачи равен установившемуся значению переходной характеристики, K равна 0.0086. Постоянная времени (T) – время, которая определяется как разность между t_k и L , она равна 1.43 секунд.

Далее проверим, удовлетворяют ли полученные значения установленному требованию:

$$0.15 < \frac{L}{T} < 0.6$$

Рассчитанное значение равно 0.26, что подходит под требования.

Используя полученные значения, параметры регуляторов рассчитываются по формулам, приведённым в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Расчет значений PID-регулятора методом ZN1

Контроллер	K_p	K_i	K_D
Р-регулятор	$\frac{T}{KL}$	-	-
PI-регулятор	$0.9 \frac{T}{KL}$	$\frac{L}{0.3}$	-
PID-регулятор	$1.2 \frac{T}{KL}$	$2L$	$0.5L$

В ходе моделирования системы автоматического управления процессом фильтрации методом Циглера-Никольса были получены следующие характеристики:

Коэффициент передачи $K = 0.0086$;

Постоянная времени $T = 1.43$.

Время запаздывания $L = 0.37$

Полученные значения K , L и T используются далее для вычисления параметров P , PI и PID -регуляторов по формулам из таблицы 2.3. Полученные значения параметров P , PI и PID -регуляторов, приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Значения параметров P , PI и PID -регуляторов вычисленные методом ZN1

Контроллер	K_p	K_I	K_D
P-регулятор	449.4	-	-
PI-регулятор	404.5	1.23	-
PID-регулятор	539.3	0.74	0.185

Используя полученные параметры типового регулятора первым методом Циглера-Никольса (ZN1), промоделируем систему с PID -регулятором.

Результаты моделирования системы с PID -регулятором представлены ниже на графике (рисунок 2.11)

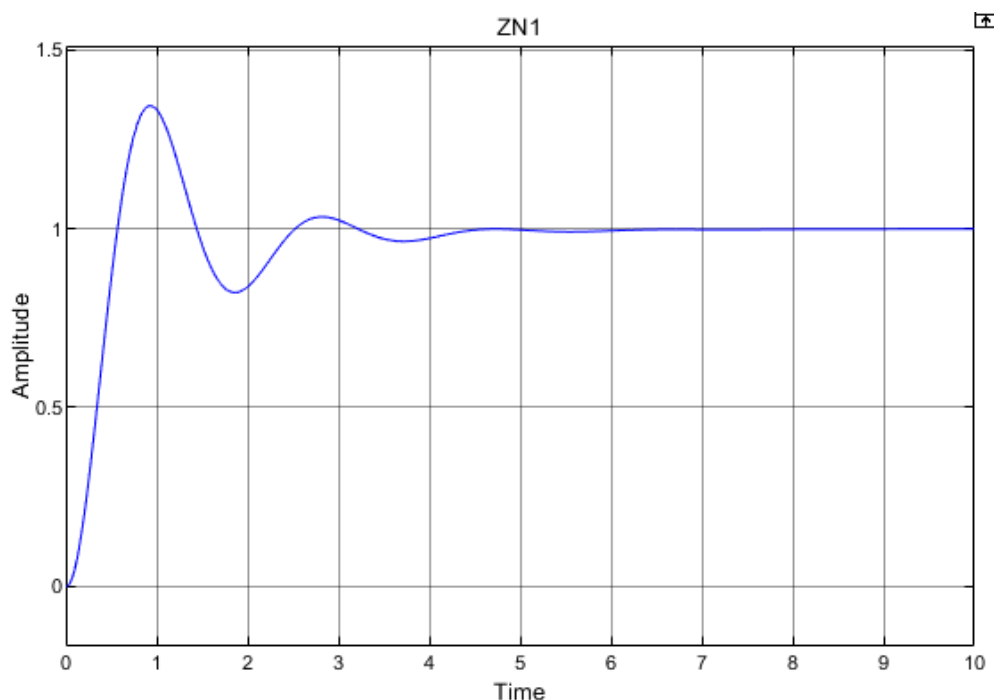


Рисунок 2.11 – Переходной процесс системы с PID -регулятором

Степень устойчивости системы с PID-регулятором равна 0.329 (рисунок 2.12).

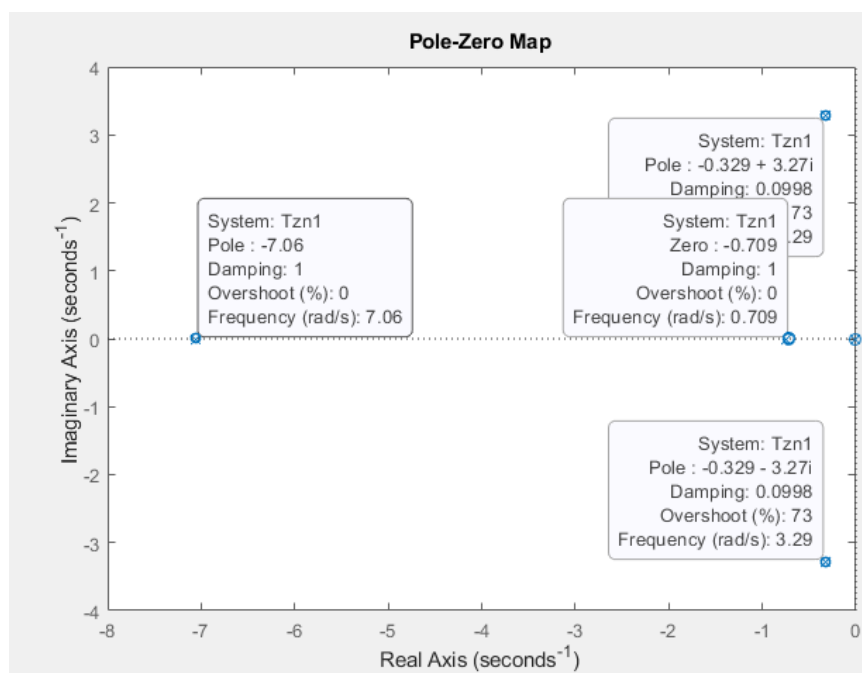


Рисунок 2.12 – Полюса системы с PID-регулятором на комплексной плоскости

В таблице 2.5 представлены прямые и косвенные оценки качества переходного процесса с использованием PID-регулятора.

Таблица 2.5 – Прямые и косвенные оценки качества системы с PID-регулятором синтезированного методом ZN1

№	Оценки качества	Обозначение	По переходному процессу
1	Время регулирования	T_{set}	2.5 с
2	Перерегулирование	P_{ov}	34 %
3	Число колебаний	M	2
4	Колебательность	μ	9.6 %
5	Период колебаний	T	1.89 с
6	Установившаяся ошибка	e_{ss}	0
7	Время достижения первого максимума	T_P	0.95 с
8	Время нарастания	T_R	0.57 с
9	Декремент затухания	χ	-

Синтезированный с помощью метода Циглера-Никольса PID-регулятор обеспечивает достаточно быстрое время отклика, но также сопровождается

некоторыми колебаниями и перерегулированием. Важно отметить, что хотя система в целом стабилизируется, можно улучшить настройку регулятора для снижения перерегулирования и повышения точности.

Попробуем улучшить характеристики регулятора с помощью синтеза PID-регулятора методом Чина-Хронеса-Ресвика (CHR). Алгоритм данного метода похож на метод ZN1, так что вычислим параметры PID-регулятора по формулам представленным в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Расчет значений PID-регулятора методом CHR

Контроллер	K_p	T_i	T_D
Р-регулятор	$0.3 \frac{T}{KL}$	-	-
PI-регулятор	$0.35 \frac{T}{KL}$	$\frac{1.2L}{K}$	-
PID-регулятор	$0.6 \frac{T}{KL}$	$\frac{L}{K}$	$0.5LK$

Полученные значения параметров Р, PI и PID-регуляторов, запишем в таблицу 2.7.

Таблица 2.7 - Значения параметров Р, PI и PID-регуляторов вычисленные методом CHR

Контроллер	K_p	T_i	T_D
Р-регулятор	134.8	-	-
PI-регулятор	157.3	57.6	-
PID-регулятор	269.6	43	0.0016

С помощью полученных параметров типового регулятора методом CHR, промоделируем систему с PID-регулятором.

Результаты моделирования системы с PID-регулятором представлены ниже на графике (рисунок 2.13)

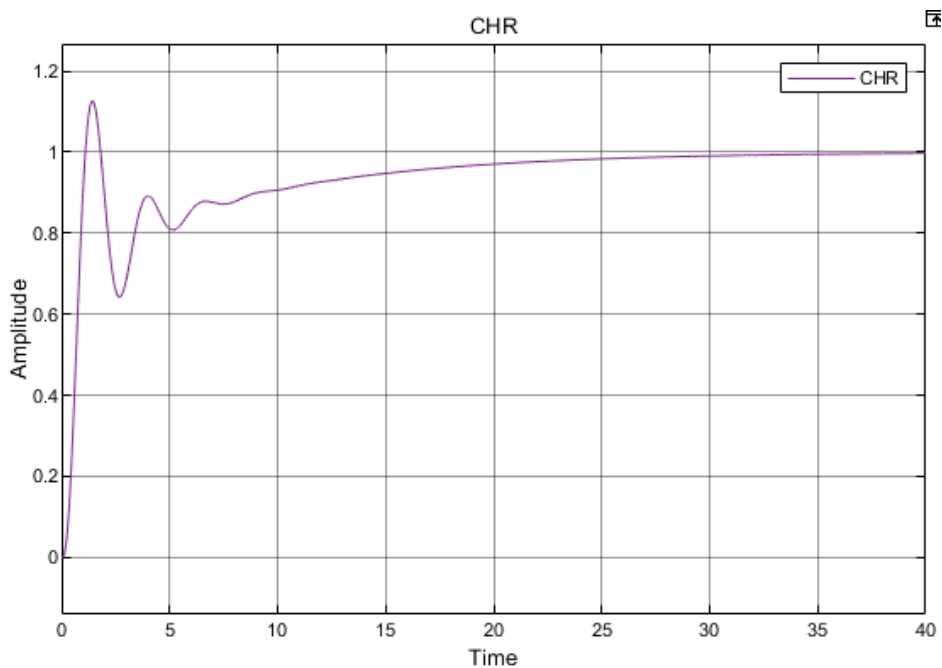


Рисунок 2.13 – Переходной процесс системы с PID-регулятором(CHR)

Степень устойчивости системы с PID-регулятором (CHR) равна 0.613 (рисунок 2.14).

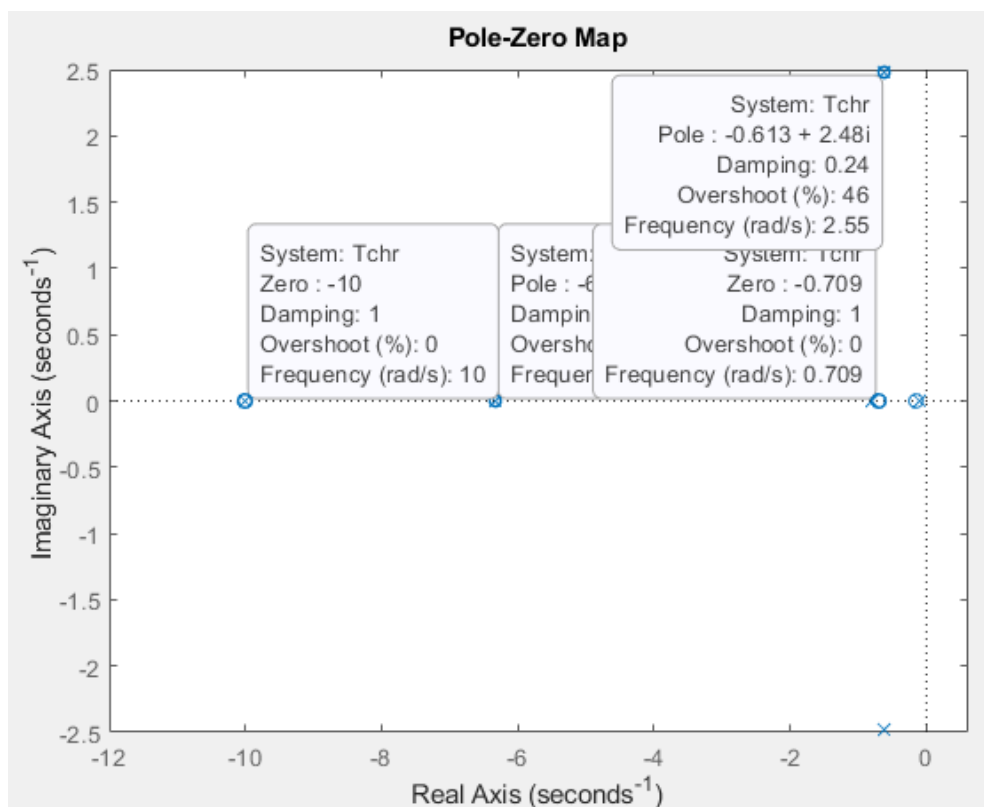


Рисунок 2.14 – Полюса системы с PID-регулятором на комплексной плоскости

В таблице 2.8 представлены прямые и косвенные оценки качества

переходного процесса с использованием PID-регулятора (CHR).

Таблица 2.8 – Прямые и косвенные оценки качества системы с PID-регулятором синтезированного методом CHR

№	Оценки качества	Обозначение	По переходному процессу
1	Время регулирования	T_{set}	15.43 с
2	Перерегулирование	P_{ov}	12.4%
3	Число колебаний	M	-
4	Колебательность	μ	-
5	Период колебаний	T	-
6	Установившаяся ошибка	e_{ss}	0
7	Время достижения первого максимума	T_P	1.38 с
8	Время нарастания	T_R	1.1 с
9	Декремент затухания	χ	-

Метод CHR позволил снизить перерегулирование и колебания, что значительно повысило стабильность системы. Однако это привело к увеличению времени регулирования, что сделало систему менее быстрой, но более стабильной.

В качестве альтернативы предыдущим двум методам рассмотрим автоматическую настройку параметров регулятора с помощью функции «Auto-tune» в среде MatLab.

Будем использовать способ основанный на настройке параметров регулятора в графической среде Simulink. Для этого сначала промоделируем систему с PID-регулятором в Simulink (рисунок 2.15).

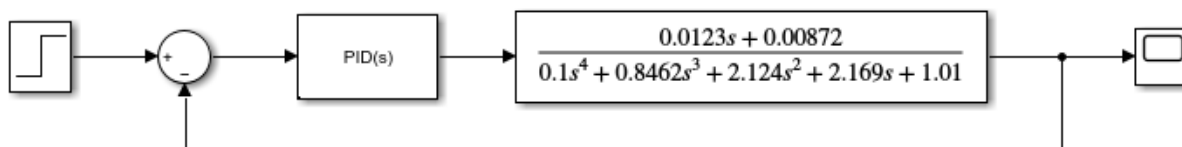


Рисунок 2.15 – Моделирование системы с PID-регулятором в Simulink

Затем в окне настройки параметров регулятора необходимо нажать кнопку «Tune», чтобы открыть инструмент «PID tuning tool» (рисунок 2.16).

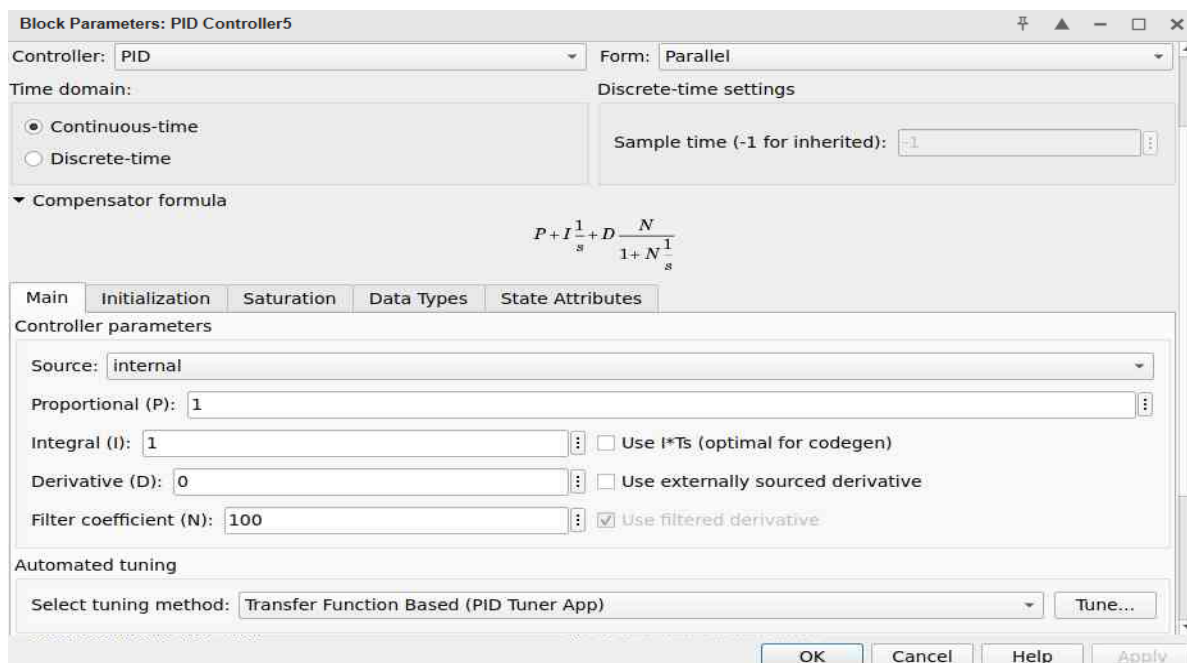


Рисунок 2.16 – Блок настройки параметров PID-регулятора

После нажатия кнопки «Tune» открылось окно, в котором отображается переходный процесс системы с PID-регулятором, сконфигурированным с помощью инструмента «PID Tuner» (рисунок 2.17).

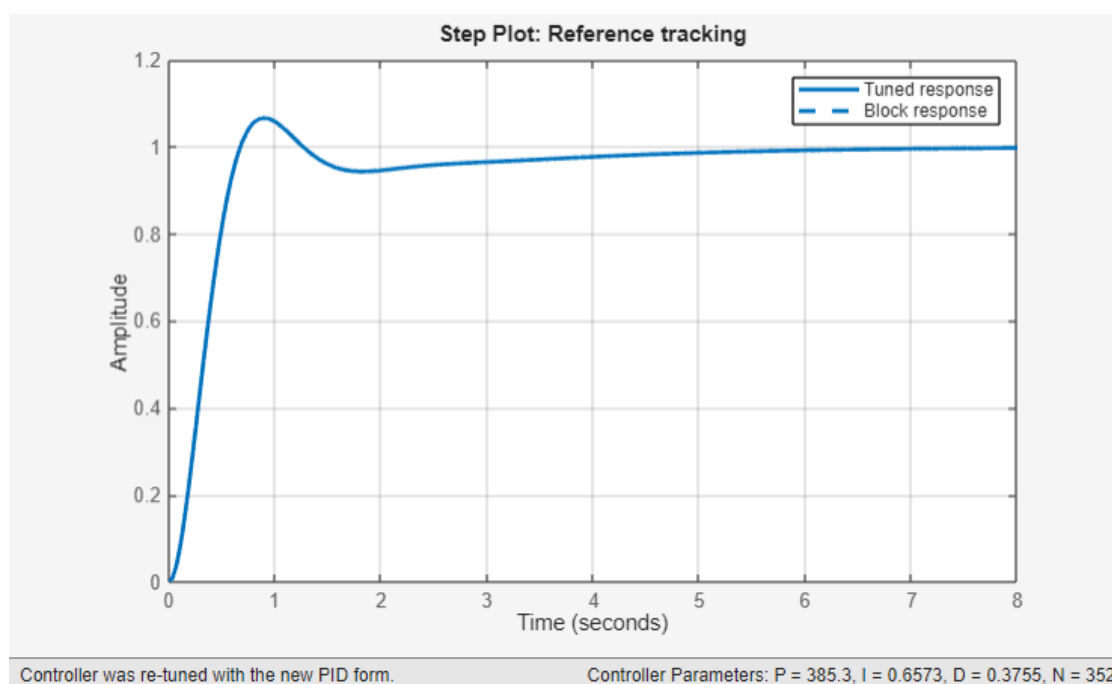


Рисунок 2.17 – Переходный процесс системы с PID-регулятором

Параметры регулятора (рисунок 2.18) можно найти нажав на кнопку «Show Parameters» в верхнем правом углу (рисунок 2.17).

Controller Parameters			
	Tuned	Block	
P	385.3288	385.3288	
I	0.65726	0.65726	
D	0.37545	0.37545	
N	352.0067	352.0067	

Performance and Robustness			
	Tuned	Block	
Rise time	0.446 seconds	0.446 seconds	
Settling time	4.31 seconds	4.31 seconds	
Overshoot	6.59 %	6.59 %	
Peak	1.07	1.07	
Gain margin	40.1 dB @ 42.4 rad/s	40.1 dB @ 42.4 rad/s	
Phase margin	59.4 deg @ 3.08 rad/s	59.4 deg @ 3.08 rad/s	
Closed-loop stability	Stable	Stable	

Рисунок 2.18 – Параметры PID-регулятора

Переходной процесс системы с PID-регулятором, который был синтезирован методом «Auto-tune», показан на графике ниже (рисунок 2.19).

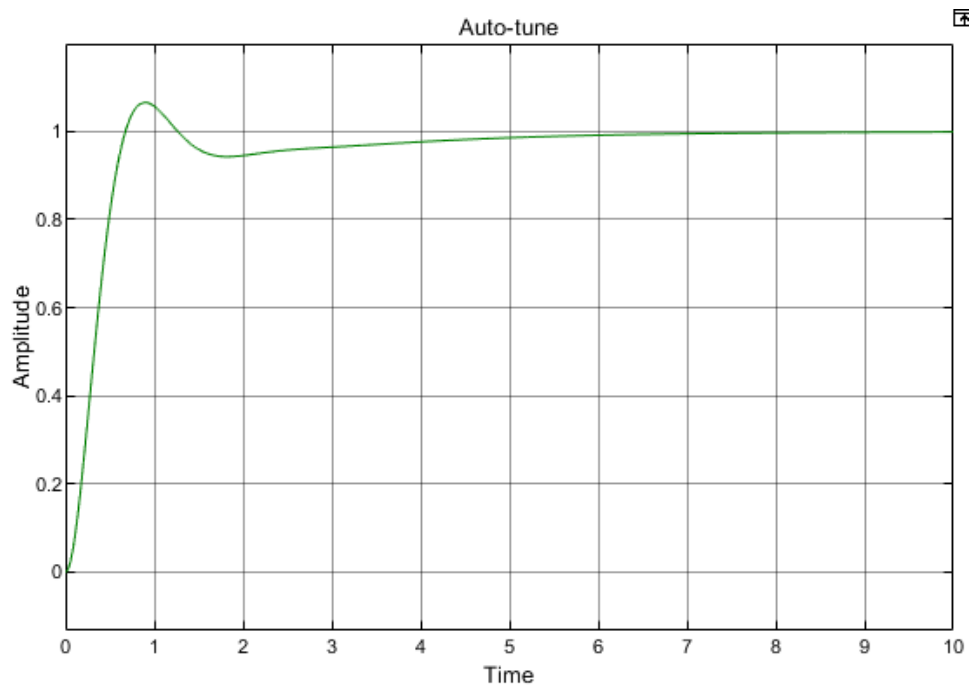


Рисунок 2.19 – Переходной процесс системы с PID-регулятором(Auto-tune)

Степень устойчивости системы с PID-регулятором(Auto-tune) равна 0.508 (рисунок 2.20).

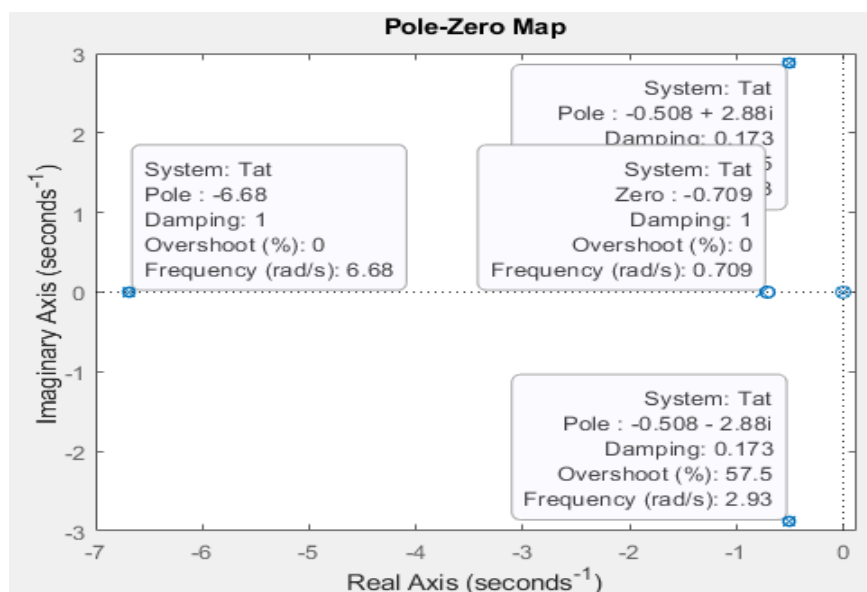


Рисунок 2.20 – Полюса системы с PID-регулятором(Auto-tune) на комплексной плоскости

Выполним сопоставительный анализ всех выполненных методов настройки параметров типового регулятора на основе переходных характеристик (рисунок 2.21).

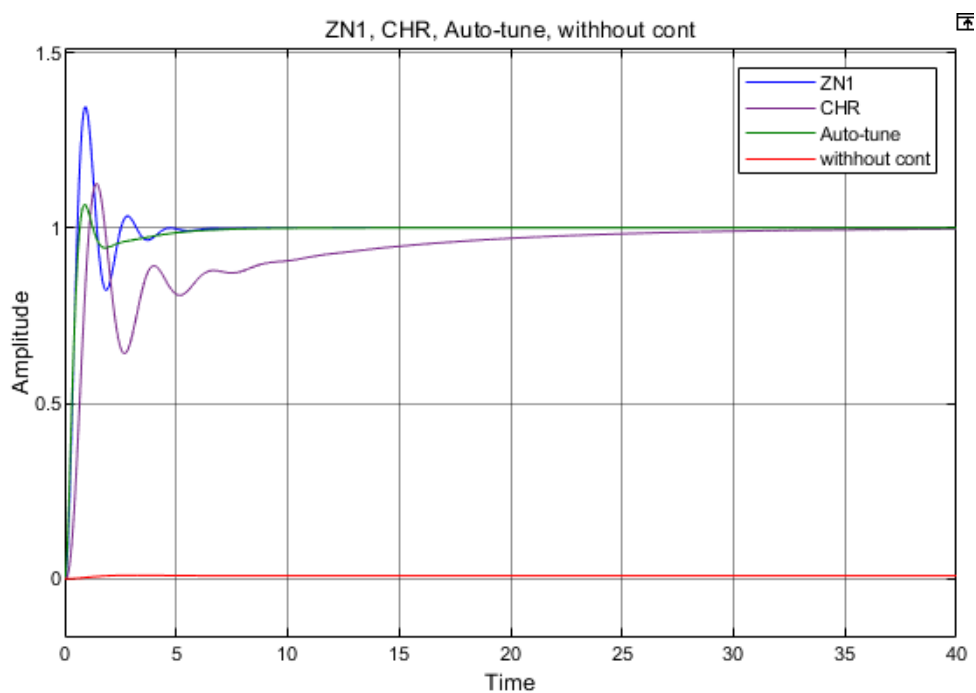


Рисунок 2.21 – Переходные процессы системы с PID-регулятором при различных методах синтеза

Рассмотрим прямые оценки качества системы без регулятора и с PID-регуляторами синтезированными различными методами (таблица 2.9).

Таблица 2.9 – Прямые и косвенные оценки качества системы без регулятора и с PID-регуляторами синтезированными различными методами

№	Оценки качества	Система без регулятора	Метод ZN1	Метод CHR	Метод Auto-tune
1	T_{set}	4.95 с	2.5 с	15.43 с	1.05 с
2	P_{ov}	15%	34 %	12.4%	6.6%
3	M	0	2	-	-
4	μ	-	9.6 %	-	-
5	T	-	1.89 с	-	-
6	e_{ss}	0.9914	0	0	0
7	T_P	3.18 с	0.95 с	1.38 с	0.92 с
8	T_R	1.08 с	0.57 с	1.1 с	0.68 с
9	X	-	-	-	-

Опираясь на данные, полученные методом Auto-tune, и сравнивая их с результатами эмпирических методов, можно сделать следующий вывод:

Сравнив различные методы синтеза PID-регуляторов, можно заключить, что каждый из них имеет свои преимущества в зависимости от целей. Метод Циглера-Никольса обеспечивает хороший баланс между временем регулирования и перерегулированием, но все же оставляет систему с заметными колебаниями. Метод Чина-Хронеса-Ресвика значительно улучшает стабильность, снижая перерегулирование, но за счет увеличения времени регулирования, что может быть неприемлемо для процессов, где важна скорость. Метод Auto-tune показывает наилучший результат по скорости реакции и стабильности, обеспечивая минимальное перерегулирование и быстрое время регулирования.

В целом, наилучшие характеристики системы, сочетающие минимальное время регулирования, низкий уровень перерегулирования и отсутствие установившейся ошибки, демонстрирует PID-регулятор, настроенный методом Auto-tune. Данный регулятор обеспечивает оптимальный баланс между быстродействием и устойчивостью, делая его предпочтительным выбором для автоматизации процесса фильтрации суспензии медного концентрата.

3 Техническая реализация автоматизации

3.1 Выбор аппаратной базы

Автоматизация технологического процесса фильтрации суспензии медного концентрата требует надежного и современного оборудования, которое обеспечит стабильную работу системы и возможность интеграции с другими компонентами. Выбор аппаратной базы осуществлялся с учетом таких факторов, как производительность, совместимость с датчиками исполнительными механизмами, а также экономическая целесообразность. и

Основным элементом системы управления является программируемый логический контроллер (ПЛК). В данной работе для выполнения всех необходимых функций управления, обработки данных с датчиков и координации работы исполнительных механизмов был выбран ОВЕН ПР102-24.2416.06.1. Этот контроллер обеспечивает высокую вычислительную мощность, гибкость и надежность, что делает его идеальным для использования в промышленной автоматизации. Он поддерживает все необходимые интерфейсы для интеграции с другими устройствами, такими как RS-232/485 и Ethernet, и обладает достаточным количеством аналоговых и дискретных входов/выходов для подключения всех необходимых компонентов системы.

При выборе ПЛК учитывались такие критерии, как производительность, стоимость, совместимость с системой и поддержка локальных стандартов, а также простота эксплуатации. Контроллер ОВЕН ПР102-24.2416.06.1 с его высокой вычислительной мощностью и широкими возможностями коммуникации позволяет решать задачи управления технологического процесса фильтрации. и мониторинга технологического процесса фильтрации.

Для управления системой автоматизации фильтрации был выбран ОВЕН ПР102-24.2416.06.1 (рисунок 3.1), который отвечает за обработку данных с датчиков и управление исполнительными механизмами. Контроллер оснащен достаточно мощным процессором, который позволяет ему эффективно обрабатывать все необходимые данные и управлять процессами в реальном времени.

Для выбора оптимального решения были рассмотрены также другие ПЛК, которые обладают схожими характеристиками, ценой и качеством. Одним из таких аналогов является Siemens SIMATIC S7-1200, а также Schneider Electric Modicon M221. В таблице 3.1 представлена сравнительная таблица характеристик ПЛК.

Таблица 3.1 – Сравнительная таблица характеристик ПЛК

Характеристика	ОВЕН ПР102-24.2416.06.1	Siemens SIMATIC S7-1200	Schneider Electric Modicon M221
Процессор	400 МГц	187.5 МГц	400 МГц

Продолжение таблицы 3.1

Оперативная память	64 МБ	2-8 МБ	64 МБ
Интерфейсы	RS-232/485, Ethernet	PROFIBUS, PROFINET	Ethernet, Modbus
Количество входов/выходов	12 DI/8 DO/4 AI/2 АО	24 DI/16 DO/4 AI/2 АО	12 DI/8 DO/4 AI/2 АО



Рисунок 3.1 – ОВЕН ПР102-24.2416.06.1

ОВЕН ПР102-24.2416.06.1 предлагает отличное соотношение цены и качества, обеспечивая все необходимые функции для автоматизации процесса фильтрации медного концентрата. В то время как более дорогие конкуренты могут предложить большее количество входов/выходов и специфические интерфейсы, для задачи автоматизации фильтрации на основе вакуума этого достаточно, что делает ОВЕН наиболее выгодным выбором.

Модуль аналогового ввода MB210-101 (рисунок 3.2) от компании ОВЕН предназначен для расширения системы автоматизации, позволяя подключать и обрабатывать сигналы с различных датчиков, включая температурные. Он преобразует аналоговые сигналы в цифровые значения и передает их по сети Ethernet. Технические характеристики MB 210-101 приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики MB 210-101

Количество входов (AI)	8
Разрядность АЦП	16 бит

Продолжение таблицы 3.2

Типы поддерживаемых сигналов	Унифицированные сигналы: 0–5 мА, 0(4)–20 мА, ±50 мВ Термосопротивления: Pt50, Pt100, Pt500, Pt1000 Термопары: типы L, J, N, K, S, R, B, T и другие Сопротивление: 0–2 кОм, 0–5 кОм
Предел основной погрешности	Унифицированные сигналы: ±0,25% Термосопротивления: ±0,25% Термопары: ±0,5% Сопротивление: ±0,25%
Напряжение питания	10–48 В (номинальное 24 В)
Потребляемая мощность	Не более 4 Вт при питании 24 В
Степень защиты корпуса	IP20



Рисунок 3.2 – Модуль аналогового ввода MB 210-101

Для обеспечения надежного контроля параметров технологического процесса выбраны датчики, обеспечивающие измерение вакуума, температуры, скорости вращения барабана и уровня суспензии. При выборе учитывались точность, стабильность работы, совместимость с ПЛК и условия эксплуатации.

Для контроля уровня разрежения в вакуумной системе выбран ОВЕН ПД100И (рисунок 3.3), который поддерживает стандартный выходной сигнал 4–20 мА, что обеспечивает его прямую совместимость с ПЛК. Технические характеристики ОВЕН ПД100И приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Технические характеристики ОВЕН ПД100И

Параметр	Значение
Диапазон измерений	-0,1...0 МПа
Выходной сигнал	4-20 мА
Погрешность	±0,5%
Температура среды	-40...+80 °С
Материал мембраны	Нержавеющая сталь

Основные аргументы в пользу выбора данного датчика широкий диапазон измерений (-0,1...0 МПа), высокая точность (±0,5%) и устойчивость к промышленным условиям. Он изготовлен из нержавеющей стали, что увеличивает его долговечность и надежность в эксплуатации.



Рисунок 3.3 – Датчик давления ПД100И

Для измерения температуры суспензии в корыте барабанного фильтра выбран ОВЕН ТСМ50 (рисунок 3.4) на основе термопреобразователя сопротивления Pt100. Технические характеристики ОВЕН ТСМ50 приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Технические характеристики ОВЕН ТСМ50

Параметр	Значение
Диапазон измерений	-50...+150 °С
Класс точности	A
Тип сенсора	Pt100
Материал погружной части	Нержавеющая сталь

Его основное преимущество – высокая точность измерений(класс А) и устойчивость к агрессивным средам благодаря корпусу из нержавеющей стали.



Рисунок 3.4 – Датчик температуры ОВЕН ТСМ50

Датчик скорости вращения барабана. Для контроля частоты вращения барабана вакуумного фильтра выбран TURCK Ri360P1-QR14 (рисунок 3.5), обеспечивающий импульсный выход и поддержку 4-20 мА. Технические характеристики TURCK Ri360P1-QR14 приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Технические характеристики TURCK Ri360P1-QR14

Параметр	Значение
Диапазон измерений	0...6000 об/мин
Выходной сигнал	4-20 мА
Питание	10-30 В DC
Температура эксплуатации	-25...+70 °С
Степень защиты	IP67

Преимущество данного датчика бесконтактный метод измерения, исключающий механический износ, а также высокая степень защиты IP67, что делает его устойчивым к загрязнениям и влаге.



Рисунок 3.5 – Датчик скорости вращения барабана TURCK Ri360P1-QR14

Для контроля уровня суспензии в корыте барабанного фильтра выбран Siemens SITRANS Probe LU (рисунок 3.6), работающий по ультразвуковому принципу и поддерживающий выходной сигнал 4-20 мА. Технические характеристики Siemens SITRANS Probe LU приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Характеристики Siemens SITRANS Probe LU

Параметр	Значение
Диапазон измерения	0,25 до 12 м
Выходной сигнал	4-20 мА, HART
Точность	$\pm 0,15\%$ от диапазона измерения
Рабочая температура	-40 до +80 °C
Материал сенсора	ETFE или PVDF
Степень защиты	IP67/IP68



Рисунок 3.6 – Датчик уровня суспензии Siemens SITRANS Probe LU

Его основное преимущество – бесконтактное измерение, что исключает возможность засорения и повышает надежность

3.2 Программная реализация контура логического управления барабанным вакуум фильтром в среде Owen Logic

Для реализации логического управления барабанным вакуум-фильтром выбран программный комплекс Owen Logic, который позволяет создавать надёжные и эффективные алгоритмы управления технологическими процессами. В основу реализации положен разработанный алгоритм логического управления, обеспечивающий автоматизацию основных функций фильтра, контроль параметров и защиту от аварийных ситуаций.

Первым этапом работы стало формирование блок-схемы (рисунок 3.7) алгоритма логического управления, отражающей последовательность действий и взаимосвязь управляющих сигналов. Данная схема является основой для последующей программной реализации и обеспечивает структурированное и наглядное представление логики работы системы.

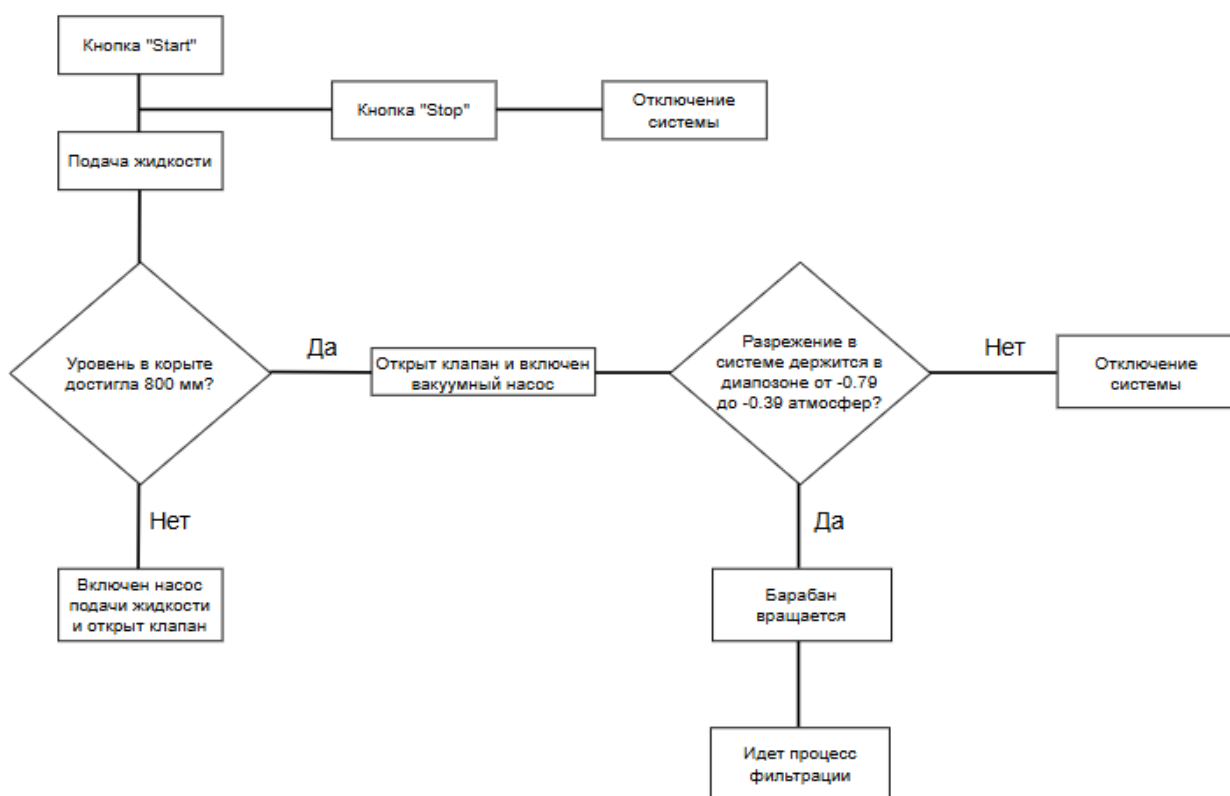


Рисунок 3.7 – Алгоритм управляющей программы

Для реализации алгоритма управления используется программное обеспечение Owen Logic. В первую очередь производится настройка аппаратных средств. В верхней части интерфейса (рисунок 3.8) выбирается категория «Прибор», затем выполняется обновление встроенного программного обеспечения с выбором контроллера модели ПР102-24.2416.06.1.

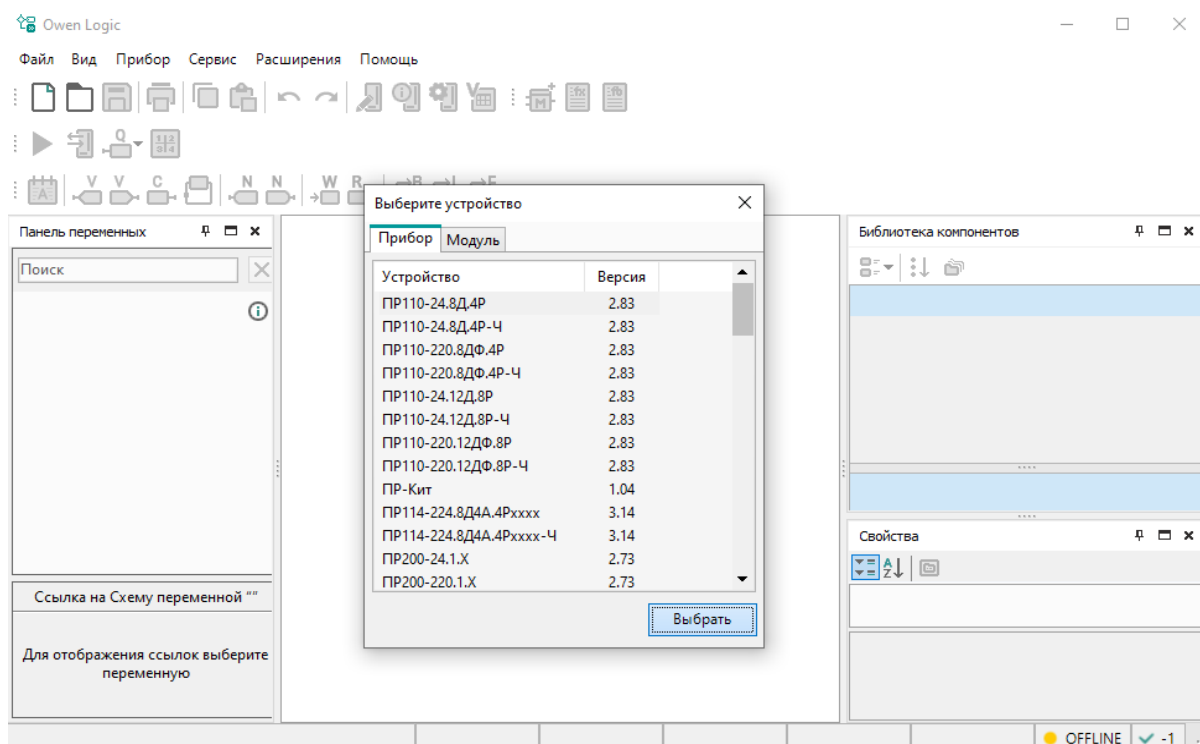


Рисунок 3.8 – Интерфейс программного обеспечения Owen Logic

Далее создадим список необходимых переменных (рисунок 3.9). Переменные служат для обозначения параметров и других данных, которые используются в программах контроллера и обеспечивают обмен информацией с внешними устройствами.

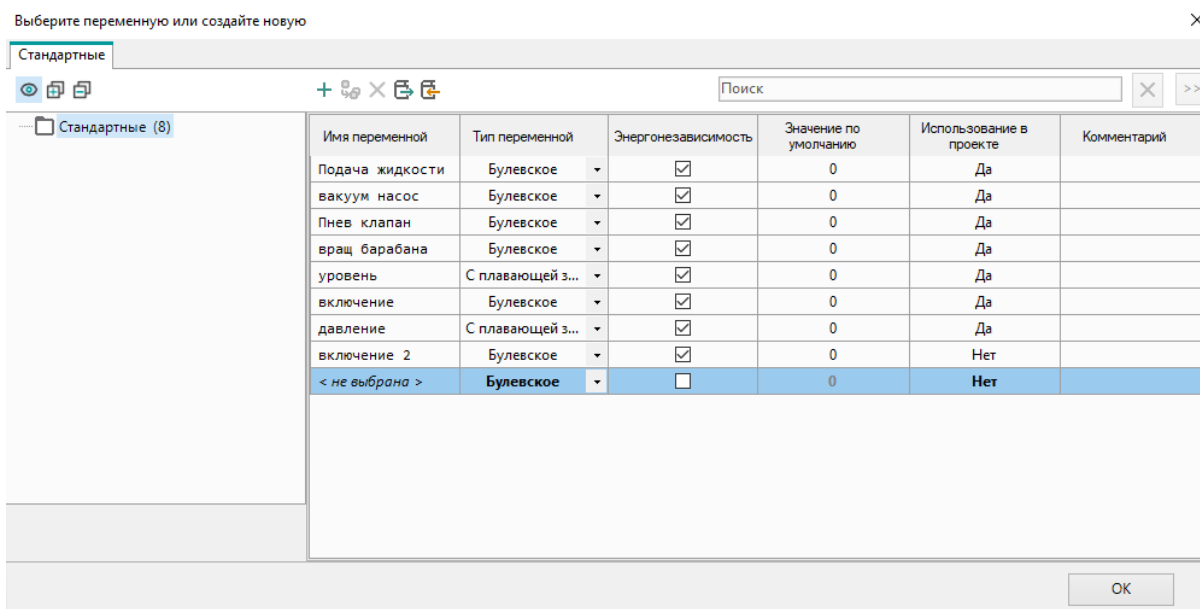


Рисунок 3.9 – Список переменных

Приступим к написанию логики программы на языке FBD (рисунок 3.10).

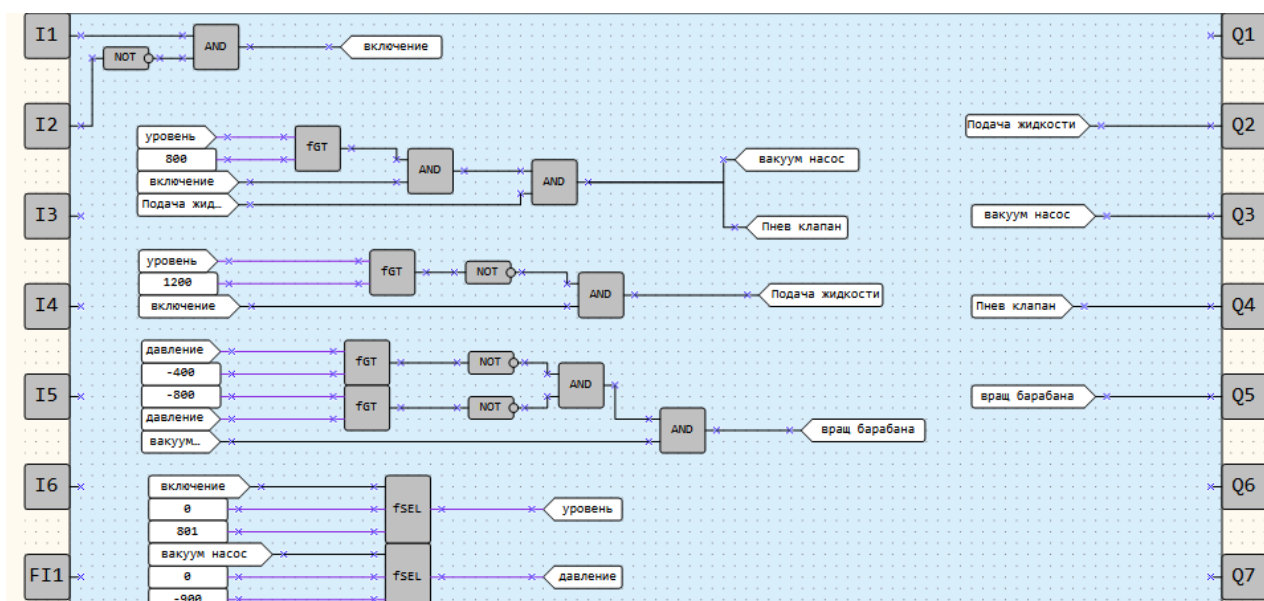


Рисунок 3.10 – Логика программы управления барабанным вакуум фильтром

После проверки синтаксиса программы выполняется её компиляция в среде Owen Logic. Загружать проект в контроллер нет необходимости так как мы уже написали программу внутри ПЛК и программа считается загруженной. После чего запускается тестирование и отладка работы алгоритма управления барабанным вакуум-фильтром (рисунок 3.11).

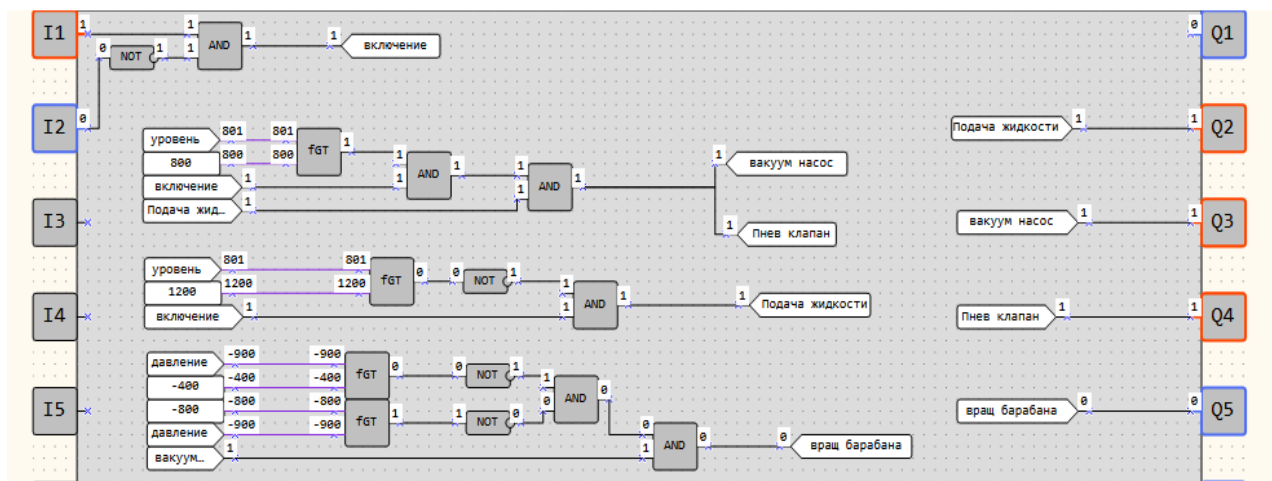


Рисунок 3.11 – Тестирование работы программы

С помощью ПК с установленным программным обеспечением Simple SCADA инженеры и операторы получают возможность разрабатывать автоматизированные решения, создавать и редактировать программы, конфигурировать устройства, а также визуализировать и контролировать процессы фильтрации суспензии медного концентрата (рисунок 3.12).

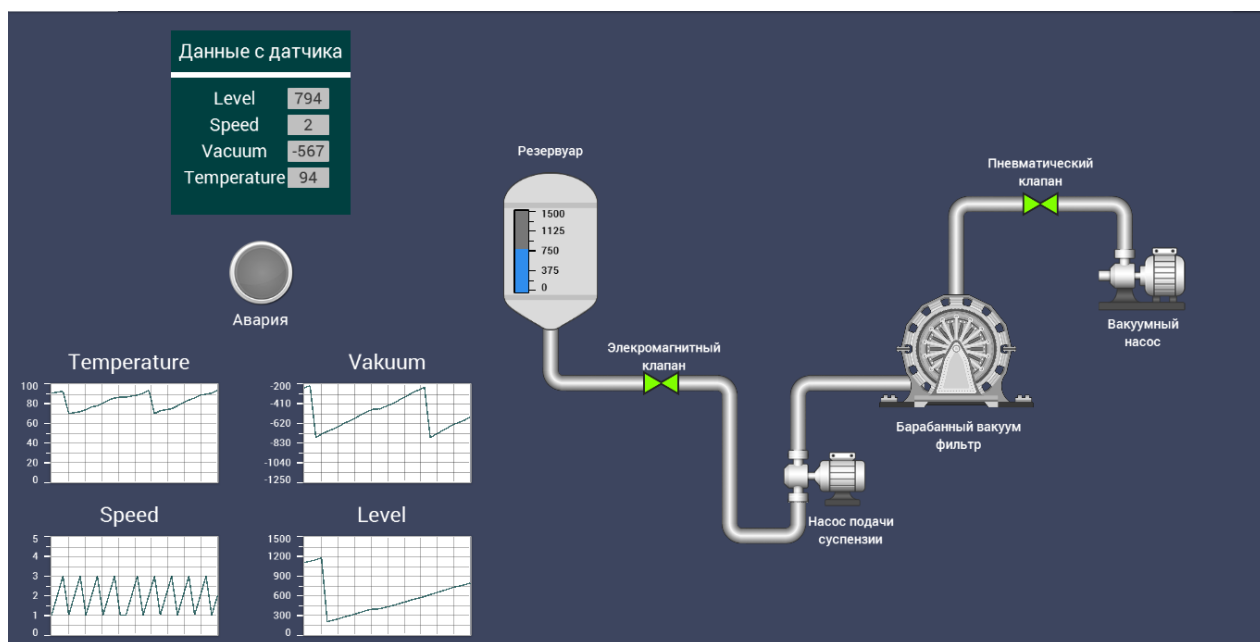


Рисунок 3.12 – Техническая визуализация логического управления барабанным вакуум фильтром

В данном разделе была выполнена программная реализация контура логического управления барабанным вакуум-фильтром с использованием среды Owen Logic. Проведена настройка аппаратной части, создан список переменных, разработан и отлажен алгоритм управления, обеспечивающий надёжное и эффективное функционирование фильтра. Реализация обеспечила автоматизацию основных рабочих процессов и подготовила систему к интеграции с визуализацией в Simple SCADA.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная работа была направлена на разработку системы автоматизации процесса фильтрации суспензии медного концентрата с использованием барабанного вакуум-фильтра. В ходе исследования проведён анализ технологического процесса, что позволило детально изучить особенности объекта управления и выявить основные параметры, влияющие на качество фильтрации.

Была построена математическая модель системы управления, выполнен анализ её динамических свойств и устойчивости. На основе полученной модели произведён синтез регуляторов типов P, PI и PID с заданными требованиями к качеству переходных процессов. Результаты моделирования подтвердили эффективность предложенных решений, обеспечив оптимальный баланс между быстродействием и точностью управления.

Для реализации алгоритмов управления выбран промышленный контроллер и среда программирования Owen Logic. Создан и отлажен программный контур логического управления барабанным вакуум-фильтром, что обеспечивает автоматизацию технологического процесса и возможность оперативного реагирования на возмущения. Разработана система визуализации процесса с использованием Simple SCADA, что позволяет обеспечить контроль и мониторинг работы оборудования.

Полученные результаты свидетельствуют о практической значимости проведённой работы и позволяют рекомендовать разработанную систему для внедрения на предприятиях горнодобывающей промышленности с целью повышения эффективности и качества процесса фильтрации.

В дальнейшем возможно расширение функционала системы за счёт внедрения адаптивных алгоритмов управления и интеграции с более широкими производственными комплексами для комплексной автоматизации технологических процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Дворецкий С.И., Дворецкий Д.С., Кормильцин Г.С., Пахомов А.А. Основы проектирования химических производств – Москва: Издательский дом Спектр, 2014. – 356 с.
- 2 Демихов К.Е., Панфилов Ю.В. Вакуумная техника: Справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов – 3-е изд., – Москва: Машиностроение, 2009. – 400 с.
- 3 Бочаров В.И., Кузнецов А.П. Автоматическое управление, Москва: Издательство Физматлит, 2013. – 432 с.
- 4 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования – СПб.: Профессия, 2004. – 749 с.
- 5 Гудвин Г.К., Греббе С.Ф., Сальдаго М.Э. Проектирование систем управления, Москва: Издательство БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 911 с.
- 6 Седых В.А. Автоматизация технологических процессов: учебное пособие / под ред. В.А. Седых. – Москва: Высшая школа, 2015. – 320 с.
- 7 Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебник для вузов / Ю.Лазарев. – СПб.: Питер, 2005. – 512 с.
- 8 Суриков В.Н., Буйлов Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств, 2017. – 116 с.
- 9 Ротач В. Я. Теория автоматического управления: Учебник для вузов / В.Я. Ротач – 3-е изд., – Москва: Издательство МЭИ, 2005. – 400 с.
- 10 Колесников В.С. Промышленная автоматика: выбор оборудования и систем управления – СПб.: Питер, 2016. – 432 с.
- 11 Яценко А.В. Введение в программирование логических контроллеров – Москва: ДМК Пресс, 2014. – 280 с.

Приложение А

Функциональная схема автоматизации

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Гурбанбердиев Юсуп Мухамметхасанович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Автоматизация технологического процесса фильтрации

Научный руководитель: Шамиль Кошимбаев

Коэффициент Подобия 1: 13.2

Коэффициент Подобия 2: 5.6

Микропробелы: 0

Знаки из здругих алфавитов: 13

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☐ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☒ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата

проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Гурбанбердиев Юсуп Мухамметхасанович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Автоматизация технологического процесса фильтрации

Научный руководитель: Шамиль Кошимбаев

Коэффициент Подобия 1: 13.2

Коэффициент Подобия 2: 5.6

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 13

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

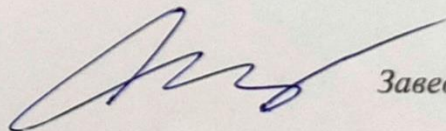
☐ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☒ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата



Заведующий кафедрой

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломный проект
Гурбанбердиева Юсупа Мухамметхасановича
по образовательной программе 6B07103 – «Автоматизация и
роботизация»
на тему: *«Автоматизация технологического процесса фильтрации»*

Выпускная квалификационная работа студента Гурбанбердиева Юсупа посвящена разработке автоматизированной системы управления технологическим процессом фильтрации. Тема проекта является актуальной, так как направлена на повышение эффективности и надежности производственных процессов, а также снижение влияния человеческого фактора.

В работе представлен анализ существующих решений в области автоматизации процессов фильтрации, рассмотрены применяемые технические средства, даны обоснования выбора оборудования и программных средств. Студент выполнил проектирование системы автоматизации с использованием программируемого логического контроллера (ПЛК) и SCADA-системы, предложил алгоритм управления, разработал структурные и функциональные схемы.

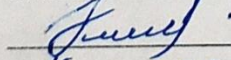
Особое внимание заслуживает практико-ориентированный подход студента — в работе детально проработаны вопросы управления ключевыми параметрами процесса фильтрации, обеспечена возможность интеграции в действующее производство. В пояснительной записке и графических материалах прослеживается логичность, системность и корректное оформление в соответствии с установленными требованиями.

Гурбанбердиев Юсуп продемонстрировал высокий уровень подготовки, способность к самостоятельной работе, грамотное применение теоретических знаний на практике и интерес к инженерным задачам.

Дипломный проект соответствует всем требованиям, предъявляемым к дипломным проектам бакалавриата, а автор — присвоения академической степени **бакалавра техники и технологии** по образовательной программе 6B07103 – «Автоматизация и роботизация».

Научный руководитель

к.т.н., ассоц. кафедры «Автоматизация и управление»

 Кошибаев Ш.К.

«18» 06 2025 г.

РЕЦЕНЗИЯ

На дипломный проект

Гурбанбердиева Юсупа Мухамметхасановича

6B07103 – Автоматизация и роботизация

На тему: Автоматизация технологического процесса фильтрации

Выполнено:

а) графическая часть на 1 листе

б) пояснительная записка на 46 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Дипломный проект посвящен автоматизации фильтрации суспензии медного концентрата на барабанном вакуум-филт্রে. Введение обосновывает актуальность автоматизации на горно-металлургических предприятиях. Основная часть работы состоит из трех разделов. В первом описан процесс фильтрации, устройство филтра и постановка задачи автоматизации. Во втором разработана функциональная схема, математическая модель и синтез PID-регуляторов. Третий раздел охватывает выбор оборудования и программную реализацию алгоритма управления с использованием ПО OWEN Logic. Работа логична и структурирована, охватывает все этапы разработки системы. Однако, в работе не была выявлена эффективность внедрения автоматизированной системы очистки, что, возможно, и не входило в задачи исследования, но тем не менее, было бы полезно увидеть измеримые результаты, такие как показатели влагоемкости или экономии энергии, чтобы можно было более объективно оценить, насколько предложенная система эффективна в реальных условиях.

Оценка работы

Дипломный проект полностью соответствует установленным требованиям к содержанию, оформлению и уровню выполнения выпускных квалификационных работ.

Работа выполнена на высоком техническом и методическом уровне, включает все необходимые структурные элементы, раскрывает заявленную тему и демонстрирует профессиональные компетенции, соответствующие квалификации бакалавра.

Проект оценивается на «отлично» (95%), и студент Гурбанбердиев Юсуп Мухамметхасанович заслуживает присвоения степени бакалавра по образовательной программе 6B07103 – Автоматизация и роботизация.

Рецензент

Доктор PhD, доцент

Кафедры «Автоматизация и управление»

АУЭС им. Г. Даукеева



Оракбаев Е.Ж.