

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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



SATBAYEV
UNIVERSITY

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Робототехники и технических средств автоматики

Қалиев Мәди Жанботаұлы

Проектирование системы управления робототехнического комплекса для расталкивания
сыпучих материалов

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7М07107 – Робототехника и Мехатроника

Алматы 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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



SATBAYEV
UNIVERSITY

Институт Автоматики и информационных технологий

УДК 665.622.43.046.6-52 (043)

На правах рукописи

Қалиев Мәди Жанботаұлы

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации

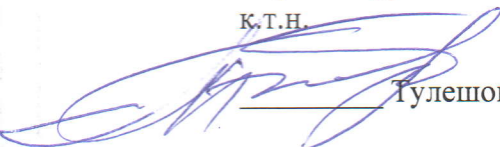
Проектирование системы управления
робототехнического комплекса для расталкивания
сыпучих материалов

Направление подготовки

7M07107 – Робототехника и Мехатроника

Научный руководитель

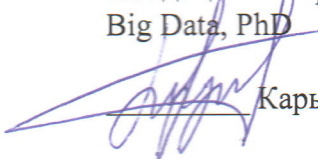
к.т.н.

 Тулешов Е.А.

«___» _____ 2025 г.

Рецензент

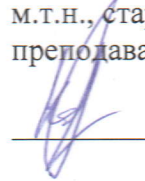
КазНУ имени аль-Фараби,
и.о. доцента кафедры ИИ и
Big Data, PhD

 Карымкасова Н.Т.

«___» _____ 2025 г.

Норм контроль

м.т.н., старший
преподаватель

 Кальменов Е.Т.

«___» _____ 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
РТиТСА, к.т.н., профессор

 Ожикенов К.А.

«___» _____ 2025 г.

Алматы 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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



SATBAYEV
UNIVERSITY

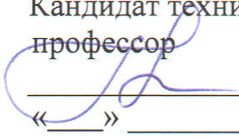
Институт автоматизации и информационных технологий

Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации

7М07107 – Робототехника и мехатроника

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой РТиТСА,
Кандидат технических наук,
профессор

 К.А. Ожикенов
«___» _____ 2025 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Магистранту Қалиев Мәди Жанботаұлы

Тема: Проектирование системы управления робототехнического комплекса для
расталкивания сыпучих материалов

Утверждена приказом № ____ от «___» _____ 202 г.

Срок сдачи законченной диссертации: «___» _____ 2025 г.

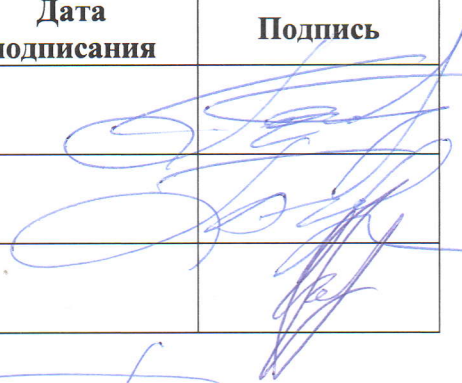
Исходные данные к магистерской диссертации: провести анализ существующих
робототехнических комплексов и систем управления, разработать аппаратную и
программные части системы управления, реализовать адаптивный алгоритм распределения
материала с учетом геометрии загрузки, создать интерфейс управления для оператора,
разработать блок-схему алгоритма управления.

**Продолжение приложения и график
подготовки магистерской диссертации**

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Анализ существующих робототехнических комплексов и систем управления		Выполнено
Разработка аппаратной и программной частей системы управления		Выполнено
Реализация алгоритма распределения материала с учетом геометрии загрузки		Выполнено
Создание интерфейса управления оператора		Выполнено
Разработка блок-схемы алгоритма управления		Выполнено

Подписи

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

Наименования разделов	Консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основная часть	Тулешов Е.А. к.т.н.		
Расчётный раздел	Тулешов Е.А. к.т.н.		
Норм контролер	Кальменов Е.Т. Старший преподаватель		

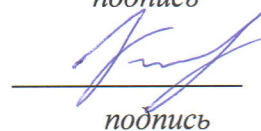
Научный руководитель



Тулешов Е.А.

подпись

Задание принял к исполнению обучающийся


подпись

Қалиев М.Ж.

Дата

«__» _____ 2025 г

БАЯНДАМА

Бұл магистрлік диссертация жылжымалы материалдарды жылжытуға арналған робототехникалық кешеннің басқару жүйесін жобалау мәселелеріне арналған. Жұмыста негізгі назар роботтың қозғалысын басқару алгоритмдеріне, сондай-ақ сенсорлар мен атқарушы механизмдер негізінде құрылған жүйенің архитектурасына аударылады. Сол сияқты зерттеу барысында арнайы әзірленген бағдарламалық қамтамасыз ету жүйесі сипатталады. Алынған нәтижелер өнеркәсіптік автоматтандыруда тікелей қолданыс тапты: олардың негізінде жасалған тәжірибелік-өнеркәсіптік үлгі нақты кен орнында сәтті сынақтан өтті.

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация представляет разработку системы управления робототехнического комплекса для расталкивания насыпных материалов. В работе предложены алгоритмы управления движением робота и описана структура системы, построенная на основе сенсорного оборудования и исполнительных механизмов. Также представлено специально созданное в рамках исследования программное обеспечение. Практическая значимость работы подтверждена: на основе полученных результатов был создан опытно-промышленный образец, успешно прошедший испытания в реальных условиях на действующем руднике.

ABSTRACT

This master's thesis presents the design of a control system for a robotic complex tasked with pushing bulk materials. The work introduces motion control algorithms for the robot and details the system architecture relying on sensor arrays and actuators. Furthermore, it describes the custom software developed specifically for this research. The findings demonstrate practical utility: they served as the basis for an industrial pilot prototype, which underwent successful testing in real-world conditions at a mine site.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1.1 Область применения робототехнических систем для работы с сыпучими материалами	7
1.2 Анализ существующих решений	7
1.3 Обзор и анализ существующих решений	8
1.3.1 Роботы декартовой конфигурации (портальные системы)	8
1.3.2 Цилиндрические роботы	9
1.3.3 SCARA-роботы	10
1.3.4 Delta роботы	10
1.3.5 Шарнирно-сочлененные роботы	11
1.3.6 Полярные (сферические) роботы	11
1.4 Эксплуатационные преимущества декартовых (портальных) систем	12
1.4.1 Практические применения декартовых роботов в промышленности	13
1.4.2 Что такое портальные роботы	14
1.4.3 Как портальные роботы применяются в промышленности	14
1.4.4 Чем отличаются декартовые и портальные роботы	15
1.5 Управление декартовыми роботами	15
1.5.1 Общие сведения о системах управления	16
1.5.2 Роль управляющих систем в работе декартовых роботов	16
1.5.3 Классификация и архитектурные принципы систем управления (СУ) РТК	17
1.5.4 Реализации систем управления для декартовых роботов	18
1.5.5 Аппаратная платформа РТК для работы с сыпучими материалами	19
1.5.6 Сенсорика и обратная связь	20
1.5.7 Программное обеспечение и архитектура системы	21
1.5.8 Базовые алгоритмы управления	21
1.5.9 Интеллектуальные методы и подходы	22
1.5.10 Виртуальное моделирование и концепция цифрового двойника	22
1.5.11 Тренды и направления развития систем управления	23
1.5.12 Обобщение и заключительные положения	23
1.6 Развитие декартовых роботов: взгляд на текущую ситуацию и будущее	24
1.6.1 Перспективы и роль декартовых роботов в современных автоматизированных системах	24
1.7 Обобщение результатов обзора робототехнических систем	25
1.7.1 Выявленные недостатки текущих решений	25
2.1 Формулировка задачи	26
2.2 Архитектура и состав системы управления	26
2.2.1 Функции и иерархия функций РТК «Расталкивателя»	27

2.2.2 Основные компоненты системы	27
2.2.3 Принцип действия системы	28
2.3 Алгоритмы управления движением	28
2.3.1 Основные принципы реализованных алгоритмов	28
2.3.2 Режимы работы РТК «Расталкивателя»	29
3.1 Аппаратная часть прототипа РТК «Расталкивателя»	29
3.1.1 Основные компоненты РТК «Расталкивателя»	29
3.1.2 Описание модели РТК «Расталкивателя»	30
3.1.3 Шаговый двигатель NEMA23	32
3.1.4 Драйвер шагового двигателя DM 556	34
3.1.5 Датчик индуктивный SN04-P	35
3.1.6 Микроконтроллер Arduino Mega 2560	36
3.1.7 Рабочий орган РТК «Расталкивателя»	38
3.1.8 Схема подключения шкафа управления РТК «Расталкивателя»	38
3.2 Алгоритм расталкивания РТК «Расталкивателя»	39
3.2.1 Расчет начальных и конечных точек координат	40
3.2.2 Блок-схема к управляющему алгоритму микроконтроллера Arduino Mega	42
3.2.3 Логика алгоритма расталкивания внутри контейнера	43
3.2.4 Программное обеспечение системы управления	44
3.2.5 Структура программного обеспечения	45
3.2.6 Особенности программной реализации	45
3.3 Примеры интерфейса и взаимодействие оператора с системой	46
3.3.1 Ключевые компоненты пользовательского интерфейса	46
3.3.2 Принципы взаимодействия пользователя с системой	46
4.1 Методика испытаний	47
4.1.1 Условия проведения испытаний	47
4.1.2 Основные этапы проверки работоспособности	47
4.1.3 Применяемое оборудование и средства измерения	48
4.2 Результаты и сравнение с ожидаемыми значениями	48
4.2.1 Основные полученные результаты	48
4.2.2 Сравнение с ожидаемыми результатами	49
4.3 Выводы по результатам испытаний	50
4.3.1 Основные выводы по результатам испытаний	52
5 Будущие планы по улучшению прототипа	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	55

ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленность все активнее внедряет автоматизированные и интеллектуальные системы, способные эффективно функционировать в экстремальных производственных условиях. Особую сложность представляет задача равномерного распределения и перемещения сыпучих материалов – ключевая для горнодобывающей, уранодобывающей и перерабатывающей отраслей. Робототехнические комплексы дают возможность не только существенно поднять производительность и полностью исключить постоянное вредное воздействие на человека, но и свести к минимуму влияние человеческого фактора.

Актуальность исследования продиктована острой потребностью в повышении эффективности и надежности систем управления, отвечающих за точное и безопасное манипулирование сыпучими средами. Отсутствие готовых специализированных решений, адаптированных под специфические условия эксплуатации (например, в карьерах или глубоких рудниках), вынуждает разрабатывать индивидуальные инженерные подходы и специализированные алгоритмы управления.

Цель данной работы – разработка и проектирование системы управления для робототехнического комплекса, предназначенного для операций расталкивания и распределения сыпучих материалов.

В ходе исследования решались следующие задачи:

- Провести детальный анализ существующих решений в области управления роботами для работы с сыпучими средами.
- Разработать архитектуру системы управления, включая подбор и интеграцию сенсорных модулей и исполнительных механизмов.
- Создать и реализовать специализированное программное обеспечение для управления движением робота и обработки данных с датчиков.
- Провести комплексные испытания и дать оценку эффективности разработанной системы управления.
- Обосновать практическую применимость решения путем создания и тестирования опытно-промышленного образца.

Научная новизна работы заключается в:

- 1) разработке и интеграции оригинальной системы управления;
- 2) использовании адаптивных алгоритмов, специально настроенных под динамику сыпучих материалов;
- 3) проведении полноценной практической проверки в реальных условиях промышленного объекта. Исследование опирается на передовые методы в робототехнике, мехатронике и системах автоматизации.

Практическая значимость напрямую связана с потенциалом внедрения разработанного робототехнического комплекса в действующие производственные процессы. Особенно ценным решение представляется для

эксплуатации в сложных условиях рудников и объектов с агрессивными средами, где оно способно обеспечить бесперебойную и безопасную работу.

1.1 Область применения робототехнических систем для работы с сыпучими материалами

Робототехнические системы, предназначенные для работы с сыпучими материалами, находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Наиболее актуальны они в горнодобывающей [1, 3], металлургической, цементной и сельскохозяйственной сферах, где необходима автоматизация процессов транспортировки, распределения и утилизации таких материалов, как руда, песок, глина, зерно и прочее.

Сыпучие среды представляют собой сложный тип [2] рабочих объектов из-за их нестабильных физических свойств, таких как углы естественного откоса, склонность к уплотнению, оседанию и непредсказуемому поведению при перемещении. Это создаёт определённые трудности при проектировании механизмов взаимодействия с ними. В связи с этим внедрение специализированных робототехнических решений позволяет значительно повысить точность и надёжность процессов, а также минимизировать участие человека в опасных или тяжёлых условиях.

Наибольшую эффективность роботизированные комплексы показывают в условиях ограниченного пространства (например, бункеры, шахты, контейнеры), где необходимо равномерно распределить материал или избежать его зависания и налипания на стенках. Кроме того, они применяются в системах автоматического хранения и складирования, на линиях по переработке сырья, а также в автоматизированных карьерах и отвалах.

Таким образом, развитие и внедрение робототехнических систем для управления сыпучими материалами — одно из приоритетных направлений в рамках модернизации промышленной автоматизации.

1.2 Анализ существующих решений

На сегодняшний день существует множество решений, направленных на автоматизацию работы с сыпучими материалами. Большинство из них базируются на применении ленточных транспортеров, вибропитателей, шнековых механизмов и гидравлических толкателей. Однако, несмотря на широкое распространение, такие системы зачастую оказываются малоприспособленными для работы в условиях ограниченного пространства, нестабильной загрузки или необходимости динамического перераспределения материала.

В ряде промышленных предприятий применяются стационарные гидравлические или пневматические толкатели, интегрированные в контейнеры и бункеры. Такие установки требуют высокой точности позиционирования, но не обладают гибкостью, необходимой для обработки материала с неравномерной плотностью или сложной геометрией размещения.

В зарубежной практике особое внимание уделяется мобильным робототехническим платформам, оснащённым датчиками уровня и механическими манипуляторами. Так, например, в Германии и Японии реализованы опытные образцы роботов, способных перемещаться по

поверхности сыпучих материалов и обеспечивать их равномерное распределение с использованием обратной связи по показаниям лидаров и 3D-визуализации [4, 7]. Однако подобные решения являются дорогостоящими и требуют сложного программного обеспечения.

Кроме того, существуют системы с использованием беспилотных тележек и конвейеров, в которых управление осуществляется централизованно с помощью SCADA-систем [5, 10]. Они обеспечивают высокую производительность, но плохо адаптируются к локальным особенностям распределения материалов в замкнутых объёмах.

Таким образом, существующие решения, как правило, либо слишком громоздки и специализированы, либо избыточно сложны и затратны для внедрения в конкретных прикладных условиях. Это подчёркивает необходимость разработки более универсального, гибкого и адаптивного робототехнического комплекса, способного эффективно взаимодействовать с сыпучими материалами в реальном времени.

1.3 Обзор и анализ существующих решений

1.3.1 Роботы декартовой конфигурации (портальные системы)

В сегменте промышленной автоматизации значительную долю занимают роботы декартовой, или портальной, конфигурации. Их отличительная черта — использование исключительно призматических (линейных) кинематических пар для перемещения по трем строго ортогональным осям (традиционно обозначаемым X, Y, Z). Такая кинематическая схема, реализующая прямую декартову систему координат, позволяет достигать высочайших показателей абсолютной позиционной точности и повторяемости положения инструмента.

Конструктивно эти системы представляют собой жесткую пространственную раму (портал), по направляющим которой перемещаются одна или несколько карет (суппортов). На конечный суппорт монтируется исполнительное устройство (шпиндель, захват, дозатор и т.д.). Именно эта простота и жесткость кинематической цепи обеспечивает ключевые эксплуатационные преимущества:

- Перемещение сверхтяжелых грузов (благодаря распределению нагрузки по стационарной раме).
- Выполнение высокоточных операций (погрузка/разгрузка, сборка микроузлов, лазерная резка, нанесение покрытий) в жестко ограниченном, но предсказуемом рабочем объеме.
- Стабильная работа в системах автоматизированного контроля (AOI - Automated Optical Inspection) и сортировки, где минимальная погрешность позиционирования критична.

Главное ограничение портальных роботов — относительно низкая динамика и малая гибкость (ограниченная зона действия по сравнению с шарнирно-рычажными манипуляторами). Однако, для задач, где приоритетом

является не скорость, а абсолютная точность и способность нести высокую нагрузку в заданной области (например, перемещение крупногабаритных заготовок в металлообработке или точная укладка строительных блоков), декартовы системы остаются оптимальным, а часто и безальтернативным решением. Их повсеместное применение в машиностроении, фармацевтике и логистических хабах — прямое следствие указанных инженерных характеристик.

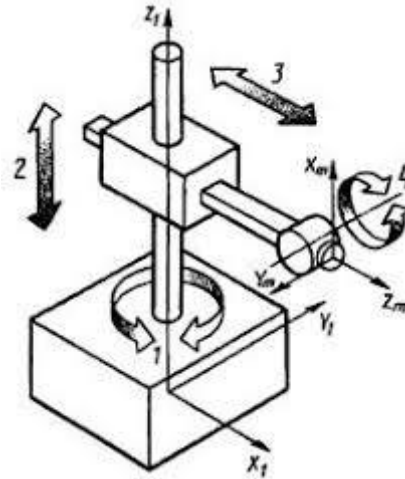


Рисунок 1.1 - Конструкция робота с декартовой системой координат

Управление движением таких роботов осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения на базе числового программного управления (ЧПУ). Это позволяет с высокой точностью задавать положение и ориентацию исполнительного механизма в рабочем пространстве.

1.3.2 Цилиндрические роботы

Цилиндрические модели обладают функциональностью, схожей с декартовыми системами, однако отличаются по кинематической структуре. В их конструкции используются два типа приводов: вращательный и линейный (призматический). Такое сочетание позволяет выполнять как осевое прямолинейное перемещение, так и поворот вокруг центральной оси, обеспечивая гибкость при выполнении производственных операций.



Рисунок 1.2 - Цилиндрический робот

Цилиндрические роботы часто используются там, где нужно перемещать тяжёлые либо хрупкие предметы. Например, они хорошо подходят для работы с ЖК-панелями — аккуратность здесь особенно важна. Эти устройства довольно просты в установке и не требуют сложного обслуживания, что делает их удобными для предприятий. Ещё один плюс — им не нужно много места: при установке на производственной линии они занимают минимум пространства. Всё это объясняет, почему такие роботы часто выбирают для крупного промышленного оборудования, особенно в массовом производстве.

1.3.3 SCARA-роботы

Роботы типа SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) разрабатывались с прицелом на высокоточную сборку. Они умеют перемещаться по трём координатам (X, Y, Z) и выполнять вращательные движения, что удобно, например, при установке мелких деталей. Эти роботы сочетают жёсткость конструкции с ограниченной гибкостью в нужных направлениях, поэтому и получили широкое распространение в сборочных операциях. На некоторых производствах именно SCARA-роботы оказались эффективнее других типов — за счёт быстродействия и точности.



Рисунок 1.3 - Пример SCARA-робота

Эти роботы совмещают характеристики декартовых и цилиндрических моделей, но при этом обеспечивают более высокую скорость работы. Благодаря своей эргономичной конструкции SCARA-роботы проще интегрируются в производственные линии. Они широко используются в сферах сборки, упаковки, фармацевтики, обработки полупроводников и загрузочных операций.

1.3.4 Delta роботы

Delta-роботы, известные также как параллельные механизмы, считаются одними из самых быстрых и дорогостоящих решений в сфере автоматизации. Их структура основана на параллельном соединении приводов в области основания.



Рисунок 1.4 - Delta робот

Наиболее характерные задачи для дельта-роботов — это захват и размещение объектов. Высокая точность позиционирования делает их востребованными в отраслях, где требуется быстрая и точная работа: пищевая, автомобилестроение, электроника и фармацевтика.

1.3.5 Шарнирно-сочлененные роботы

Шарнирные роботы напоминают по конструкции человеческую руку и могут включать от двух до десяти подвижных соединений. Суставы могут быть как вращательными, так и линейными.



Рисунок 1.5 - Шарнирно-сочлененный робот

Роботы с шарнирно-сочленённой конструкцией востребованы благодаря своей компактности и способности выполнять широкий спектр операций. Их преимущество заключается в наличии нескольких степеней свободы, что делает возможным проведение сложных манипуляций при ограниченном рабочем пространстве. Подобные установки находят применение в упаковочных системах, на автомобильных предприятиях, в сварочных процессах, а также при выполнении операций с металлическими и стеклянными заготовками.

1.3.6 Полярные (сферические) роботы

Классифицируемые также как сферические, полярные роботы имеют конструкцию, основанную на двух вращательных и одном поступательном

соединениях между базой и манипулятором. Такая кинематическая схема позволяет выполнять пространственные перемещения с большим радиусом действия. Благодаря этим характеристикам полярные системы применяются в ситуациях, требующих охвата сложной геометрии рабочей области, особенно при необходимости подведения инструмента под различными углами.

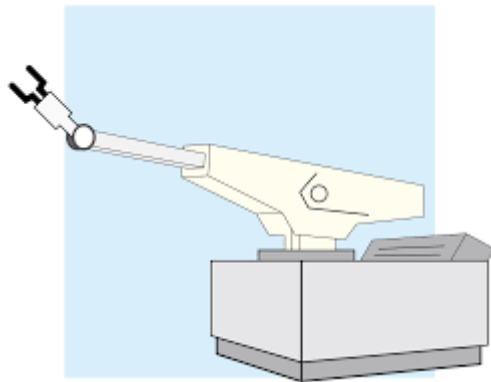


Рисунок 1.6 - Полярный робот

Конструктивная компактность – ключевое эксплуатационное преимущество полярных (сферических) роботов. Их базовая станина занимает минимальную площадь цеха, в то время как рабочий орган (манипулятор) обеспечивает значительный радиус действия за счет комбинации поворотного основания, вертикального лифта и выдвижной телескопической руки. Такая кинематика позволяет выполнять сложные пространственные манипуляции в объемном секторе.

Типичные технологические ниши для этих роботов включают операции, требующие большого охвата при ограниченном «слепом пятне»:

- Дуговую сварку крупногабаритных конструкций (корпуса судов, металлоконструкции).
- Штабелирование/депалетизацию в условиях плотной планировки склада.
- Загрузку/разгрузку станков с ЧПУ, особенно крупноформатных (обработка корпусных деталей).
- Манипуляции в литьевых машинах (извлечение отливок из пресс-форм под давлением).
- Точные операции с хрупкими материалами (монтаж стеклянных элементов, керамики) благодаря плавности хода и минимизации паразитных колебаний в концевой точке.

1.4 Эксплуатационные преимущества декартовых (портальных) систем

Опыт промышленной эксплуатации подтверждает: порталные роботы обеспечивают исключительную кинематическую предсказуемость. Движение строго по ортогональным осям (X, Y, Z) практически исключает накопление угловых погрешностей, характерное для шарнирных манипуляторов.

Результат – субмиллиметровая точность позиционирования (часто в пределах ± 0.05 мм) и повторяемости, критичная для процессов типа:

- Прецизионной сборки микроэлектроники или оптики.
- Лазерной/плазменной резки с жесткими допусками.
- Автоматизированной диспенсерии клеев, герметиков, смазок.

Программирование траекторий для декартовых систем существенно проще: достаточно задать целевые координаты в Декартовом пространстве, без необходимости решения обратных кинематических задач, неизбежных для роботов с вращательными сочленениями.

Гибкость перенастройки – еще один плюс. Адаптация под новую технологическую операцию часто ограничивается модификацией управляющей программы (ПЛК или CNC-кода) без дорогостоящих механических доработок. Это критично для гибких производственных линий (FMS) с частой сменой номенклатуры.

«Прямолинейность» кинематики также упрощает интеграцию с периферией: системы машинного зрения (CV), тактильные/силомоментные датчики, измерительные щупы монтируются и калибруются относительно осей координат с минимальными трудозатратами.

1.4.1 Практические применения декартовых роботов в промышленности

Области внедрения портальных систем охватывают практически весь спектр современного производства:

- Логистика и складирование (Automated Storage/Retrieval Systems - AS/RS): Высокоскоростная паллетизация/депаллетизация, формирование грузовых единиц, сортировка посылок по геометрии/весу.
- Машиностроение: Фрезерная/гравировальная обработка крупногабаритных заготовок на портальных станках, автоматизированная сборка силовых модулей, лазерная маркировка, 3D-печать больших форматов.
- Контроль качества: Автоматизированный оптический контроль (AOI) печатных плат, координатные измерения (СММ) корпусных деталей, дефектоскопия с использованием сканирующих датчиков.

Пищевая и фармацевтическая промышленность (с учетом гигиенического исполнения - IP69K): Дозированная фасовка/упаковка, высокоточная нарезка продуктов, автоматизация лабораторных анализов (пипетирование). Простота конструкции (отсутствие полостей, где может скапливаться грязь) и применение коррозионностойких материалов (нерж. сталь AISI 316L, пищевые пластики) делают их идеальными для СІР-мойки (Clean-in-Place) и работы во влажных/агрессивных средах. Надежность в таких условиях часто превосходит сложных шарнирных конкурентов.

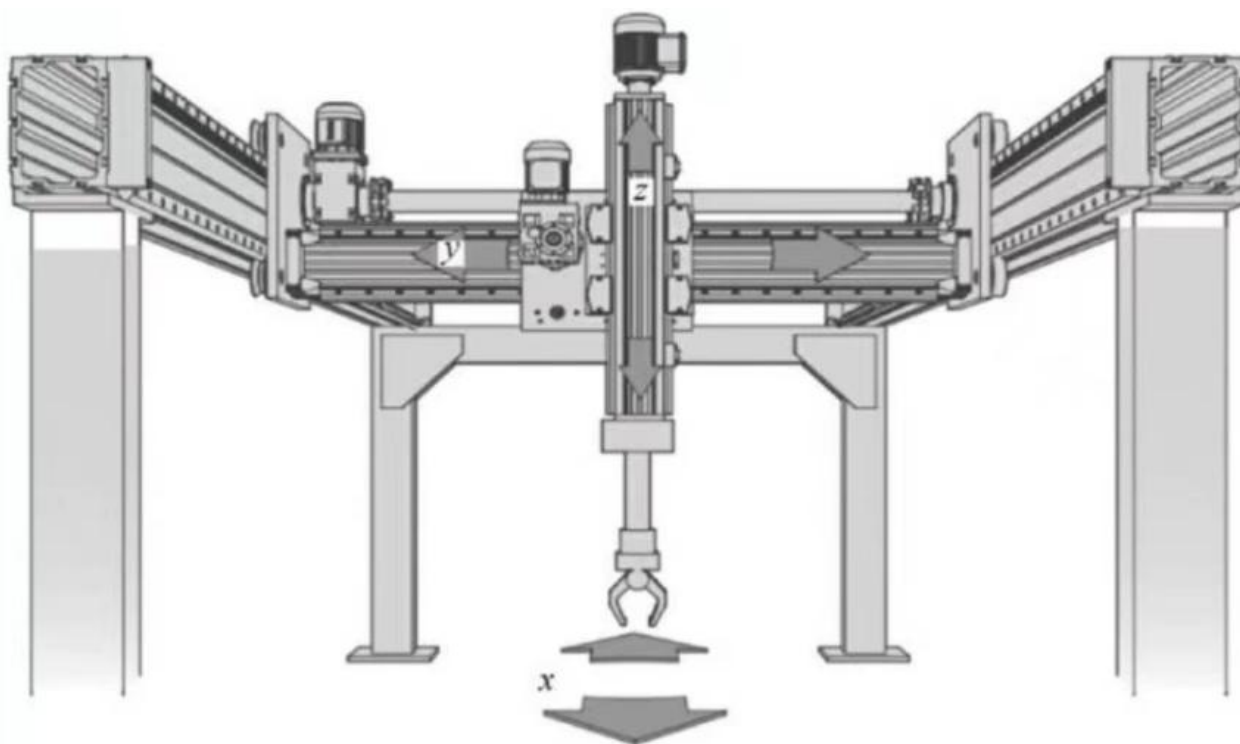


Рисунок 1.7 - Пример портального декартового робота

1.4.2 Что такое портальные роботы

Портальные роботы представляют собой автоматизированные системы, в которых движение осуществляется за счёт подвижной каретки, перемещающейся по неподвижной раме. Основная их особенность — возможность точно позиционировать инструмент или захват в трёхмерном пространстве, причём с достаточно большой рабочей зоной.

Такие роботы находят применение в самых разных задачах: от сварки и окраски до сборки деталей и контроля качества. Их конструкция позволяет работать как с миниатюрными компонентами, так и с крупногабаритными листами металла или стекла. К тому же, они надёжно функционируют даже в нестандартных условиях — например, в высокотемпературной среде или в помещениях с повышенными санитарными требованиями.

1.4.3 Как портальные роботы применяются в промышленности

На производстве портальные роботы часто используются там, где необходимы высокая повторяемость и автоматизация однотипных процессов. Например, в автомобильной промышленности их можно встретить на участках сварки кузовов, окраски и укладки элементов. В электронике они размещают микросхемы, проводят пайку и даже выполняют автоматизированные тесты.

В пищевой и упаковочной сферах такие системы берут на себя задачи сортировки, упаковки и маркировки продукции. Это не только ускоряет процесс, но и снижает нагрузку на персонал, особенно в зонах с повышенными требованиями к стерильности или безопасности. Благодаря этим качествам,

портальные роботы часто используются для работы с агрессивными или опасными материалами.

1.4.4 Чем отличаются декартовые и портальные роботы

На первый взгляд может показаться, что портальные и декартовые роботы — почти одно и то же, ведь оба типа опираются на прямолинейные перемещения вдоль осей. Однако на практике между ними есть важные различия.

Декартовые роботы, как правило, компактнее и легче, они идеально подходят для высокоточных задач, особенно в ограниченном пространстве. Их часто применяют в ситуациях, где важны скорость и точность — например, при нанесении клея или при выполнении операций *pick-and-place*.

Портальные же системы более универсальны в плане нагрузки и размеров обрабатываемых объектов. За счёт массивной конструкции они способны перемещать тяжёлые детали и даже инструменты с несколькими степенями свободы. Это делает их оптимальным решением для сложных задач, особенно там, где доступ к рабочей зоне ограничен.

1.5 Управление декартовыми роботами

Система управления является ключевым элементом любого декартового робота. Именно она отвечает за то, насколько плавно и точно будет выполняться перемещение в процессе работы. Через неё настраиваются скорость движения, направление, уровень усилия, а также взаимодействие с окружающей средой или объектами на траектории.

Современные системы управления позволяют не только задавать заранее подготовленные маршруты, но и адаптироваться в реальном времени. Благодаря этому роботы могут реагировать на внешние изменения, например, на смещение заготовки или появление препятствия.

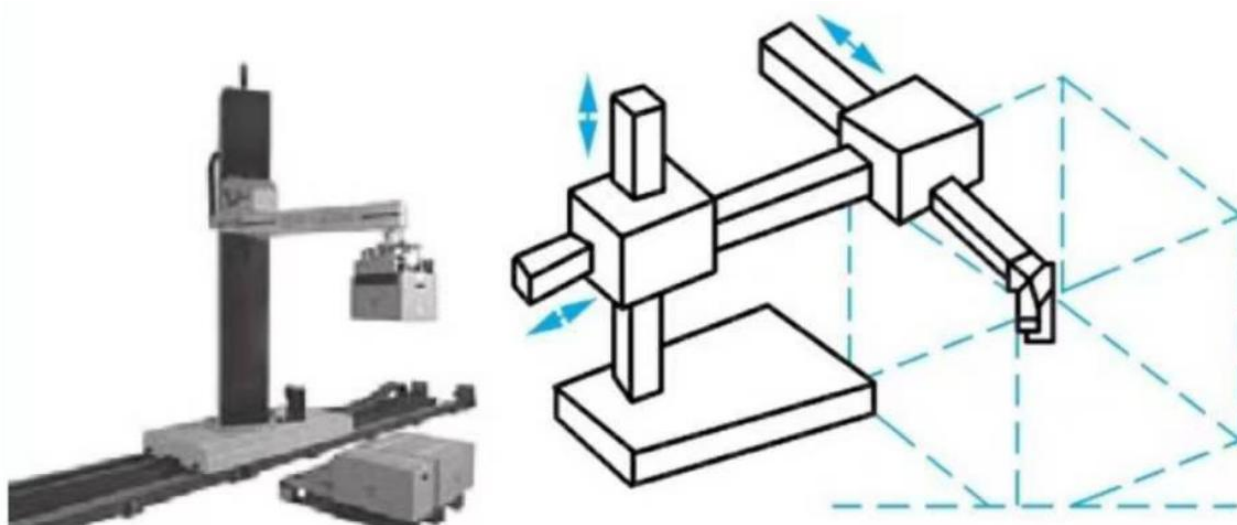


Рисунок 1.8 - Область действия декартового робота

1.5.1 Общие сведения о системах управления

Современные подходы к построению систем управления в робототехнике основаны на синтезе программных алгоритмов, методов математического моделирования и элементов искусственного интеллекта. Такие системы обеспечивают не только точное выполнение заданий, но и способность к адаптации, устойчивости в нестандартных ситуациях и обработке сложных сценариев взаимодействия с внешней средой. Постепенное внедрение средств машинного обучения и анализа производственных данных позволяет улучшать логистику операций, оптимизировать энергозатраты и снижать износ оборудования.

Особенно остро вопросы эффективного управления встают в тех отраслях, где осуществляется обработка и перемещение сыпучих материалов — в горной промышленности, аграрном секторе, строительстве и химическом производстве. Работы, связанные с равномерным распределением или подачей таких материалов, предъявляют особые требования к точности дозировки, стабильности траектории и своевременности выполнения команд. Нарушение даже одного параметра может привести к потере сырья или аварийной остановке всего производственного процесса.

Разработка надёжной системы управления для робототехнических комплексов в этой области требует учёта целого ряда факторов: от характеристик самого материала (текучесть, склонность к слёживанию) до архитектурных особенностей механизма, условий эксплуатации и алгоритмов автоматической коррекции при внешних возмущениях.

1.5.2 Роль управляющих систем в работе декартовых роботов

Декартовые роботы, функционирующие в прямоугольной системе координат, зависят от управляющих систем в гораздо большей степени, чем это может показаться на первый взгляд. Именно через управляющую часть обеспечивается синхронизация осей, контроль скорости и направление перемещения. Погрешности в этих параметрах могут повлечь за собой не только отклонения от траектории, но и повреждение обрабатываемого изделия, сбой всей автоматической линии или остановку технологического цикла.

Надёжная система управления выполняет не только задачу исполнения заранее заданной программы, но и контролирует текущие параметры движения, отклонения от номинала, а в ряде случаев — даже прогнозирует потенциальные неисправности. Такие функции особенно важны при непрерывной работе в условиях высокой производственной нагрузки.

Кроме того, грамотное проектирование СУ позволяет обеспечить бесперебойную интеграцию декартового робота с другими компонентами производственной системы — будь то конвейерные линии, системы захвата, средства визуального контроля или датчики положения. Таким образом, от эффективности работы управляющей системы напрямую зависит

производительность, качество выпускаемой продукции и безопасность операторов.

1.5.3 Классификация и архитектурные принципы систем управления (СУ) РТК

В инженерной практике управления робототехническими комплексами (РТК) сложились три доминирующих архитектурных подхода:

1) Иерархические (вертикально интегрированные) СУ:

- *Принцип:* Жесткое разделение управления по уровням ("снизу вверх"):
- *Нижний уровень:* Непосредственное управление приводами (серво контуры, ПЛК), сбор данных с датчиков в реальном времени (RT).
- *Средний уровень:* Координация движений, локальное планирование траекторий, обработка сенсорных данных (высокоуровневые ПЛК, IPC).
- *Верхний уровень:* Стратегическое планирование задач, взаимодействие с АСУ ТП, обработка исключительных ситуаций (SCADA/HMI, промышленные ПК).
- *Преимущества:* Детерминированность, предсказуемость отклика, простота отладки.
- *Недостатки:* Низкая устойчивость к нештатным ситуациям и изменениям среды; отказ центрального узла (верхнего уровня) парализует всю систему; сложность масштабирования [11]. Типично для ранних промышленных роботов и высокоточных стационарных систем.

2) Распределенные (децентрализованные) СУ:

- *Принцип:* Сеть интеллектуальных узлов (агентов), каждый обладает локальной автономией и решает свою подзадачу (напр., управление отдельным модулем РТК). Узлы обмениваются данными по промышленным шинам (EtherCAT, PROFINET, CANopen).
- *Преимущества:* Высокая отказоустойчивость (выход одного узла не фатален), гибкость и адаптивность, простота масштабирования путем добавления новых узлов [12].
- *Недостатки:* Сложность синхронизации узлов, обеспечение консистентности данных, повышенные требования к пропускной способности сети, сложность проектирования глобального поведения. Актуально для мобильных роботов, роевых систем, гибких производственных ячеек.

3) Гибридные СУ:

- *Принцип:* Комбинация иерархии и распределенности. Ключевые стратегические решения принимаются централизованно, а тактические задачи (движение, реакция на локальные помехи)

делегируются на уровень интеллектуальных подсистем или агентов.

- *Преимущества:* Баланс между глобальной оптимизацией и локальной адаптивностью, повышение общей надежности и гибкости [13].
- *Недостатки:* Высокая сложность проектирования и реализации, необходимость тщательной проработки интерфейсов между уровнями. Современный тренд для сложных автономных РТК (AGV/AMR, коллаборативные роботы).

1.5.4 Реализации систем управления для декартовых роботов

Выбор СУ для портальных систем диктуется требованиями к точности, динамике и адаптивности:

1) Классические ПИД-регуляторы (Пропорционально-Интегрально-Дифференциальные):

- *Применение:* Базовое управление позиционированием по каждой оси (X, Y, Z). Основа: Обратная связь по энкодерам двигателей/линейным датчикам (линейные шкалы, LVDT).
- *Преимущества:* Проверенная надежность, относительная простота настройки для линейных систем с известной инерцией, высокая статическая точность (до ± 0.01 мм при использовании прецизионных датчиков).
- *Ограничения:* Чувствительность к нелинейностям (люфты, трение), изменению нагрузки, требует точной модели объекта для оптимальной настройки. Доминирует в задачах статического позиционирования и простых траекториях.

2) Адаптивные и интеллектуальные системы управления:

- *Адаптивное управление (AU):* Автоматическая подстройка параметров ПИД или структуры регулятора онлайн в ответ на изменение динамики (напр., массы перемещаемого груза, износ механизмов). Использует методы идентификации моделей (RLS) или прямые алгоритмы адаптации (MRAC, STC).
- *Управление на основе моделей (MPC - Model Predictive Control):* Продвинутая техника, использующая динамическую модель робота для прогнозирования его поведения и оптимизации управляющих воздействий на горизонте прогноза. Эффективно для сложных траекторий с ограничениями.
- *Машинное обучение (ML):* Нейросетевые регуляторы (NN Control), обучение с подкреплением (RL) для оптимизации параметров или выработки стратегий управления в сложных/недетерминированных средах. Позволяет реализовать динамическое перенастраивание логики работы без остановки системы.

3) Нечёткая логика (Fuzzy Logic):

- *Применение:* Управление в условиях высокой неопределенности, нечетких входных данных (напр., оценка состояния сыпучей среды по виброакустике, изображению), или когда точная математическая модель недоступна/неоправданно сложна.
- *Принцип:* Использование лингвистических переменных ("низкий уровень", "высокая вязкость") и правил вида "ЕСЛИ ... ТО ..." для принятия решений. Особенно эффективна на верхнем уровне управления для интеграции разнородных сенсорных данных и принятия стратегических решений в реальных условиях карьера/рудника.

1.5.5 Аппаратная платформа РТК для работы с сыпучими материалами

Эффективность комплекса критически зависит от выбора и интеграции надежной аппаратной базы [6]:

- Исполнительные устройства (Актuatorы):
 - Основные типы: Линейные толкатели (пневмо/электроприводные), вибрационные питатели/платформы (для разрыхления и равномерной подачи), шнековые конвейеры (для транспортировки и дозирования). Выбор определяется: типом материала (размер фракции, абразивность, влажность), требуемым усилием, скоростью и точностью подачи.
- Сенсорная подсистема:
 - Ключевые датчики:
 - Уровнемеры: Радарные (для пыльных сред), ультразвуковые (универсальные), лазерные (высокая точность на малых расстояниях).
 - Объем/Массовый расход: Шнековые счетчики, конвейерные весы, томсоновские мосты для сыпучих сред.
 - Прочие: Датчики давления (в пневмосистемах), влажности (гигрометры), вибрации (акселерометры для диагностики механизмов), 3D-камеры (для оценки профиля материала).
- Приводная система:
 - Типы приводов: Прецизионные серводвигатели (с энкодерами, для точного позиционирования), шаговые двигатели (для дозирования с открытым контуром), гидравлические цилиндры (для высоких усилий >10 кН), пневмоцилиндры (быстрые ходы, средние усилия).
 - Критерии выбора [14]: Максимальное усилие/крутящий момент, скорость перемещения, точность позиционирования ($\pm$), массо-инерционные характеристики

перемещаемого материала, условия эксплуатации (пыль, влага, температура).

- Управляющая вычислительная платформа:
 - Программируемые логические контроллеры (ПЛК): Промышленные (Siemens S7, Beckhoff CX, Allen-Bradley ControlLogix) – для нижнего уровня (управление приводами, сбор данных с датчиков RT), реализация ПИД, безопасность (Safety PLC).
 - Встраиваемые компьютеры/Промышленные ПК (IPC): на базе x86 (Intel Celeron/i3, AMD Ryzen Embedded) или ARM (Raspberry Pi Compute Module 4, NVIDIA Jetson) – для среднего/верхнего уровня (выполнение сложных алгоритмов АУ, MPC, ML, обработка изображений, HMI). Часто работают под ОС реального времени (RT-Linux, QNX, VxWorks).
 - Микроконтроллеры (MCU): STM32 (Cortex-M), ESP32 – для управления отдельными датчиками, простыми актуаторами или как шлюзы связи.

1.5.6 Сенсорика и обратная связь

Формирование эффективного контура обратной связи является одной из центральных задач при проектировании робототехнических комплексов, особенно при работе с нестабильными или сыпучими средами. Для этого в состав системы управления интегрируется множество сенсорных компонентов, каждый из которых отвечает за определённый аспект контроля:

- Ультразвуковые и лазерные датчики дистанции применяются для непрерывного мониторинга уровня загрузки, что позволяет избегать переполнения и перерасхода материала.
- Визуальные системы, включающие промышленные камеры и алгоритмы компьютерного зрения, используются для анализа структуры поверхности, выявления неравномерностей и определения формы объекта подачи.
- Тензодатчики обеспечивают динамическое измерение массы поступающего сырья и позволяют корректировать объём подачи в реальном времени.
- Индуктивные и инфракрасные сенсоры устанавливаются для диагностики состояния приводов и положения механизмов, а также определения препятствий и перегрева [15].

Обработка данных от сенсоров осуществляется на низком уровне программного обеспечения с минимальными задержками. Такая архитектура гарантирует высокую адаптивность: система способна в реальном времени корректировать команды исполнительным механизмам в ответ на изменяющиеся условия производственной среды.

1.5.7 Программное обеспечение и архитектура системы

Ключевую роль в построении современного программного обеспечения для систем управления играет платформа ROS/ROS 2 — модульная среда с поддержкой распределённых вычислений. Её использование позволяет реализовать высокоуровневое взаимодействие между узлами, включая:

- маршрутизацию сообщений (publisher-subscriber),
- управление последовательностью действий робота (action servers),
- интеграцию с внешними сенсорными системами,
- планирование траекторий с учётом ограничений и внешней информации [16, 17].

Благодаря поддержке реального времени и распределённой архитектуры, ROS 2 хорошо адаптирован к промышленным условиям, включая работу в изолированных сетях, кластерах или облачных инфраструктурах. Для написания узлов и логики управления применяются языки программирования Python (для прототипирования) и C++ (для реализаций с жёсткими требованиями к скорости и надёжности).

На уровне диспетчеризации и человеко-машинного интерфейса применяются SCADA-системы, которые обеспечивают визуализацию процессов, ведение логов [18], архивирование и удалённый контроль. В перспективе предусмотрена интеграция с цифровыми двойниками и интеллектуальными модулями анализа данных.

1.5.8 Базовые алгоритмы управления

Эффективность движения исполнительных механизмов во многом определяется выбором управляющих алгоритмов. Наиболее распространённые из них:

- ПИД-регуляторы (пропорционально-интегрально-дифференциальные) — применяются для стабилизации положения и скорости; позволяют минимизировать отклонения от заданного значения при ограниченной вычислительной сложности.
- Field-Oriented Control (FOC) — метод управления электроприводами, ориентированный на декомпозицию тока на активную и реактивную составляющие, что особенно актуально при работе с синхронными двигателями.
- Предиктивное управление (Model Predictive Control) — позволяет учитывать физические ограничения механизма и предсказывать его реакцию на управляющее воздействие [21].
- Адаптивные алгоритмы — применяются при переменных свойствах сыпучих материалов

Дополнительно применяются методы цифровой фильтрации (например, фильтр Калмана, медианная фильтрация) для компенсации шумов сенсоров и повышения надёжности измерений. Также реализуются алгоритмы оценки текущего состояния объекта на основе данных с обратной связи и моделей системы.

1.5.9 Интеллектуальные методы и подходы

Современные задачи автоматизации требуют высокой степени адаптации, что достигается за счёт внедрения интеллектуальных алгоритмов управления:

- Нечёткая логика (fuzzy logic) позволяет формализовать нестрогие определённые условия, характерные для реальных процессов: "слишком много материала", "почти пусто", "замедление подачи".
- Нейросетевые модели обеспечивают возможность предсказания ситуаций, таких как засоры в канале подачи, неравномерное распределение материала, отклонения от нормы без явного программирования.
- Экспертные системы применяются для интерпретации данных и принятия решений на основе заранее заданных правил и логики действий оператора.

Интерес также представляют подходы на основе обучения с подкреплением (reinforcement learning), при которых робот обучается оптимальному поведению в среде через пробу и ошибку, получая обратную связь в виде награды. Такие системы особенно перспективны для сложных сценариев взаимодействия с неоднородной средой, где традиционные алгоритмы неэффективны.

1.5.10 Виртуальное моделирование и концепция цифрового двойника

С целью повышения эффективности разработки и испытания систем управления робототехнических комплексов активно внедряется технология цифровых двойников. Под этим термином подразумевается динамическая цифровая репрезентация физического объекта, синхронизированная с его реальным прототипом посредством обмена телеметрическими данными.

Применение данной технологии позволяет заблаговременно анализировать поведение роботизированной системы в различных производственных сценариях. Наиболее востребованными инструментами при построении и отладке цифровых моделей являются:

- Gazebo и Webots — платформы для трёхмерного моделирования, обеспечивающие реалистичную имитацию взаимодействия оборудования с материалами, включая расчёт траекторий, столкновений и сил трения;
- MATLAB/Simulink — программный комплекс для разработки математических моделей, симуляции замкнутых контуров управления и оценки устойчивости алгоритмов;
- Digital Twin Framework — архитектурные решения, реализующие сквозную интеграцию виртуальной модели с физическим устройством через поток данных в реальном времени.

Использование цифровых двойников позволяет имитировать аварийные и нестандартные режимы эксплуатации, а также проводить оптимизацию без риска повреждения оборудования и простоев в производстве.

1.5.11 Тренды и направления развития систем управления

Современные тенденции в области промышленной робототехники демонстрируют активную интеграцию систем управления с цифровыми и интеллектуальными технологиями. Наиболее перспективными направлениями считаются:

- Связь с инфраструктурой IoT и облачными вычислениями, позволяющая организовать удалённый контроль технического состояния, вести предиктивную аналитику и управлять распределёнными установками с единой платформы;
- Интеграция с мобильными платформами (AGV), что обеспечивает автоматизацию внутрипроизводственной логистики и комплексное управление перемещением сыпучих грузов;
- Использование методов машинного зрения и нейросетей для анализа структуры материала, распознавания аномалий в подаче, а также оценки плотности и фракционного состава;
- Разработка решений для экстремальных условий эксплуатации, включая работу при высоких температурах, влажности, агрессивных химических средах и в условиях пониженного давления [20];
- Оптимизация расхода энергии за счёт интеллектуального регулирования приводов, минимизации холостых перемещений и планирования экономичных траекторий;
- Координация между несколькими РТК с использованием межмашинных сетей, обеспечивающих синхронизацию задач и обмен данными;
- Внедрение унифицированных интерфейсов и стандартов, направленных на совместимость аппаратного и программного обеспечения от разных производителей [19];
- Применение технологии блокчейн для фиксации технологических параметров, отслеживания логистических операций и обеспечения достоверности производственной информации.

1.5.12 Обобщение и заключительные положения

Проектирование и внедрение эффективной системы управления робототехническими платформами, предназначенными для переработки и транспортировки сыпучих материалов, требует системного подхода, объединяющего знания в области мехатроники, автоматизации, теории регулирования и интеллектуального анализа данных.

Актуальные программно-аппаратные решения предоставляют возможность создавать адаптивные и интеллектуальные комплексы, устойчивые к возмущениям и изменениям технологической среды.

Использование цифровых двойников, сенсорной избыточности, алгоритмов машинного обучения и распределённой архитектуры управления существенно повышает надёжность и производительность таких систем.

Вектор дальнейшего развития связан с расширением взаимодействия РТК с цифровой инфраструктурой предприятия, углублением анализа процессов и широким применением технологий искусственного интеллекта на всех этапах — от проектирования до эксплуатации.

1.6 Развитие декартовых роботов: взгляд на текущую ситуацию и будущее

Многие промышленные процессы сегодня невозможно представить без участия роботов. Особенно это касается декартовых систем — они просты по конструкции, но при этом крайне эффективны. За последние годы стало очевидно, что такие роботы уже выходят за рамки традиционного «pick and place». На заводах, где применяются сложные производственные ячейки, можно наблюдать сразу несколько порталных установок, работающих синхронно и решающих более комплексные задачи.

Лично я считаю, что одной из самых перспективных тенденций стало внедрение алгоритмов самообучения. Это не просто модное направление — такие подходы позволяют системе самой подстраиваться под особенности материала, траектории и даже состояние оборудования. Современные датчики и системы управления, использующие анализ данных в реальном времени, постепенно приближают нас к фабрикам, где человек лишь задаёт цель, а не контролирует каждый шаг.

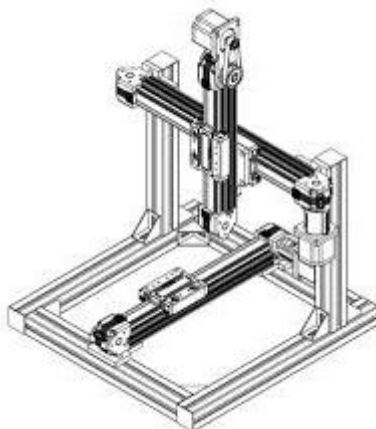


Рисунок 1.9 - Декартовый промышленный робот

1.6.1 Перспективы и роль декартовых роботов в современных автоматизированных системах

С развитием производственных технологий растёт потребность в высокоточной и адаптивной автоматизации, где декартовые роботы продолжают играть ключевую роль. Их линейная конфигурация обеспечивает превосходную точность повторяемых перемещений, что особенно ценно в задачах механической обработки, точной сборки и контроля изделий.

Интеграция сенсорных технологий и алгоритмов машинного обучения расширяет функциональность данных систем — они способны не только исполнять запрограммированные действия, но и подстраиваться под изменяющиеся условия эксплуатации. В перспективе такие роботизированные решения будут являться базовыми элементами гибких производственных ячеек, обеспечивая быстрый переход к новым видам продукции и снижая издержки на переоснащение.

1.7 Обобщение результатов обзора робототехнических систем

Проведённый анализ показал, что существующие технические решения в области автоматизации процессов с сыпучими материалами часто ограничены по гибкости и масштабируемости. Это обусловлено как аппаратными особенностями, так и ограничениями на уровне программного обеспечения. В результате предпочтение было отдано декартовой (портальной) архитектуре, которая сочетает универсальность, простоту и эффективность в задачах перераспределения материала.

1.7.1 Выявленные недостатки текущих решений

В ходе анализа были отмечены следующие проблемы:

- избыточная жесткость конструкций, ориентированных на узкий круг задач;
- отсутствие механизмов адаптации алгоритмов управления в реальном времени;
- сложности при техническом обслуживании и перенастройке;
- высокая цена систем, основанных на мобильной робототехнике и системах компьютерного зрения.

При этом прослеживается тенденция к включению интеллектуальных компонентов управления, что позволяет улучшить качество работы с материалами и повысить степень автономности. Однако внедрение таких решений требует значительных ресурсов, как финансовых, так и вычислительных.

Учитывая изложенное, возникла необходимость в разработке нового концептуального подхода, который бы включал:

- модульную программно-аппаратную структуру;
- компактную и ремонтпригодную мехатронную платформу;
- использование недорогих, но эффективных датчиков и приводов;
- возможность программной адаптации под различные производственные сценарии;
- проверку работоспособности в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации.

Эти принципы легли в основу технического задания и проектных решений, реализованных в рамках настоящего исследования.

2.1 Формулировка задачи

Целью данной работы является создание системы управления роботизированного комплекса, предназначенного для перераспределения сыпучих материалов в замкнутом пространстве контейнера. Комплекс должен обеспечивать равномерное выравнивание материала, поступающего сверху в виде насыпи конической формы.

В рамках разработки необходимо было учесть ряд требований, предъявляемых к техническим характеристикам и условиям эксплуатации комплекса:

- 1) Компактность исполнения — робот должен быть размещён в ограниченном пространстве (например, в условиях горных выработок или иных труднодоступных площадках без подготовки).
- 2) Адаптивность алгоритмов управления — система должна реагировать на изменения распределения материала и вносить коррективы в режим работы.
- 3) Обратная связь — наличие сенсорных средств отслеживания положения подвижных узлов.
- 4) Энергоэффективность — особенно актуально при работе от автономных источников питания.
- 5) Простота реализации — как в аппаратной, так и в программной части, для обеспечения отказоустойчивости и масштабируемости.
- 6) Интеграция с внешними платформами — возможность сопряжения с загрузочными установками или логистическими модулями.

Дополнительным условием являлось выполнение автоматического режима работы с минимальным участием оператора. Разработка должна завершиться созданием работоспособного прототипа, способного выполнять функции распределения сыпучего материала в условиях, приближённых к реальной эксплуатации.

Таким образом, в рамках поставленной задачи необходимо:

- разработать конструкцию аппаратной части комплекса;
- спроектировать архитектуру системы управления;
- реализовать программную составляющую;
- провести проверку работоспособности комплекса на стендовом или опытно-промышленном уровне.

2.2 Архитектура и состав системы управления

Система управления робототехнического комплекса для перераспределения сыпучих материалов представляет собой совокупность аппаратных и программных компонентов, объединённых в иерархическую архитектуру. При проектировании особое внимание уделялось модульности построения, надёжности работы и возможности взаимодействия с внешними промышленными интерфейсами и системами автоматизации.

2.2.1 Функции и иерархия функций РТК «Расталкивателя»

Субъект: «Расталкиватель»

Объект: Сыпучий материал.



Рисунок 2.1 - Функция

Полезная функция: Расталкивание сыпучего материала.

Бесполезная функция: Лишние движения рабочего органа.

Вредная функция: Не обнаружено.

Достаточная функция: Растолкать слой в течение 15 мин.

Вспомогательная функция 1: Не поднимать пыль.

Вспомогательная функция 2: Автоматизация процесса с помощью ПК.

Избыточная функция: Лишние движения рабочего органа.

Недостаточная функция: Растолкать слой за более чем 15 мин.

Иерархия функций

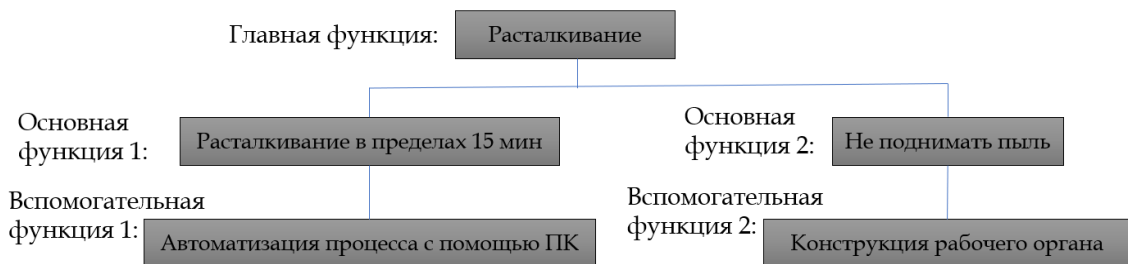


Рисунок 2.2 - Иерархия функций

2.2.2 Основные компоненты системы

1) *Контроллер управления (центральный блок):*

Выполняет основную логику принятия решений, обработку сигналов от датчиков, генерацию управляющих воздействий на исполнительные механизмы. В рамках проекта использован микроконтроллер Arduino Mega с интерфейсами UART, I2C, GPIO и ШИМ [5].

2) *Датчики обратной связи:*

- Индуктивные датчики для определения конечных положений;
- Токовые датчики для измерения потребления энергии робототехническим комплексом.

3) *Исполнительные механизмы:*

- Шаговые двигатели для позиционирования расталкивающего механизма;

- Шаговые двигатели для вращения толкающего узла;

4) *Программное обеспечение:*

Управляющая логика реализована в виде конечного автомата с элементами адаптивного регулирования. Предусмотрены режимы калибровки, ручного управления и автоматического цикла. Интерфейс оператора (HMI) был реализован в среде разработки Microsoft Visual Studio на языке C#. Программное обеспечение обеспечивает внешний визуальный контроль и базовую настройку параметров.

5) Связь с внешними системами:

- Поддержка протоколов обмена данными (например, Modbus RTU, CAN);
- Возможность удалённого мониторинга через последовательный порт.

2.2.3 Принцип действия системы

Вся система построена по принципу событийного управления: каждый новый шаг выполняется только после получения подтверждения успешного завершения предыдущего. Оператором задается команда на управление, шариково-винтовая передача приводится в действие с помощью шаговых двигателей, что приводит к движению рабочего органа в соответствии с полученной командой. Программным обеспечением записывается ряд команд, заданных оператором, исполнение которых приводит к расталкиванию сыпучего материала внутри контейнера. Далее, записанные команды могут быть использованы в автоматическом режиме, а также отредактированы по желанию оператора, что дает полную свободу действий над алгоритмом расталкивания.

2.3 Алгоритмы управления движением

Алгоритмы управления движением расталкивающего механизма являются ключевым компонентом системы и обеспечивают эффективное перераспределение сыпучих материалов в заданной зоне. Основные требования к алгоритмам включают: устойчивость к внешним возмущениям (например, непредсказуемому поведению материала), адаптивность, и минимизацию времени цикла.

2.3.1 Основные принципы реализованных алгоритмов

1) Разделение рабочего объёма на условные зоны

Сыпучий материал поступает в контейнер пятью примерно равными порциями. Веса порций могут различаться, значит нужен адаптивный алгоритм.

2) Расчет начального и конечного положений рабочего органа при расталкивании.

Очень важным параметром автоматизации процесса является определение начальных и конечных положений рабочего органа, так как это существенно сокращает время исполнения всего алгоритма, а также минимизирует количество лишних движений.

2.3.2 Режимы работы РТК «Расталкивателя»

1) Автоматический режим: полный автономный цикл по заданному алгоритму. В интерфейсе программного обеспечения оператором выбирается слой, затем алгоритмом начинается программа расталкивания на выбранной высоте.

2) Ручной режим: управление приводами через интерфейс для наладки и диагностики.

Программно реализован приоритет безопасности: каждый цикл начинается с проверки критических условий (обнуление координат, сигналы с концевых выключателей и т. д.).

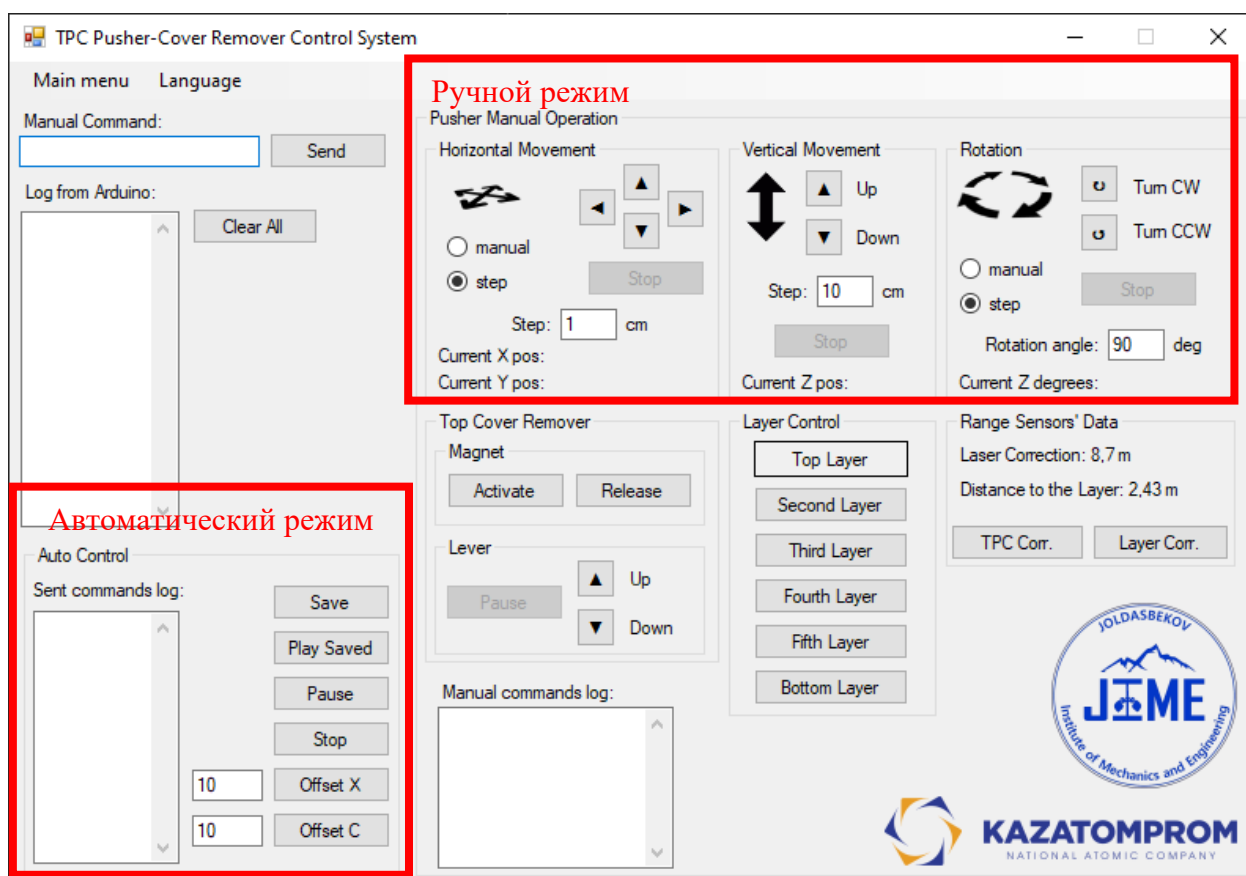


Рисунок 2.3 – Запуск программы в автоматическом режиме

3.1 Аппаратная часть прототипа РТК «Расталкивателя»

Для реализации прототипа робототехнического комплекса была разработана компактная и модульная аппаратная платформа, обеспечивающая возможность установки внутри ограниченного пространства, характерного для контейнеров и загрузочных камер. Аппаратная часть включает в себя несущую конструкцию, приводы, датчики, контроллер и блок питания.

3.1.1 Основные компоненты РТК «Расталкивателя»

1) Механическая конструкция:

Несущий каркас выполнен из металлического профиля с учётом габаритов контейнера. Подвижная каретка снабжена расталкивающим

элементом (рабочим органом), перемещающимся по направляющим в продольном направлении. Также предусмотрен вертикальный подъемный механизм.

2) Приводная система:

Для перемещения расталкивающего механизма используются шаговые двигатели NEMA 23 с редукторами и винтовым приводом. Двигатели управляются через драйверы DM556 и снабжены концевыми выключателями для калибровки и ограничения хода. Также рассмотрена возможность применения в будущем сервоприводов с обратной связью по энкодеру для улучшения точности.

3) Сенсорные элементы:

- Индуктивные концевые выключатели для определения крайних положений;
- Сенсор измерения силы тока ACS712 для определения перегрузок и сбоев в приводной системе.

4) Управляющий контроллер:

В качестве базового вычислительного узла применён микроконтроллер Arduino Mega для быстрой отладки. Контроллер управляет всеми приводами, считывает сигналы с датчиков и передаёт данные на интерфейс пользователя.

5) Питание и коммутация:

Питание привода осуществляется от источника постоянного тока 24 В, управление логикой — от стабилизированного 5 В через DC-DC преобразователь. Вся коммутация выполнена с учётом промышленного стандарта: клеммные блоки, разъёмы, предохранители, экранированные провода.

6) Монтаж и безопасность:

Все компоненты размещены в герметичном корпусе с вентиляцией, обеспечивающей защиту от пыли.

3.1.2 Описание модели РТК «Расталкивателя»

Робот выполнен по ортогональной схеме (Декартов робот) (рис. 1.9), имеющий три степени подвижности в трех взаимоперпендикулярных направлениях, два из которых обеспечивает движение в горизонтальной плоскости, а третья – в вертикальном направлении.

Иерархия



Рисунок 3.1 – Иерархия системы управления РТК «Расталкивателя»

Все степени подвижности конструктивно выполнены одинаково и состоят из основания, изготовленной из квадратных труб, на котором устанавливаются две направляющие.

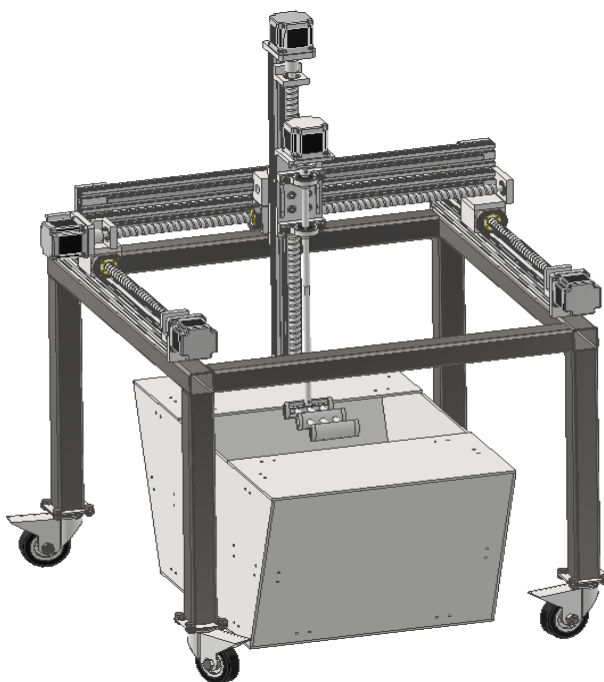


Рисунок 3.2 - 3D модель РТК «Расталкивателя»

На этих направляющих установлена подвижная каретка, приводимая в движение шарико-винтовой передачей. Вращение вала шарико-винтовой передачи осуществляется шаговым двигателем.

Робот размещен в металлическом каркасе, представляющий собой конструкцию портального типа и сваренный из квадратных труб (рис. 3.2). Двигатели двух кареток по оси X работают синхронно и обеспечивает

согласованное их движение. На продольных квадратных трубах установлены также направляющие с кареткой аналогичной конструкции. На этой каретке установлены также аналогичные направляющие с кареткой для обеспечения движения в вертикальном направлении. На каретке вертикального движения устанавливается рабочий орган, расталкиватель.



Рисунок 3.3 - РТК «Расталкиватель» в сборе (фото с выставки)

3.1.3 Шаговый двигатель NEMA23

Шаговый двигатель представляет собой синхронный электродвигатель без щёток, имеющий несколько обмоток на статоре. При подаче тока на одну из обмоток ротор фиксируется в определённом положении. Пошаговая активация обмоток приводит к поэтапному вращению ротора на заданный угол. В отличие от сервомоторов, такие двигатели обеспечивают точное позиционирование без необходимости в обратной связи с датчика угла поворота. Благодаря этой особенности шаговые двигатели широко

используются в числовом программном управлении (ЧПУ) и в различных автоматизированных системах. Управление ими осуществляется с помощью специализированных контроллеров — драйверов шаговых двигателей.



Рисунок 3.4 - Шаговый двигатель NEMA 23

Технические характеристики шагового двигателя NEMA 23:

- Угловой шаг: 1.8° (1 оборот - 200 шагов)
- Число фаз: 2
- Диапазон рабочих температур: -20°C / $+85^{\circ}\text{C}$
- Напряжение питания: 24 В
- Номинальный ток: 2,8 А
- Сопротивление фазы: 0,83 Ом
- Индуктивность: 2,2 мГн
- Крутящий момент: 10,1 кг x см
- Диаметр вала: 6,35 мм
- Длина вала: 21 ± 1 мм
- Габариты корпуса: $57 \times 57 \times 51$ мм
- Масса: 0,59 кг

3.1.4 Драйвер шагового двигателя DM 556

Управление шаговыми двигателями происходит при помощи драйверов.



Рисунок 3.5 - Драйвер шагового двигателя DM 556

DM556 — это универсальный полностью цифровой шаговый привод на базе DSP с усовершенствованным алгоритмом управления. Драйвер DM556 является новым поколением с цифровой системой управления шаговыми двигателями. Он обеспечивает уникальный уровень плавности работы системы, обеспечивает оптимальный крутящий момент и сводит к нулю нестабильность в среднем диапазоне. Технология самотестирования двигателя и автоматической настройки параметров обеспечивает оптимальную работу с различными двигателями и прост в использовании. Шаговые двигатели могут работать с гораздо меньшим уровнем шума, меньшим нагревом и более плавным движением. Его уникальные характеристики делают DM556 идеальным решением для применений, требующих плавности хода на низких оборотах.

Технические характеристики:

- Выходной ток RMS: 4,0 А
- Выходной пиковый ток: 5,6 А
- Напряжение: 20~45 VDC

- Частота импульсов управления: до 200 кГц
- Ширина импульсов управления: не менее 2,5 микросекунд
- Напряжение импульсов управления: 5~24 VDC
- Степень защиты: IP 20
- Изоляция: 500 МОм
- Формат входных импульсов: STEP/DIR или CW/CCW
- Количество силовых выходов: 4
- Вес: 280 г

Технические особенности включают в себя:

- Компенсацию резонанса
- Защиту от КЗ обмоток ШД, от обратной ЭДС ШД
- Режим удержания ротора ШД
- Самодиагностику и систему автоматического конфигурирования
- Автоматическое снижение тока при остановке
- TTL совместимость
- Оптическую гальваническую развязку входа
- 15 режимов деления шага в десятичной и двоичной системе, до 25600 шагов/оборот

Драйвер содержит 8 переключателей, которые задают режим работы драйвера, устанавливают силу тока и микрошаг.

3.1.5 Датчик индуктивный SN04-P

Концевые выключатели модели SN04-P необходимы для ограничения хода каретки, а также обозначения начала хода (точки отсчета координат).



Рисунок 3.6 - SN04-P – Индуктивный бесконтактный датчик типа PNP с нормально разомкнутым выходом

Модель SN04-P представляет собой индуктивный бесконтактный датчик класса В, предназначенный для установки на плоских поверхностях. Он относится к типу PNP с нормально разомкнутой (NO) конфигурацией выхода.

Чаще всего применяется в качестве концевого выключателя или датчика начальной позиции (Home) в системах линейного перемещения. Благодаря своей конструкции допускает параллельное подключение нескольких датчиков к одному входу контроллера.

Основные преимущества устройства:

- Не требует механического обслуживания и устойчив к износу;
- Работает без прямого физического контакта с объектом;
- Отсутствие контакта предотвращает механическое биение;
- Обладает высокой частотой отклика;
- Возможен монтаж в любом положении;
- Ресурс работы не зависит от количества срабатываний;
- Устойчив к вибрационным нагрузкам;
- Не накапливает загрязнения;
- Имеет защиту от влаги и воды.

Технические характеристики:

- Тип: Индуктивный датчик;
- Конфигурация: PNP, нормально разомкнутый (NO);
- Рабочее напряжение: от 12 до 24 В;
- Дальность обнаружения: до 5 мм;
- Частота отклика: до 500 Гц;
- Материалы-объекты: металл (сталь, алюминий, медь, бронза, латунь, свинец);
- Повторяемость срабатывания: $\pm 5\%$ от рабочей дистанции;
- Степень защиты: IP67;
- Габариты: 36×18×18 мм.

3.1.6 Микроконтроллер Arduino Mega 2560

Управление шаговыми двигателями выстроено на плате Arduino Mega.

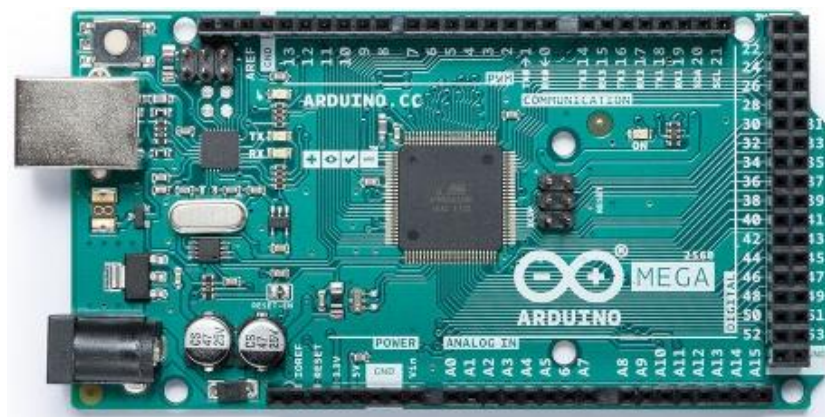


Рисунок 3.7 – Микроконтроллер Arduino Mega 2560

Плата Arduino Mega основана на микроконтроллере ATmega2560 и предоставляет 54 цифровых входа/выхода, из которых 14 способны работать с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В дополнение, устройство оснащено 16 аналоговыми входами и четырьмя последовательными UART-портами. В конструкции предусмотрены кварцевый резонатор с частотой 16 МГц, USB-разъем для подключения, разъем питания, интерфейс ICSP и кнопка сброса.

Технические параметры:

- Микроконтроллер: ATmega2560;
- Рабочее напряжение: 5 В;
- Рекомендуемый диапазон входного напряжения: 7–12 В;
- Максимально допустимое входное напряжение: 6–20 В;
- Количество цифровых входов/выходов: 54 (14 из них поддерживают ШИМ);
- Аналоговые входы: 16;
- Максимальный ток на один вход/выход: 40 мА;
- Максимальный ток на вывод 3,3 В: 50 мА;
- Объем флэш-памяти: 256 КБ (из них 8 КБ выделено под загрузчик);
- Объем оперативной памяти (ОЗУ): 8 КБ;
- Энергонезависимая память EEPROM: 4 КБ;
- Частота тактового генератора: 16 МГц.

3.1.7 Рабочий орган РТК «Расталкивателя»

Рабочий орган «Расталкивателя» состоит из конструкции из труб, приваренных к друг другу под углом 90° и лопатки. Вся конструкция вращается шаговым двигателем. Он надежен в работе и рассчитан на долгий срок эксплуатации при индустриальном применении. Такой двигатель позволяет обеспечивать точное позиционирование и регулировку скорости, работая без датчика обратной связи, если крутящий момент и скорость не выходят за установленные значения.

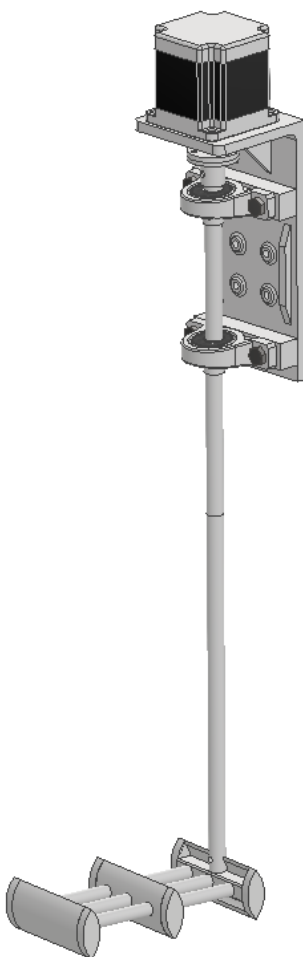


Рисунок 3.8 - 3D модель рабочего органа РТК «Расталкивателя»

3.1.8 Схема подключения шкафа управления РТК «Расталкивателя»

Электрическая схема подключения РТК «Расталкивателя» состоит из следующих компонентов:

1. Блок питания на 24В – 1 шт.
2. Плата управления Arduino Mega – 1шт.
3. Драйвер управления шаговым двигателем – 5 шт.
4. Шаговый двигатель – 5 шт.
5. Концевой выключатель (индукционный) – 6 шт.

После соединения всех компонентов в среде Arduino IDE была разработана программа управления шаговыми двигателями посредством отправления команд через COM порт ПК.

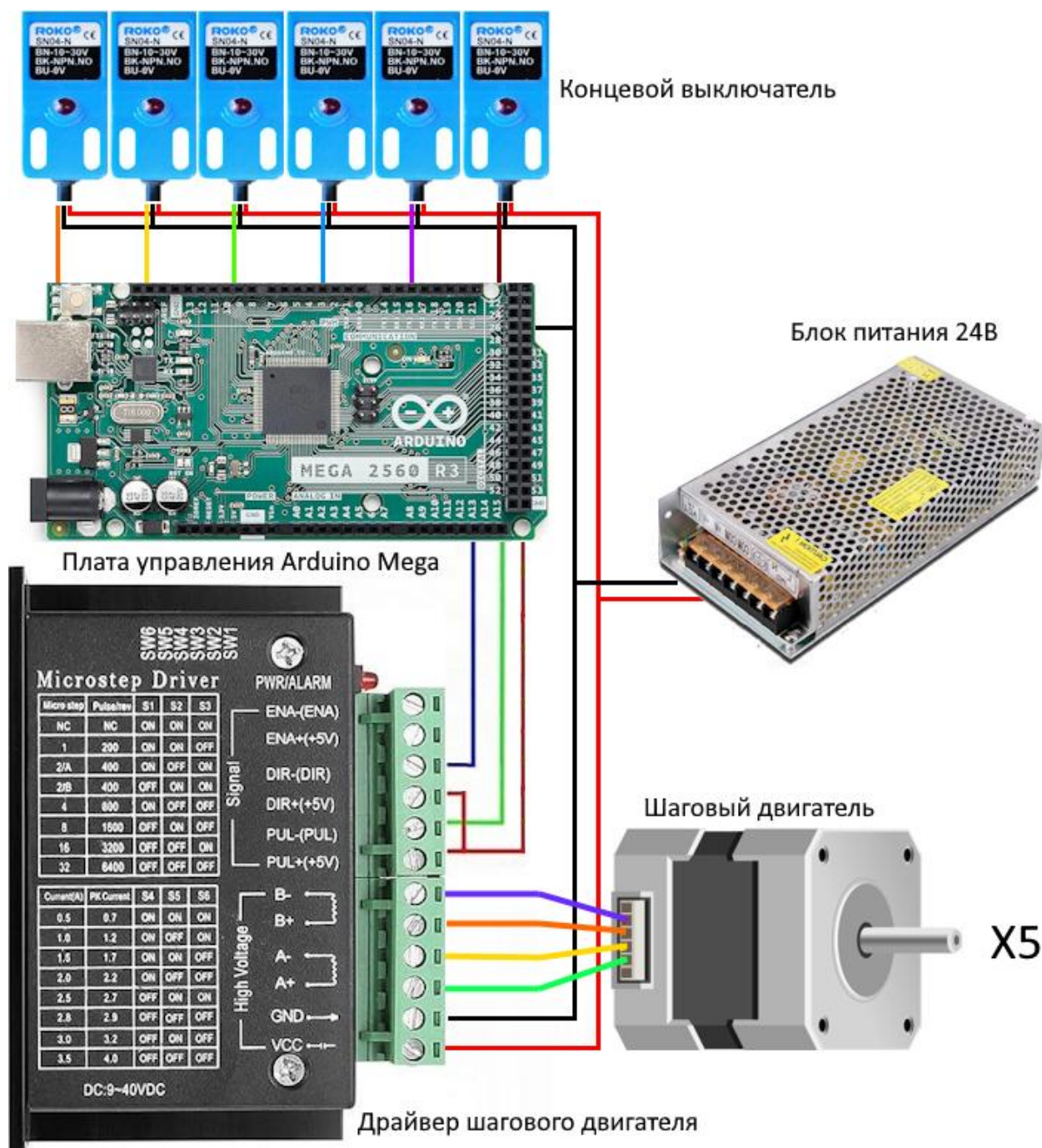


Рисунок 3.9 - Схема подключения шкафа управления РТК «Расталкивателя»

3.2 Алгоритм расталкивания РТК «Расталкивателя»

Алгоритм привязан к контейнеру, внутри которого происходит само действие расталкивания. Поэтому дальнейшее описание алгоритма будет вокруг вычислений, связанных с его геометрической формой и формой сыпучего поступающего материала.

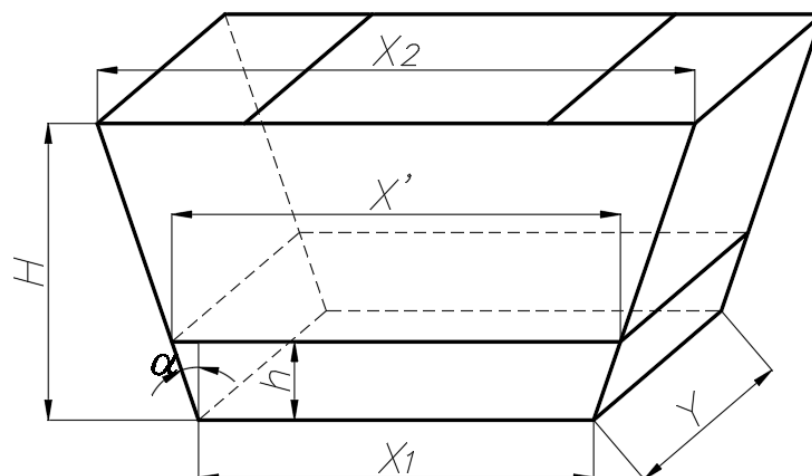


Рисунок 3.10 – Схема конуса и обозначения переменных

3.2.1 Расчет начальных и конечных точек координат

Сыпучий материал поступает в контейнер пятью порциями по ± 1.5 кг. Общая вместимость контейнера 8 кг. При погрузке в контейнер сыпучий материал образует конус, так как высыпается из воронки сверху. Плотность сыпучего материала известна:

$$\rho = \frac{m}{V} = 1596.96 \text{ кг/м}^3 \text{ (1).}$$

Значит, зная массу поступающего материала, можно вычислить высоту конуса по формуле расчета его объема, если знать угол откоса:

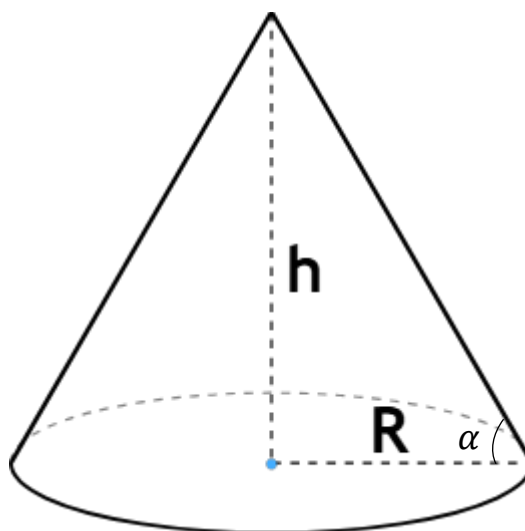


Рисунок 3.11 – Схема конуса и обозначения переменных

$$V_{\text{конус}} = \frac{1}{3} \pi r^2 h, \text{ (2)}$$

тогда, радиус основания R можно выразить через тангенс угла откоса α , и вычислить высоту конуса через объем поступившего материала:

$$h_{\text{конус}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{\text{конус}} \cdot \tan^2 \alpha}{\pi}}, (3)$$

где $\alpha = 34^\circ$ (угол естественного откоса). Высота конуса является начальной точкой движения РО. Высота окончания движений расталкивания будем определять

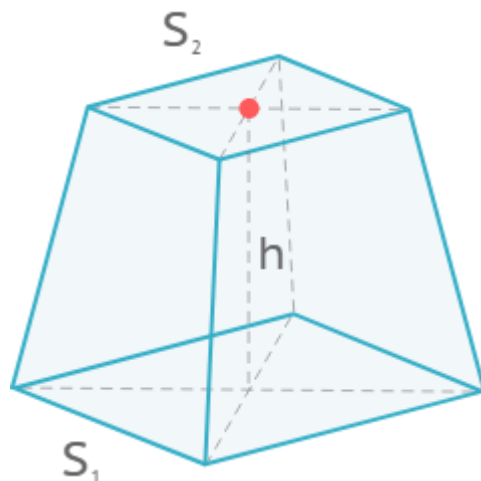


Рисунок 3.12 – Схема усеченной пирамиды

Теперь нужно высчитать высоту, на которой останавливаться, для этого воспользуемся формулой усеченной четырехугольной пирамиды:

$$V_{\text{пирамида}} = \frac{1}{3} h (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 S_2}) (4)$$

Численным методом подбираем нужную высоту.

3.2.2 Блок-схема к управляющему алгоритму микроконтроллера Arduino Mega

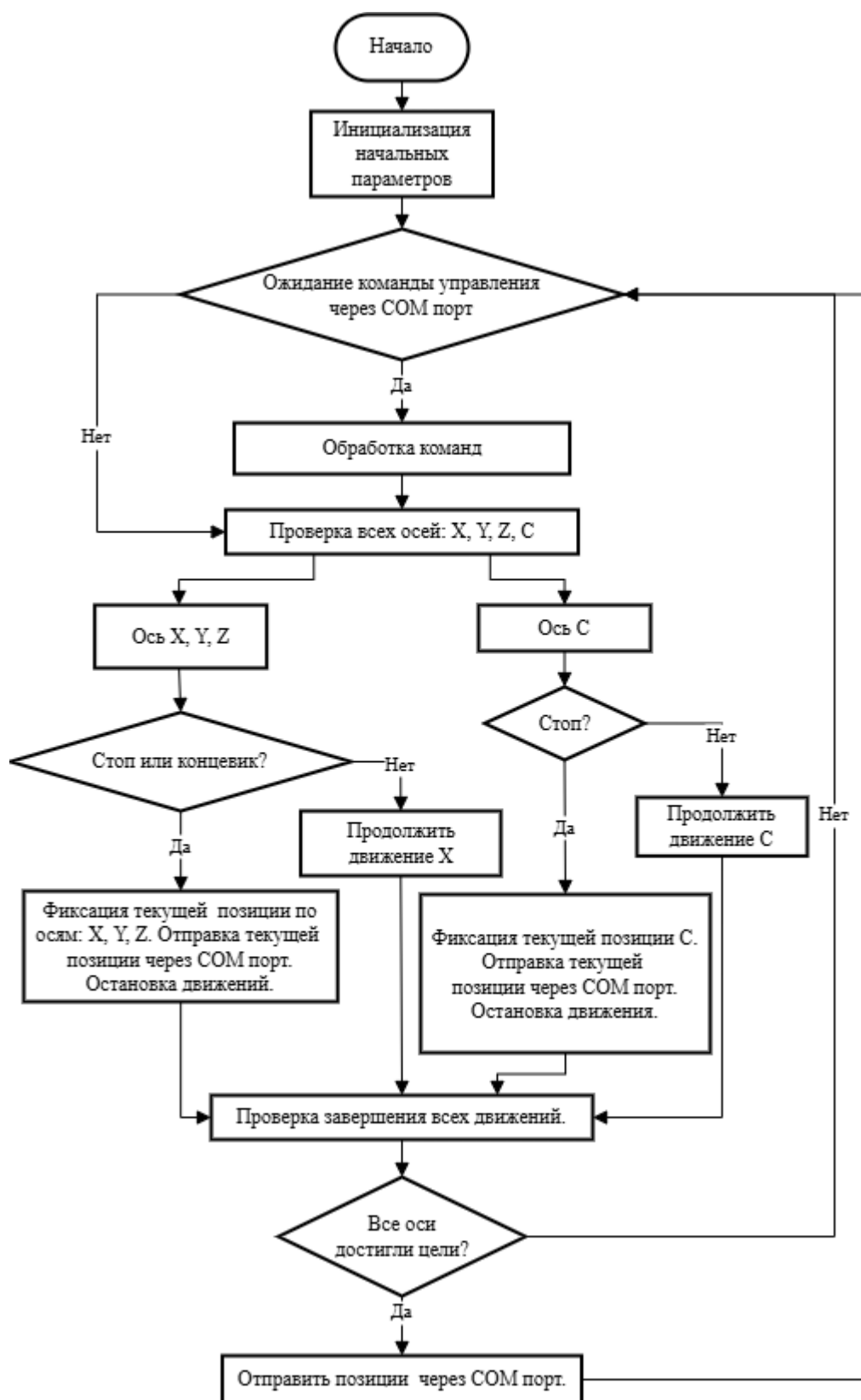


Рисунок 3.13 – Блок схема программы управления микроконтроллера Arduino Mega

3.2.3 Логика алгоритма расталкивания внутри контейнера

Конструкция контейнера ограничивает свободное движение РО внутри него, вследствие этого алгоритм расталкивания поделен на два действия:

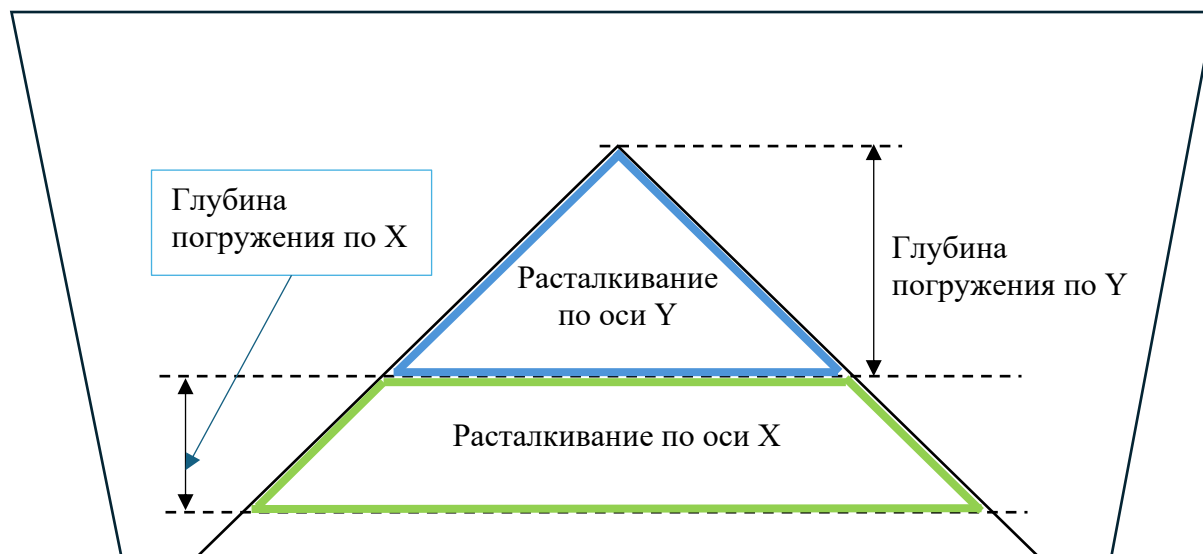


Рисунок 3.14 - Конус сброшенного сыпучего материала (вид контейнера сбоку)

1) Расталкивание вдоль оси Y:

Расталкивание по оси Y происходит быстрее чем по оси X. Основной целью является расталкивание верхушки горки сыпучего материала по бокам, для его дальнейшего равномерного распределения вдоль оси X внутри контейнера.

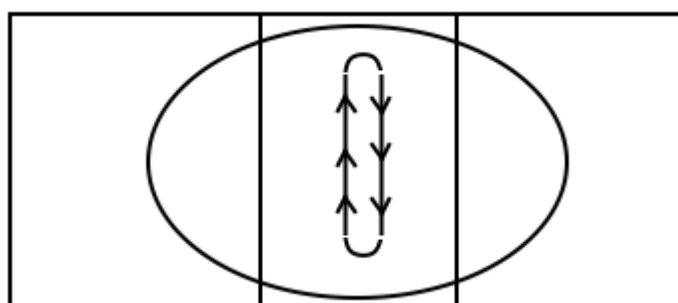


Рисунок 3.15 - Схема расталкивания по оси Y

2) Расталкивание вдоль оси X:

Основное время тратится на расталкивание по оси X, так как приходится делать много продольных движений по нескольку раз.

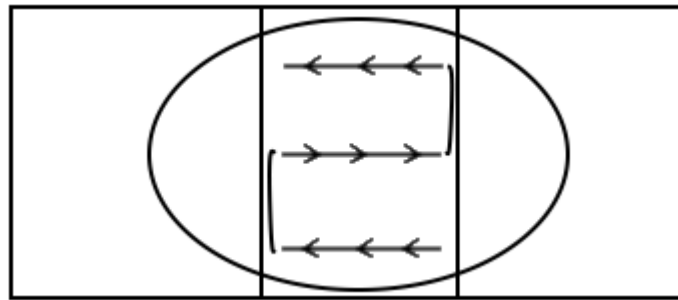


Рисунок 3.16 - Схема расталкивания по оси X

3.2.4 Программное обеспечение системы управления

Программное обеспечение (ПО), разработанное для управления робототехническим комплексом, обеспечивает взаимодействие между пользователем, сенсорами и исполнительными механизмами. Основное внимание было уделено устойчивости алгоритмов, их адаптивности, а также удобству настройки и мониторинга.

В результате исследования была разработана и собрана модель робототехнического комплекса «Расталкиватель». В среде разработки Microsoft Visual Studio было создано программное обеспечение для управления комплексом, а также алгоритм автоматического расталкивания. Эксперименты подтвердили работоспособность и эффективность модели.

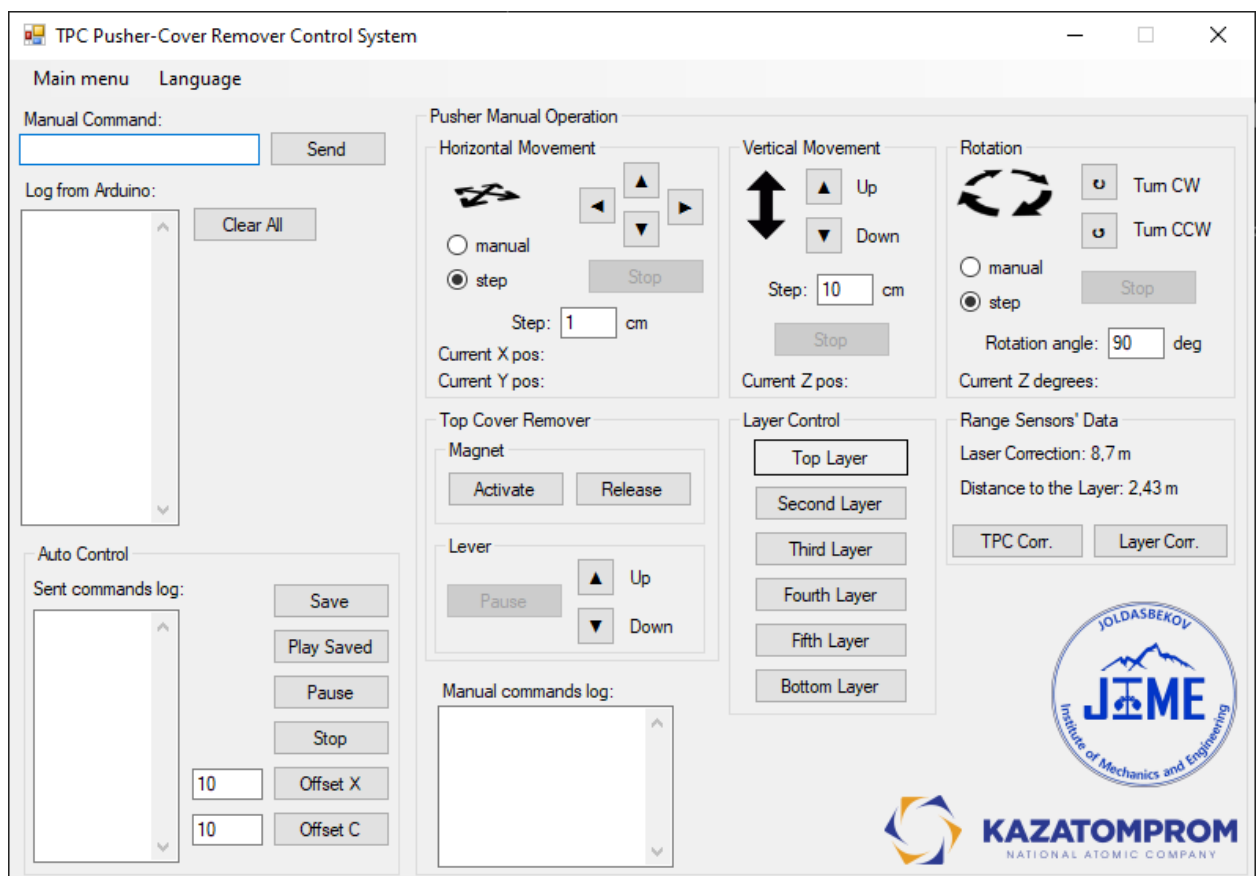


Рисунок 3.17 - Внешний вид программного обеспечения, созданного для управления РТК «Расталкиватель»

3.2.5 Структура программного обеспечения

Программа условно разделена на следующие модули:

1) Модуль инициализации

Производит первичную настройку портов ввода-вывода, калибровку положения механизма, инициализацию сенсоров и проверку готовности системы. В этом этапе также выполняется автоматический возврат в «нулевую» позицию с использованием концевых выключателей.

2) Логический модуль управления

Функционирование системы построено на принципе конечного автомата, где каждый этап цикла обработки соответствует конкретному состоянию:

- ожидание сигнала запуска;
- сбор информации с датчиков;
- обработка данных и выбор действия;
- формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы;
- отслеживание хода выполнения.

3) Система аварийного реагирования

В случае возникновения неполадок (например, перегрузка, потеря сигнала от концевика или превышение допустимого времени на выполнение задачи) автоматически инициируется остановка всех процессов. В расширенной конфигурации программного обеспечения осуществляется запись произошедших событий в журнал.

4) Человеко-машинный интерфейс (HMI)

Оператор имеет возможность управлять работой комплекса через визуальное окно, отображающее ключевые параметры в реальном времени, а также задавать предельные значения и режимы функционирования. Для отладки реализована система ручного ввода команд.

6) Канал связи с внешними системами

Связь осуществляется через стандартный USB-интерфейс, при этом обмен построен на базе упрощённого текстового протокола. По мере необходимости предусмотрена модернизация до промышленных интерфейсов, таких как Modbus или CAN-шина.

3.2.6 Особенности программной реализации

- Программный код структурирован таким образом, чтобы при необходимости можно было легко расширить функциональность (например, подключить дополнительные сенсоры или внедрить новые алгоритмы).
- Все настраиваемые параметры сохраняются в энергонезависимой памяти, такой как EEPROM или SD-накопитель, с возможностью изменения через пользовательский интерфейс.

- Вся логика работы адаптирована под микроконтроллер с ограниченными ресурсами, что позволило добиться устойчивости и быстродействия.

Таким образом, программная составляющая является ключевым элементом обеспечения надёжной, безопасной и адаптивной работы всей системы.

3.3 Примеры интерфейса и взаимодействие оператора с системой

Управление системой осуществляется посредством визуального интерфейса, разработанного для персонального компьютера. Он отображает текущее состояние узлов комплекса, предоставляет средства управления и настройки. В процессе отладки дополнительно используется текстовая консоль, обеспечивающая прямой ввод и получение откликов от контроллера.

3.3.1 Ключевые компоненты пользовательского интерфейса

1) Основное окно состояния системы

В этом разделе отображается вся ключевая информация о текущем состоянии комплекса, включая:

- активный режим работы (автоматический, ручной либо аварийный);
- координаты исполнительных механизмов и их статус (в движении, завершено, ошибка);
- данные о состоянии питания, связи и систем безопасности.

2) Панель управления в ручном режиме

Позволяет оператору вручную задавать команды на перемещение и управление приводами. Функции панели включают:

- перемещение расталкивающего узла в обе стороны;
- возврат всех механизмов в начальные координаты;
- включение или отключение приводных систем;
- отображение состояния концевых датчиков.

3) Окно конфигурации параметров слоёв

Позволяет оператору выбирать активный слой, в котором будет выполняться перераспределение материала.

4) Журнал событий и логирования

В данном разделе отображается:

- список выполненных действий;
- ошибки, возникшие в процессе работы;
- временные метки начала и завершения рабочих циклов;
- сохранённые лог-файлы, пригодные для последующего анализа.

3.3.2 Принципы взаимодействия пользователя с системой

Запуск комплекса может быть инициирован как через кнопку "Старт" в графическом интерфейсе, так и при поступлении сигнала от внешней системы. После запуска алгоритм переходит в автоматический режим, при

необходимости проводит калибровку и приступает к выполнению цикла перераспределения материала. По завершении работы система формирует отчёт, включающий показатели времени выполнения, расхода энергии и возможных отклонений.

Если в процессе выполнения обнаруживается неисправность, оператор получает соответствующее уведомление, после чего система автоматически переходит в безопасное состояние. При необходимости оператор может перевести комплекс в ручной режим для устранения неисправностей.

Гибкость интерфейса позволяет настраивать поведение комплекса под различные производственные сценарии без необходимости вмешательства в программный код низкого уровня, что упрощает адаптацию и расширяет функциональные возможности.

4.1 Методика испытаний

Для подтверждения надёжности и эффективности работы спроектированного комплекса была проведена серия тестов в условиях, приближённых к реальным эксплуатационным. Целью испытаний являлась комплексная оценка следующих характеристик:

- корректность функционирования системы управления;
- устойчивость алгоритмов перераспределения материала;
- способность оборудования сохранять работоспособность при внешних воздействиях;
- скорость выполнения операций расталкивания.

4.1.1 Условия проведения испытаний

Испытания разрабатываемого комплекса проводились в полупромышленных условиях на действующем руднике. В качестве площадки использовался контейнер, предназначенный для временного хранения и транспортировки сыпучих веществ [8, 9]. Контейнер был доработан для установки прототипа: установлены фиксирующие элементы и точки подключения. В качестве имитатора реального материала применялся песок для художественных работ, обладающий аналогичными характеристиками по фракции и углу естественного откоса.

4.1.2 Основные этапы проверки работоспособности

1) Начальная калибровка системы

- Проверка функциональности концевых датчиков;
- Настройка измерительных приборов по эталонным расстояниям;
- Установка начальных координат и проверка точности перемещений по осям.

2) Испытание алгоритма перераспределения

- Подача материала в контейнер сверху;
- Запуск автоматического режима с последующим выполнением полного цикла;

- Наблюдение за действиями исполнительных механизмов в соответствии с заданной логикой;
- Оценка итогового распределения с использованием визуального осмотра и лазерной диагностики.

3) Работа в разных режимах управления

- Автоматический режим — функционирование без участия оператора;
- Полуавтоматический режим — подтверждение ключевых этапов вручную;
- Полный ручной контроль — с использованием интерфейса управления для тестирования и диагностики.

4) Анализ надёжности и реакций на неисправности

- Имитирование возникновения препятствий в зоне действия механизма;
- Проверка реакции системы на перегрузку исполнительных узлов;
- Тест аварийной остановки и корректной обработки ошибок.

5) Проверка устойчивости при длительной работе

- Повторение циклов перераспределения без остановки в течение 2–3 часов;
- Контроль за нагревом исполнительных механизмов, уровнем питающего напряжения и потребляемым током.

4.1.3 Применяемое оборудование и средства измерения

- Лазерные дальномеры (ручного и автоматического типа) для анализа уровня распределения;
- Весовое оборудование для оценки переработанного объёма материала;
- Осциллограф и мультиметр — для мониторинга и диагностики электрических сигналов;
- Видеосистемы наблюдения — для документирования процесса и последующего анализа.

4.2 Результаты и сравнение с ожидаемыми значениями

По результатам проведённых испытаний робототехнический комплекс продемонстрировал высокую степень соответствия заданным техническим требованиям. Система управления функционировала стабильно как в ручном, так и в автоматическом режимах, а распределение сыпучих материалов происходило равномерно в пределах установленной допустимой погрешности.

4.2.1 Основные полученные результаты

1) Точность распределения материала:

Расхождение между уровнями материала по секторам контейнера составило не более $\pm 8\%$, что соответствует требованиям к равномерному

распределению. После адаптации алгоритма под конкретный тип материала (руда средней фракции) разброс удалось снизить до $\pm 5\%$.

2) Время выполнения цикла:

Один цикл расталкивания (от старта до завершения) занял в среднем 3.5 минуты. При этом время между циклами (на подготовку и стабилизацию) не превышало 30 секунд.

3) Надёжность и устойчивость:

Система успешно выдержала 50 последовательных автоматических циклов без критических сбоев. Зафиксировано лишь одно нештатное срабатывание аварийной остановки при намеренном создании перегрузки — система корректно вернулась в безопасное состояние.

4) Потребление энергии:

Среднее энергопотребление за один цикл составило 22–25 Вт·ч, что является допустимым значением для автономных и встраиваемых решений.

4.2.2 Сравнение с ожидаемыми результатами

Проведенные эксперименты с РТК «Расталкивателем» показали следующие результаты.

Таблица 1 - Полученные результаты при настройках скорости равной 0,375 м/сек

Параметр	Ожидаемое значение	Полученное значение	Отклонение
Точность распределения	$\leq \pm 10\%$	$\pm 7\%$	соответствует
Время одного цикла	≤ 15 мин	~8 мин 21 сек	соответствует
Количество успешных циклов подряд	≥ 10	10	соответствует
Энергопотребление на цикл	≤ 30 Вт·ч	4,54 Вт·ч	соответствует

Полученные результаты показали соответствие по всем параметрам при настройках скорости равной 0,375 м/сек.

Таблица 2 - Полученные результаты при настройках линейной скорости равной 0,25 м/сек

Параметр	Ожидаемое значение	Полученное значение	Отклонение
Точность распределения	$\leq \pm 10\%$	$\pm 7\%$	соответствует
Время одного цикла	≤ 15 мин	~8 мин 53 сек	соответствует
Количество успешных циклов подряд	≥ 10	10	соответствует
Энергопотребление на цикл	≤ 30 Вт·ч	5,01 Вт·ч	соответствует

Полученные результаты показали соответствие по всем параметрам при настройках скорости равной 0,25 м/сек.

Таблица 3 - Полученные результаты при настройках линейной скорости равной 0,175 м/сек

Параметр	Ожидаемое значение	Полученное значение	Отклонение
Точность распределения	$\leq \pm 10 \%$	$\pm 7 \%$	соответствует
Время одного цикла	≤ 15 мин	~10.07 мин	соответствует
Количество успешных циклов подряд	≥ 10	10	соответствует
Энергопотребление на цикл	≤ 30 Вт·ч	5,31 Вт·ч	соответствует

Полученные результаты показали соответствие по всем параметрам при настройках скорости равной 0,175 м/сек.

Таким образом, опытно-промышленный образец подтвердил практическую реализуемость предложенной системы управления. Результаты испытаний показали надёжность, точность и гибкость комплекса в различных условиях эксплуатации. Время расталкивания было в пределах допустимого - менее 15 мин, для всех случаев.

4.3 Выводы по результатам испытаний

По результатам проведённых испытаний робототехнический комплекс продемонстрировал высокую степень соответствия заданным техническим требованиям. Система управления функционировала стабильно как в ручном, так и в автоматическом режимах, а распределение сыпучих материалов происходило равномерно в пределах установленной допустимой погрешности.

Для наглядности, ниже приведены значения среднего энергопотребления при каждой скорости вращения:

- При 700 об/мин: 5.31 Вт·ч;
- При 1000 об/мин: 5.01 Вт·ч;
- При 1500 об/мин: 4.54 Вт·ч.

Проведённые испытания показали, что увеличение скорости вращения шаговых двигателей оказывает положительное влияние на общую производительность системы. При этом наблюдалось заметное сокращение времени выполнения операций и снижение потребления электроэнергии. Среднее значение тока в процессе работы удерживалось в пределах 1.3–1.4 ампер, что свидетельствует о стабильной нагрузке и корректной работе всей системы.

На представленных ниже графиках можно проследить зависимость энергопотребления от частоты вращения приводного механизма:

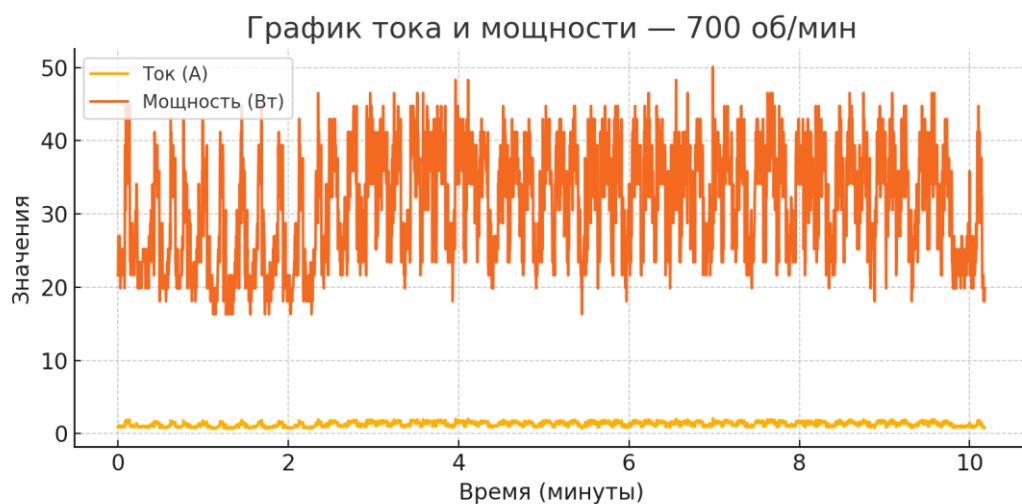


Рисунок 4.1 - График: 700 об/мин

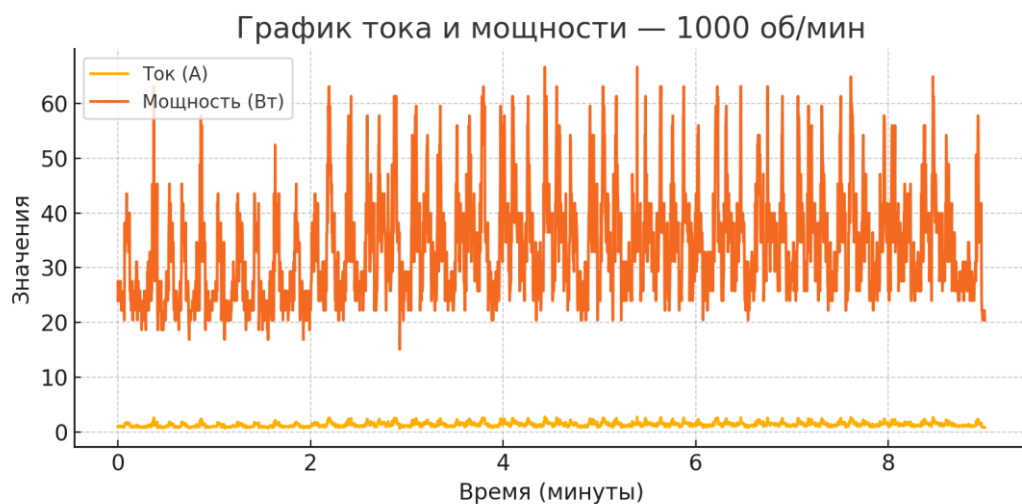


Рисунок 4.2 - График: 1000 об/мин

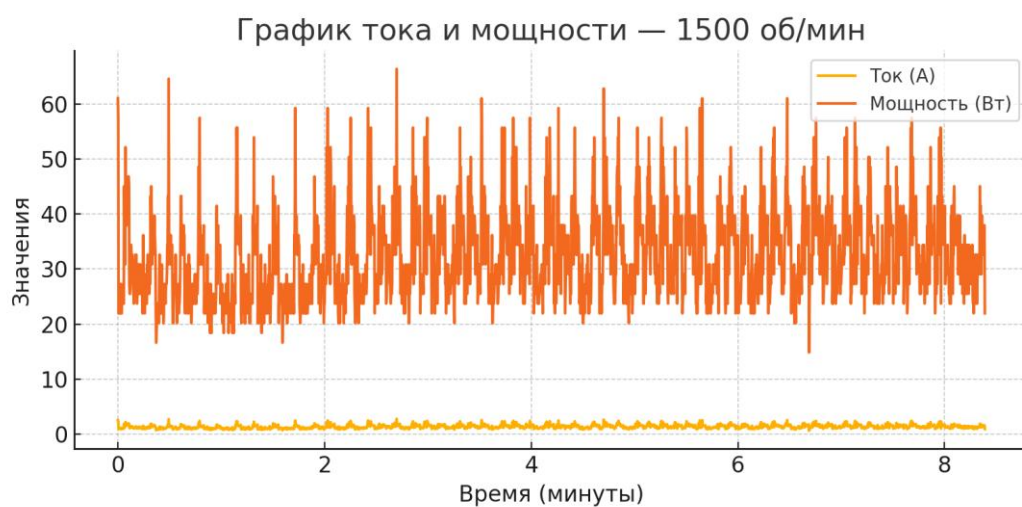


Рисунок 4.3 - График: 1500 об/мин

Дополнительно на рис. 4.4 отражена зависимость крутящего момента от скорости вращения двигателя серии NEMA23. Из графика становится ясно, что при снижении скорости двигатель способен развивать больший момент, что может быть критически важным при работе с более плотными или влажными материалами. Однако даже при максимальных оборотах продолжительность полного цикла перераспределения не превышала 15 минут, что подтверждает наличие достаточного запаса по усилию в приводе.

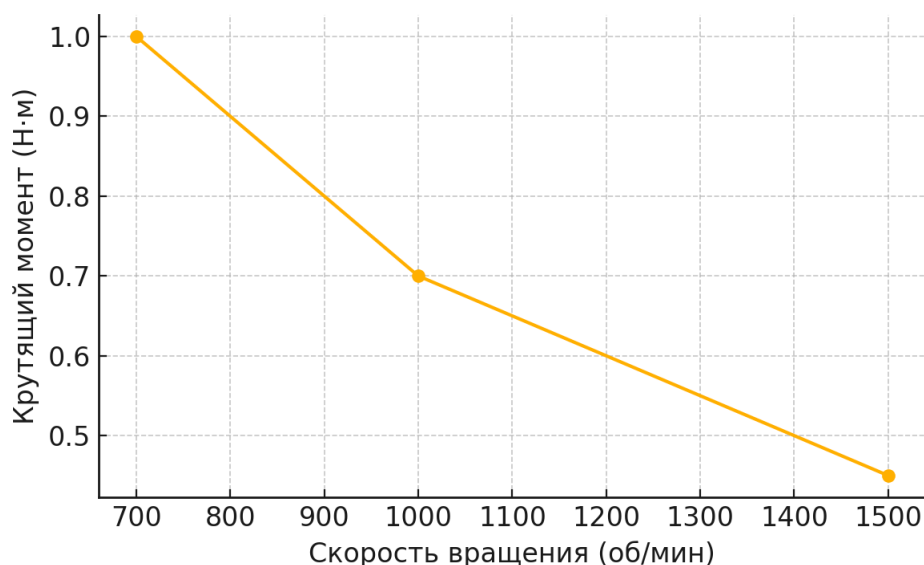


Рисунок 4.4 - График зависимости крутящего момента от скорости вращения

Испытания доказали, что разработанный комплекс с адаптивной логикой управления надёжно справляется с перераспределением сыпучего материала в условиях ограниченного пространства и нестабильной загрузки. Увеличение скорости вращения позволяет существенно повысить производительность без увеличения энергозатрат, а сниженный крутящий момент на высоких оборотах не становится критическим, если масса сдвигаемого материала остаётся в допустимых пределах.

В результате можно утверждать, что наилучшие рабочие параметры достигаются при выборе максимально допустимой скорости при сохранении механической проходимости. Такой режим обеспечивает эффективную работу комплекса при минимальных энергетических потерях.

Созданная система управления может быть использована в промышленных условиях и, благодаря модульной архитектуре, служить платформой для дальнейших технических улучшений в области автоматизации переработки сыпучих материалов.

4.3.1 Основные выводы по результатам испытаний

- 1) Все части системы работали стабильно и без сбоев в соответствии с заданными алгоритмами.
- 2) Материал распределялся равномерно, что важно для последующих технологических процессов.

- 3) Программное обеспечение смогло адаптироваться к разным видам сыпучих материалов и сохранять надёжность.
- 4) Модульная конструкция системы облегчает её настройку и обслуживание.
- 5) Испытания на руднике показали, что комплекс работает надёжно даже в сложных условиях с пылью и шумом.

Таким образом, разработанная система готова к промышленному использованию и дальнейшему развитию. Её архитектура может стать основой для создания других роботов, работающих с сыпучими материалами.

Модель «Расталкиватель» — это уменьшенный вариант более крупного робота, который равномерно распределяет сыпучие материалы внутри контейнера. Основная задача — выравнивание слоя материала за минимальное время без поднятия пыли. Это особенно важно, потому что материал поступает порциями и может быть разного состава. После заполнения контейнера, другим РТК будут брать пробы на определение состава материала, загруженного в него.

5 Будущие планы по улучшению прототипа

При внедрении в производство потребуются дополнительные решения по улучшению данного прототипа, они связаны со следующими задачами:

- 1) Сыпучий материал в реальных условиях поступает не только в центр контейнера, а может быть смещен. В таком случае потребуются корректировка алгоритма, для более равномерного распределения сыпучего материала внутри контейнера. Один из способов решения — это установка дополнительного датчика глубины сверху, для точного определения верхушки конуса. Тогда оператору не придется визуально определять, где рассыпался сыпучий материал при разгрузке, программа будет делать это сама в автоматическом режиме.
- 2) Расположение контейнера под РТК «Расталкивателем» бывает смещенным, нужно делать корректировку. Тут можно обойтись датчиками дальности (лазерные) по X и Y, меняя начальную точку старта алгоритма.
- 3) Также планируется внедрить динамическое послойное погружение, чтобы снизить нагрузку на рабочий орган и сделать процесс расталкивания более плавным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог проделанной работе, хочу отметить, что тема, взятая в основу этой магистерской диссертации, оказалась не просто технической задачей, а достаточно серьёзным вызовом. Первоначально казалось, что распределение сыпучих материалов — процесс сугубо механический, но на практике выяснилось, что за ним стоит целый ряд факторов, которые нужно учитывать и просчитывать.

В процессе исследования мне пришлось изучить и проанализировать множество существующих решений. Большинство из них, как выяснилось, не обладают нужной гибкостью: они не способны адаптироваться под изменяющиеся условия. Это стало важным стимулом для разработки собственной системы — той, которая сможет работать устойчиво не только в теории, но и в реальной среде, включая пыль, вибрации, нестабильную подачу материала и т.д.

Работа шла поэтапно: сначала были сформированы базовые требования, далее я приступил к разработке архитектуры. С самого начала ориентировался на модульный принцип — как показала практика, он действительно упрощает как сборку, так и возможное обслуживание. Особое внимание уделял программной части: именно алгоритмы адаптации и обработка данных от датчиков стали ключевыми для успешного функционирования комплекса.

Испытания — сначала стендовые, а потом и в полевых условиях — помогли выявить тонкие места в логике управления. Их удалось устранить, и как результат — стабильная работа системы в непростых условиях настоящего производства. Это, пожалуй, один из главных результатов: не просто создать теоретически рабочую систему, а довести её до такого уровня, при котором она реально может применяться на практике.

Одной из задач было не просто «заставить» механизм двигаться, а обеспечить такую работу, при которой материал внутри контейнера равномерно распределяется без образования пустот. И с этим задача справилась: датчики, обратная связь, программная логика — всё это работает в связке и позволяет достигать нужного результата.

Если говорить о перспективах, то они, безусловно, есть. В будущем можно рассматривать расширение функциональности, внедрение прогнозных алгоритмов, повышение энергоэффективности.

Таким образом, считаю, что цели, поставленные в начале, были достигнуты. Задачи — решены. Результаты — подтверждены не только на словах, но и на практике. Работа оказалась сложной, но полезной — и для меня, и, надеюсь, для тех, кто будет её использовать или развивать в дальнейшем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арунов, В. И. Робототехнические системы: теория и практика / В. И. Арунов. – М.: Машиностроение, 2018. – 352 с.
2. Кулагин, В. П. Автоматизация производственных процессов: учебник / В. П. Кулагин. – СПб.: Питер, 2020. – 416 с.
3. Попов, А. В. Сыпучие материалы: свойства и переработка / А. В. Попов. – Екатеринбург: УрФУ, 2019. – 289 с.
4. ISO 8373:2021. Robots and robotic devices – Vocabulary. – International Organization for Standardization, 2021.
5. Гусев, Е. В. Системы управления электроприводами / Е. В. Гусев. – М.: Энергоатомиздат, 2021. – 304 с.
6. Цыганов, С. П. Сенсорика в робототехнике / С. П. Цыганов. – М.: Лань, 2022. – 372 с.
7. Sclater, N. Industrial Automation and Robotics: An Introduction / N. Sclater. – New York: McGraw-Hill, 2017. – 448 p.
8. Siciliano, B., Khatib, O. Springer Handbook of Robotics. – 2nd ed. – Berlin: Springer, 2016. – 1240 p.
9. KUKA Robotics. Robotic Solutions for Bulk Material Handling. – Technical White Paper, 2020.
10. Beckhoff Automation. TwinCAT 3: Motion Control for Mechatronic Systems. – Tech Manual, 2021.
11. Ефремов Д. А. «Системы управления роботами и робототехническими комплексами». ВГТУ, 1997.
12. Дубенец А. Л., Стародуб Г. А. «Системы управления в тяжёлой промышленности», 1982.
13. Виноградов Г. П., Шепелев Г. А. «Паттерны в СУ АРТК», 2020.
14. Cherubini A., Navarro-Alarcon D. "Sensor-Based Control for Collaborative Robots", 2020.
15. Ahmad A., Babar M. A. "Software Architectures for Robotics Systems", 2017.
16. Tsardoulis E., Mitkas P. "Robotic frameworks comparison", 2017.
17. Macenski S. et al. "Robot Operating System 2: Design and Uses", 2022.
18. Коровин Б. Г., Косарев А. И. «Системы программного управления РТК». ЛЭТИ, 1988.
19. Безбородова О. Е. «Бионические системы управления», ПГУ, 2021.
20. Турлай А. П. «Сенсорные сети в мобильной робототехнике», БГУИР, 2020.
21. Maciejewski A. et al. "Model Predictive Control in Robotics", 2019.

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 Робототехники и технических средств автоматики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Қалиев Мәди Жанботаұлы
ОТЗЫВ

На тему: «Проектирование системы управления робототехнического комплекса для
расталкивания сыпучих материалов»

Магистерская диссертация посвящена актуальной задаче разработки системы управления робототехническим комплексом, предназначенным для перераспределения сыпучих материалов в контейнере. В работе проведён тщательный анализ существующих решений, рассмотрены различные типы промышленных роботов, обоснован выбор декартовой архитектуры комплекса. Автором разработана аппаратная и программная часть системы управления, реализован адаптивный алгоритм распределения материала с учетом геометрии загрузки. Управление осуществлялось на базе платформы Arduino Mega 2560 с применением шаговых двигателей и индуктивных датчиков. Визуализация и интерфейс управления для оператора был создан на языке C#. Работа сопровождается схемами, 3D-моделями, блок-схемами и иллюстрациями, подтверждающими глубокую проработку темы.

Диссертация выполнена магистрантом на хорошем уровне и демонстрирует его навыки практического проектирования, владение современными технологиями автоматизации и элементами интеллектуального управления. Все поставленные задачи решены в полном объёме, а полученные результаты были апробированы на стендовом прототипе. Материал изложен последовательно и логично. Работа соответствует всем требованиям.

Коэффициент вероятности ИИ показал превышение на 15% от порогового отражающую среднюю вероятность использования. что связано с общими научными терминами речевого оборота, сокращенные аббревиатуры и т. д. Это не связано с заимствованием других источников литературы считаю допустимым такой слово оборот в диссертационной работе. Допускаю к защите разработку и испытанию робототехнический комплекс, материал написан самостоятельно.

Научный руководитель:

к.т.н. ассоциированный профессор

Тулешов Е.А.

«___» _____ 2025 г.

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И. САТПАЕВА»

Студент образовательной программы 7М07107 – «Робототехника и мехатроника»

Магистерская диссертация

Қалиев Мәди Жанботаұлы

РЕЦЕНЗИЯ

на тему: **«Проектирование системы управления робототехнического
комплекса для расталкивания сыпучих материалов»**

Магистерская диссертация посвящена проектированию системы управления робототехнического комплекса для расталкивания сыпучих материалов. В работе рассматриваются алгоритмы управления движением, структура системы на основе сенсоров и исполнительных механизмов.

Особенностью проекта является разработка собственной логики управления, обеспечивающей адаптацию к разным видам материалов и условиям загрузки. Важным достижением стало то, что полученные результаты легли в основу опытно-промышленного образца, успешно прошедшего проверку в реальной производственной среде.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной системы в промышленности для повышения эффективности переработки и хранения сыпучих материалов, а также в потенциальной интеграции в состав более сложных автоматизированных производственных комплексов.

Считаю, что работа магистранта на тему «Проектирование системы управления робототехнического комплекса для расталкивания сыпучих материалов» выполнен на хорошем уровне, полностью соответствует заявленным целям и задачам, обладает научной новизной и практической ценностью. Автор заслуживает присвоения академическую степень магистра.

Рецензент:

КазНУ имени аль-Фараби,

и.о. доцента кафедры искусственного интеллекта
и Big Data, PhD

«__» _____ 2025 г.



Карымкасова Н.Т