

На правах рукописи



Алексеев Александр Александрович

**СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ И ИСПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ МОБИЛЬНЫМ
КОЛЁСНЫМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОПОРНЫХ ТРАЕКТОРИЙ И
КРИВЫХ БЕЗЪЕ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА В УСЛОВИЯХ СКЛАДА
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы
(технические науки)

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2019 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет (Московский Политех)»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и управление» ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет (Московский Политех)»
Палагута Константин Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Ющенко Аркадий Семенович

кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и комплексной автоматизации ФГБОУ ВО «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева»
Карпенков Андрей Сергеевич

Ведущая организация: ФГУП «Научно-производственный центр автоматизации и приборостроения имени академика Н.А.Пилюгина»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2020 г. в ___ часов ___ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.142.04 при ФГБОУ ВО Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127994, Москва, Вадковский переулок, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», www.stankin.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.142.04, к.э.н.

Ромаш Елена Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний день целый ряд роботов и робототехнических устройств, предназначенных для решения задач автоматизации процессов транспортировки, учёта и хранения грузов, находит успешное применение в условиях логистических центров, а также складских комплексов крупных машиностроительных предприятий. Тем не менее, по сей день существует широкий круг задач, в рамках которых перемещение объектов хранения осуществляется в «ручном режиме». Это утверждение справедливо, во-первых, по отношению к участку первоначальной приёмки грузов, где осуществляется разгрузка объектов, прибывших на хранение, во-вторых, к участку транспортировки груза от места первоначальной приёмки до пункта учёта и сортировки, где перемещение грузов осуществляется посредством различного рода транспортёров под управлением человека-оператора. Следует заметить, что вопрос автоматизации участка первоначальной приёмки не имеет чисто технического решения, так как требует наличия согласованных стандартов хранения и размещения перемещаемых объектов при транспортировке между складским предприятием и поставщиком продукции, которые на сегодняшний день отсутствуют. Однако задача исключения человека-оператора из процесса транспортировки объектов хранения по территории логистических центров является актуальной, потому как автоматизация данного участка складского комплекса:

- позволит увеличить скорость обработки грузов, что, в свою очередь, приведёт к увеличению пропускной способности логистического центра;
- обеспечит максимально эффективное использование всех имеющихся в наличии транспортёров, исключая их простой или перемещения без грузов;
- позволит исключить ошибки на этапе конечного хранения, обусловленные человеческим фактором.

Следует заметить, что сегодня существует множество технических средств, успешно решающих задачи внутрицеховых перевозок. Однако, в силу особенностей условий, в которых осуществляется транспортировка объектов хранения по территории логистических центров, робототехнические устройства, получившие широкое распространение при проектировании производственных линий машиностроительных предприятий, в данном случае неприменимы, что обусловлено подходом к организации системы управления траекторией движения внутрицеховых автоматических самоходных тележек. Таким образом, основной задачей, которая должна быть решена в рамках реализации роботизированной линии по транспортировке объектов хранения на заявленном участке складского комплекса, является задача планирования выполнения задания мобильными роботами на территории логистического центра, учитывающая особенности рабочего пространства, в котором функционирует транспортёр.

Степень разработанности темы. На текущий момент над решением задач, направленных на создание системы автоматической транспортировки объектов хранения по территории складского комплекса, работает целый ряд ведущих промышленных предприятий и университетов западной Европы. В рабочую группу проекта ПЭН-Роботс (PAN-Robots – Plug& Navigate robots for smart factories) входят: Aikio M., Beinschob, P., Boehning M., Cotena G., Digani V., Estefania J.A, Fantuzzi C., Fuerstenberg K., Golban C., Krengel A., Magnani M., Marita T., Mäkinen J.T., Nagy A.E., Nedeveschi S., Ramos B., Reinke C., Reinke C., Ronzoni D.,

Sabattini L., Secchi C., Stimming C., Szakats I., Yang B., опубликовавшие по данной тематике более 60 печатных работ (с полным списком публикаций можно ознакомиться по адресу: <http://www.pan-robots.eu/deliverables/publications/> [дата доступа: 24.11.2017]). Однако значительная часть деталей реализации проекта не разглашается.

В частности, недостаточно освещён вопрос планирования маршрутов выполнения задания автономными транспортными модулями – АТМ, в то время как в контексте задачи создания робототехнического комплекса для автоматизации транспортировки объектов хранения по территории склада машиностроительного предприятия вопрос разработки алгоритмов планирования маршрутов АТМ является одним из ключевых и требует детальной проработки.

Объектом исследования является автономный транспортный модуль робототехнической системы транспортировки объектов складирования по территории складского комплекса.

Предметом исследования являются алгоритмы определения маршрута задания для мобильных платформ, трансмиссия которых имеет четырёхколёсную компоновку автомобильного типа.

Цель работы. Целью диссертационной работы является минимизация затрат времени на перемещение объектов складирования по территории логистического центра посредством разработки группы алгоритмов автоматического управления траекторий движения роботов-транспортёров.

Задачи диссертации:

1. Провести анализ существующих подходов к реализации систем формирования и исполнения задания колёсными мобильными роботами.
2. Разработать алгоритм формирования маршрутов колёсного мобильного робота, учитывающий особенности конструкции мобильной платформы и рабочего пространства, в котором функционирует робот-транспортёр.
3. Разработать алгоритм выбора маршрута выполнения задания из множества альтернативных вариантов.
4. Разработать алгоритм и программное обеспечение, обеспечивающее расчёт управляющих воздействий, необходимых для исполнения задания мобильным роботом.
5. Произвести контрольные испытания и апробацию разработанных алгоритмов формирования маршрута и исполнения задания мобильным роботом посредством вычислительных и полунатурных экспериментов.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач в работе использована теория кривых Безье, эволюционные методы оптимизации, генетические алгоритмы. Экспериментальное исследование выполнялось посредством вычислительных и полунатурных экспериментов. Моделирование процессов транспортировки грузов по территории логистического центра осуществлялось с применением программного пакета интеллектуального имитационного моделирования RDO-STUDIO.

Научная новизна:

1. Установлена связь между траекторией движения мобильного робота и кривыми Безье третьего порядка, основанная на особенностях конструкции мобильных платформ, имеющих четырёхколёсную компоновку автомобильного типа.

2. Разработан алгоритм планирования задания мобильного робота, особенностью которого является использование кривых Безье третьего порядка для определения маршрутов задания.

3. Разработан алгоритм выбора маршрута выполнения задания мобильным роботом из множества альтернативных маршрутов, заданных кривыми Безье третьего порядка, особенностью которого является применение эволюционных методов поиска.

4. Разработан алгоритм определения пролётных точек маршрута, заданного кривой Безье третьего порядка для мобильных платформ, трансмиссия которых имеет четырёхколёсную компоновку автомобильного типа.

5. Разработан алгоритм автоматического расчёта набора управляющих воздействий, необходимых для отработки маршрута, заданного кривой Безье третьего порядка, для мобильных платформ, трансмиссия которых имеет четырёхколёсную компоновку автомобильного типа.

Выносимые на защиту положения:

1. Алгоритм планирования задания мобильного робота, использующий кривые Безье третьего порядка для задания маршрута.

2. Алгоритм определения пролётных точек маршрута мобильного робота, заданного кривой Безье третьего порядка.

3. Алгоритм выбора маршрута выполнения задания мобильным роботом из множества альтернативных маршрутов, определённых кривыми Безье третьего порядка.

4. Алгоритм автоматического расчёта набора управляющих воздействий (углов отклонения управляющих колёс мобильного робота от продольной оси мобильной платформы), необходимых для отработки мобильным роботом маршрута, заданного кривой Безье третьего порядка.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке алгоритмов, использующих кривые Безье третьего порядка, для формирования маршрута выполнения задания колёсным роботом, трансмиссия мобильной платформы которого имеет четырёхколёсную компоновку автомобильного типа.

Практическая значимость заключается в:

- Разработанной компьютерной программе, которая может быть использована в качестве инструмента настройки и отладки системы планирования маршрута исполнения задания при конструировании колёсных роботов, имеющих мобильную платформу с трансмиссией, реализованной на базе четырёхколёсной компоновки автомобильного типа.

- В возможности применения разработанного программного обеспечения и аппаратной базы в учебном процессе подготовки студентов высших учебных заведений в рамках лабораторного практикума по программированию систем управления мобильными роботами.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность и обоснованность научных результатов диссертационной работы обусловлена применением известной и получившей широкое распространение теории кривых Безье и подтверждается согласованием результатов теоретических и практических исследований. Достоверность и новизна полученных результатов научной работы защищена тремя патентами. Работа

выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания №2.1237.2017/4.6.

Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены:

- на заседаниях аттестационной комиссии при ежегодной аттестации аспирантов кафедры «Автоматика, информатика и системы управления» ГОУ МГИУ;
- на конференции молодых ученых на кафедре «Автомобили и двигатели» МГИУ, г. Москва – 2009 г;
- на научно-практической конференции «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий», ИНФО г. Сочи – 2010 г;
- на IV Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в образовании, науке и производстве», г. Серпухов – 2010 г;
- на научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных Автомобильного факультета МГИУ «Молодая наука АФ» – 2011 г.;
- на научно-практической конференции «ИНФО-2015: Инновации на основе информационных и телекоммуникационных технологий» – 2015 г;
- на научно-практической конференции «ИНФО-2016: Информационные и коммуникационные технологии в образовании, науке и производстве» – 2016 г.

Соответствие работы паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует научной специальности 05.02.05 «Роботы, мехатроника и робототехнические системы» в пунктах 2 и 3 паспорта специальности, а именно:

- пункт 2 – математическое моделирование мехатронных и робототехнических систем, анализ их характеристик методами компьютерного моделирования, разработка новых методов управления и проектирования таких систем;
- пункт 3 – методы адаптивного, распределенного, интеллектуального управления робототехническими и мехатронными системами.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 20 печатных работах, из них 7 – в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, рекомендованного ВАК, и 3 патентах.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и четырёх приложений, содержит 75 рисунков и 52 таблицы. Объем диссертации 187 страниц. Список литературы состоит из 134 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и поставлены задачи исследования, описана научная новизна, а также аргументирована практическая ценность исследования и приведена структура работы.

В первой главе рассматривается текущее состояние проблемы, связанной с автоматизацией перемещения грузов по территории современных логистических центров.

Проведён анализ динамики внедрения робототехнических комплексов, осуществляющих транспортировку объектов складирования в результате которого выявлено,

что с появлением автономных транспортных модулей (АТМ) началась новая ступень автоматизации складских предприятий.

Пионером в области внедрения АТМ с целью автоматизации склада выступила компания Амазон (Amazon). В 2008 году техническим подразделением компании Амазон – Кива Системс (Kiva Systems) был создан экспериментальный склад, где перемещение грузов осуществлялось мобильными роботами (рисунок 1).



Рисунок 1 – АТМ производства Кива Системс, грузоподъемность 450 кг.

Эксперимент оказался более чем удачным. По официальным данным, эффективность использования складских площадей увеличилась на 42%, а скорость обработки заказов выросла на 50%, что подтолкнуло развитие направления логистических АТМ во всём Мире.

Вслед за Амазон логистические АТМ для нужд автоматизации собственных складских комплексов были разработаны компаниями Ди-Эйч-Эл (DHL) – США и Окадо (Ocado) – Великобритания.

Проведённый анализ изменения объёма производства логистических АТМ в период с 2015 по 2019 год показывает, что спрос на данный тип мобильных роботов неуклонно растёт, что проиллюстрировано на рисунке 2.

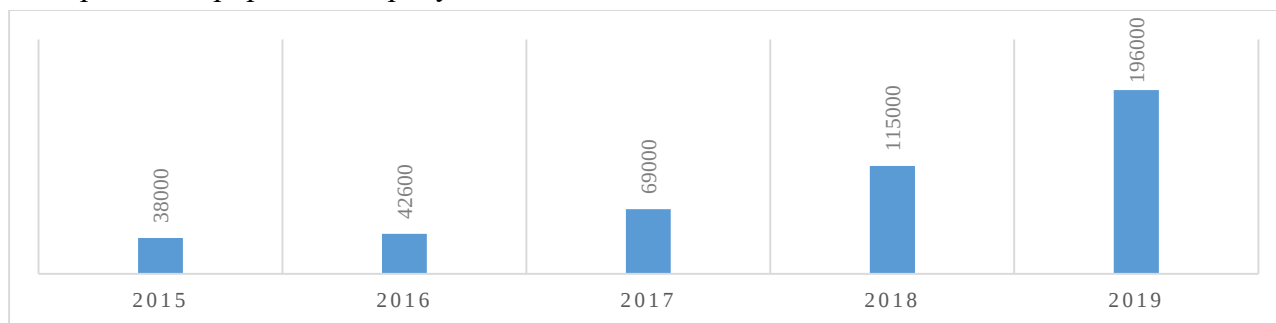


Рисунок 2 – Динамика поставок логистических АТМ в мире в период с 2015 по 2019 год.

По результатам проведённого анализа существующих тенденций на рынке логистических АТМ выявлено, что в настоящий момент наметился качественно новый этап в развитии данного сегмента средств автоматизации складских предприятий. Так, например, целый ряд научно-исследовательских коллективов ведут активную работу над созданием автономных транспортных модулей, реализованных на базе вилочных погрузчиков. Среди которых можно выделить исследовательскую группу ПЭН-Роботс (PAN-Robots) – ЕС, компанию Ай-Кей-Ви Робот (IKV Robot) – КНР, а также Робо-Си-Ви (RoboCV) – РФ.

На основании анализа материалов, опубликованных по теме исследования, установлено, что автоматизация транспортировки грузов по территории складского комплекса является сложной комплексной задачей и не может быть реализована в рамках единственной работы, т.к. охватывает широкий перечень научно-технических проблем, включающих разработку систем очувствления, объективного контроля, планирование маршрута, а также реализацию

целого ряда сопутствующих систем инфраструктуры логистического центра, вследствие чего было принято решение сфокусировать усилия на группе задач, связанных с разработкой алгоритмов планирования маршрута АТМ.

На основании изучения предметной области исследования сформулирован перечень ограничений, налагаемых на рабочую зону, АТМ, а также перемещаемые грузы, а именно:

- **Складской комплекс.** Будем исходить из того, что объектом автоматизации является складское помещение класса А+ по классификации Кнайт Франк (Knight Frank). Склад представляет собой условно детерминированную среду, снабжённую вычислительной системой верхнего уровня, осуществляющей постановку задач для АТМ, а также системой контроля за перемещением объектов по территории рабочей зоны, аналогичной системе потолочных лазерных сканеров системы ПЭН-Роботс. Территория склада, на которой осуществляется транспортировка грузов, является крытой, защищённой от воздействий окружающей среды, и снабжена системой, поддерживающей постоянную температуру, соответствующую нормальным условиям. Транспортировка осуществляется на плоскости в пределах одного этажа. Поверхность перемещения, представляет собой ровный бетонный пол (или иное покрытие, предполагающее, что движение колёс АТМ происходит без проскальзывания).

- **АТМ (автономный транспортный модуль)** может быть классифицирован как мобильный колёсный робот в соответствии с пунктами 2.6, 2.13, 3.16.1 ГОСТ 60.0.0.4-2018. АТМ реализован в виде четырёхколёсной мобильной платформы, трансмиссия которой имеет четырёхколёсную автомобильную компоновку, то есть управляющая пара колёс представляет собой свободно катящиеся симметричные поворотные модули. Задние колёса выполнены в виде симметричных не поворотных колёсных модулей, являются ведущими. Колёсный робот снабжен системой датчиков внешней информации, аналогичной системе, применённой в проекте ПЭН-Роботс, т.е. в любой момент времени системе управления доступны данные об окружающих его препятствиях, их классе, геометрии, ориентации в пространстве, скорости и направлении движения. Бортовая вычислительная система АТМ в любой момент времени имеет информацию о собственном пространственном расположении относительно глобальной системы координат склада. При движении скорость колёсного робота не превышает 1,38м/с, колёса транспортёра движутся по поверхности перемещения без проскальзывания. Мобильная платформа имеет электрическую силовую установку и оснащена исполнительной системой, способной принимать цифровой сигнал и преобразовывать его в угол поворота управляющих направлением движения колёс.

- **Перемещаемые объекты.** Предполагается, что объекты складирования представляют собой материалы, конструкционные элементы и объекты готовой продукции машиностроительных предприятий, не требующие особых условий транспортировки. То есть они не относятся к классам прецизионных механизмов, легковоспламеняющихся, взрывчатых веществ или боеприпасов. Таким образом, в рамках работы считается, что ограничения, связанные с линейными и боковыми ускорениями при перемещении грузов, отсутствуют. Также считается, что при перемещении груз находится на паллете, габариты груза по длине и ширине не превышают размеров паллеты. Масса груза не превышает 2000 кг.

Также в рамках первой главы приведена классификация наиболее распространённых методов планирования маршрута АТМ для условий, определённых приведёнными ограничениями.

Во второй главе приводится обоснование ограничения, налагаемого на скорость движения АТМ, сформулированное на основе изучения аналогичных решений (рисунок 3), а также исследования нормативно правовой базы, регламентирующей скоростные режимы на территории складских комплексов. В результате чего установлено, что и в соответствии с пп. 1.20 Инструкции ТИ Р М-009-2000, утв. Минтрудом РФ 17.03.2000, предельно допустимая скорость движения погрузчика по территории крытого склада на территории РФ составляет 1,38 м/с.

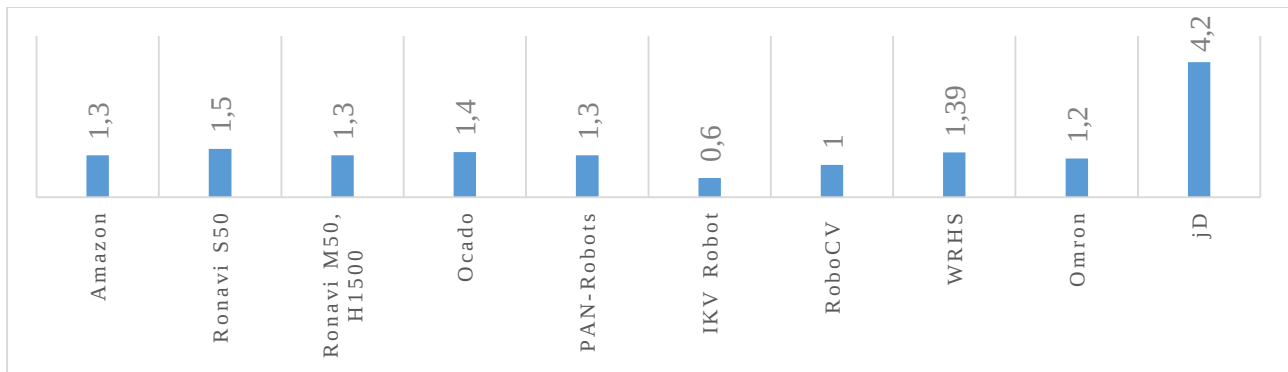


Рисунок 3 – Максимальные скорости развиваемые логистическими АТМ разных производителей.

Рассмотрена реализация рулевого управления, конструкция которого основана на принципе Аккермана (в некоторых источниках Жанто), подробно описанном в классических работах, посвящённых конструкции четырёхколёсных транспортных средств, Е.А. Чудакова, Й. Раймпеля, П.В. Аксенова, Д.А. Антонова, А. Дика, Р.П. Кушвида, и др (рисунок 4).

Принцип Аккермана заключается в неравномерности углового перемещения управляющих колёс, что обусловлено установкой рулевого рычага под углом к продольной оси ТС. Рассогласование углов отклонения управляющих колёс позволяет получить параллельное расположение следов колёс как при прямолинейном движении ТС, так и при выполнении поворота.

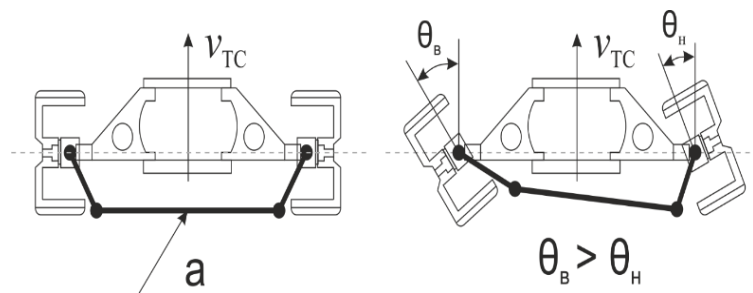


Рисунок 4 – Конструкция рулевого управления Аккермана (Жанто). а – схема установки рулевых рычагов реализующих принцип Аккермана; $v_{ТС}$ – направление движения ТС; θ_v, θ_n – углы отклонения от продольной оси ТС внутреннего и наружного колеса во время выполнения поворота.

Рассмотрим поворот ТС без учета бокового увода (рисунок 5). Будем считать, что боковое скольжение колёс при выполнении поворота отсутствует. В этом случае векторы скоростей центров всех колёс $\vec{v}_{ki}$ должны лежать в плоскостях их вращения. Следовательно, управляемые колёса необходимо повернуть на такие углы, при которых перпендикуляры к плоскостям вращения колёс пересекутся в одной точке — мгновенном центре скоростей. Эту точку называют мгновенным

центром поворота. Мгновенный центр поворота находится в точке O на продолжении оси неуправляемых колес. Радиусом поворота ТС – R_{Π} называется расстояние от мгновенного центра поворота O до продольной оси ТС, обозначенной AB .

Найдем соотношение между углами поворотов наружного $\theta_{\text{н}}$ и внутреннего $\theta_{\text{в}}$ управляемых колес. Из треугольников ODE и OCF :

$$\operatorname{ctg} \theta_{\text{н}} = \frac{OE}{DE}; \operatorname{ctg} \theta_{\text{в}} = \frac{OF}{CF}. \quad (1)$$

Вычитая из первого равенства второе и принимая во внимание, что $DE = CF = L$, $OE - OF = l_0$, получаем:

$$\operatorname{ctg} \theta_{\text{н}} - \operatorname{ctg} \theta_{\text{в}} = \frac{l_0}{L}, \quad (2)$$

где l_0 – расстояние между осями шкворней поворотных цапф управляемых колес ТС.

При изменении углов поворота в достаточно широких пределах (для современных ТС максимальные углы поворота колес достигают $35 - 46^\circ$) классическая конструкция рулевой трапеции Аккермана не обеспечивает точного выполнения условия Аккермана (2), что компенсируется за счёт:

- изменения угла наклона рычагов управляющих колес по отношению к продольной оси ТС;
- боковой деформации шин, а также их бокового скольжения при выполнении поворота.

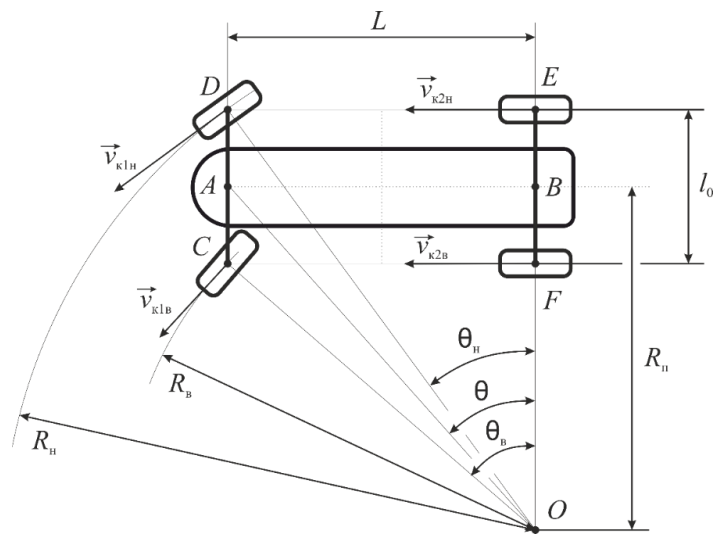


Рисунок 5 – Схема поворота ТС при качении колес без бокового увода.

Таким образом, при проектировании современных ТС углы наклона поворотных рычагов выбирают таким образом, чтобы в положении рулевой трапеции, соответствующем движению ТС по прямой, осевые линии рычагов пересекались в некоторой точке E , расположенной внутри корпуса ТС, рисунок 6.

При этом точка E должна находиться на расстоянии l_E от оси вращения управляемых колес, определяемым соотношением $l_E = k_E L$, где значение коэффициента k_E находится в пределах $0,7 - 0,9$. То есть в процессе проектирования системы рулевого управления современных ТС осуществляется поиск оптимального значения k_E , при котором обеспечивается наилучшее согласование углов поворота управляемых колес поворота $\theta_{\text{н}}$ и $\theta_{\text{в}}$.

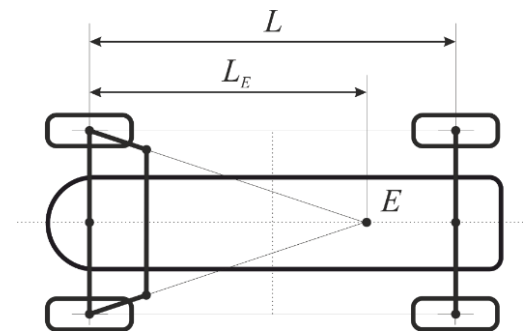


Рисунок 6 – Схема выбора параметров рулевой трапеции.

Для определения зависимости R_{π} от углов поворота управляемых колес сложим левые и правые части выражений (2). Принимая во внимание, что $OE = R_{\pi} + \frac{l_0}{2}$; $OF = R_{\pi} - \frac{l_0}{2}$ получаем:

$$ctg\theta_B + ctg\theta_H = \frac{2R_{\pi}}{L}. \quad (3)$$

Из рисунка 5 следует, что:

$$ctg\theta = \frac{ctg\theta_H + ctg\theta_B}{2}, \quad (4)$$

где θ – средний угол поворота управляемых колёс, при сравнительно небольших углах поворота управляемых колес, характерных для обычных эксплуатационных условий (кроме маневрирования на площадках ограниченной величины), в первом приближении можно принять:

$$\theta \approx \frac{\theta_H + \theta_B}{2}.$$

Тогда

$$R_{\pi} = \frac{L}{tg\theta}. \quad (5)$$

При движении ТС на повороте с высокими скоростями возникают значительные боковые составляющие сил инерции, поэтому колеса катятся с боковыми уводами. В общем случае углы увода всех колес различны. Однако с целью упрощения во многих случаях без существенной ошибки можно принимать для колес одного и того же моста одинаковые углы увода

$$\delta_{yvi} = \frac{\delta_{yв.нi} + \delta_{yв.вi}}{2}.$$

В этом случае угол δ_{yvi} называют углом увода i -ого моста.

При возникновении бокового увода векторы скоростей центров колес $\vec{v}_{ki}$ не лежат в плоскостях их вращения, а отклоняются в сторону действия боковых сил на углы увода $\delta_{yв1}$ и $\delta_{yв2}$, как показано на рисунке 7.

Вследствие этого мгновенный центр поворота перемещается из точки O в точку O^* , а радиус поворота R_{π}^* становится равным расстоянию O^*D , где O^*D — длина перпендикуляра, опущенного из точки O^* на продольную ось ТС.

Векторы скоростей точек A и B без учёта бокового увода колёс обозначены $\vec{v}_A$ и $\vec{v}_B$, а при уводе

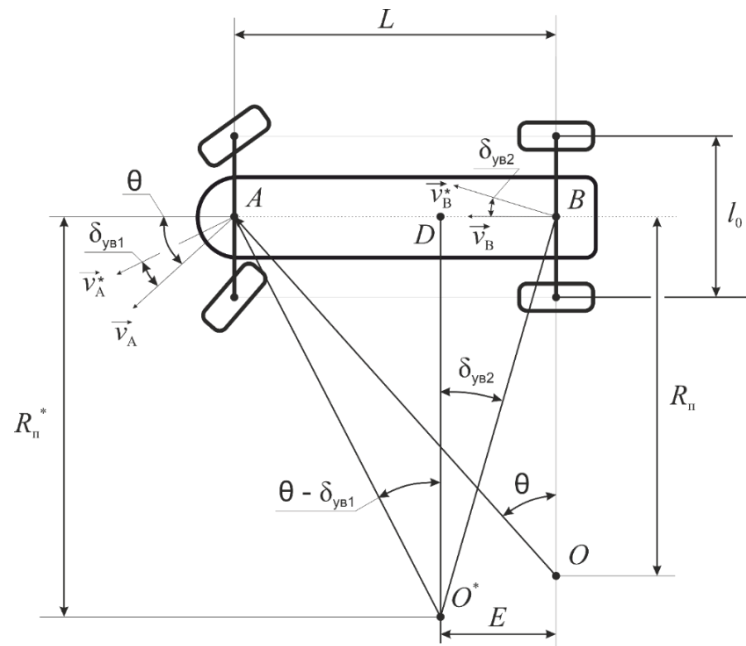


Рисунок 7 – Схема поворота ТС при качении колёс с уводом.

$\vec{v}_A^*$ и $\vec{v}_B^*$. Из рисунка 7 непосредственно находим $AD = R_{\pi}^* \operatorname{tg}(\theta - \delta_{yB1})$; $DB = R_{\pi}^* \operatorname{tg}(\delta_{yB2})$. Так как $L = AD + DB$, то

$$R_{\pi}^* = \frac{L}{\operatorname{tg}(\theta - \delta_{yB1}) + \operatorname{tg}(\delta_{yB2})}. \quad (6)$$

Углы увода колес обычно не превышают 5—10°. Углы поворота управляемых колес при высоких скоростях движения также невелики, поэтому выражение (6) можно упростить:

$$R_{\pi}^* = \frac{L}{\theta + (\delta_{yB2} - \delta_{yB1})}. \quad (7)$$

В зависимости от соотношения углов увода колес переднего и заднего мостов радиус поворота R_{π}^* может быть равным радиусу поворота R_{π} , без увода (при $\delta_{yB1} = \delta_{yB2}$), меньше (при $\delta_{yB1} < \delta_{yB2}$) или больше его (при $\delta_{yB1} > \delta_{yB2}$). Мгновенный центр поворота при уводе колес всегда смещается внутрь базы ТС. Смещение E центра поворота O^* определяется по формуле:

$$E = R_{\pi}^* \operatorname{tg}(\delta_{yB2}) \cong R_{\pi}^* \delta_{yB2}. \quad (8)$$

Рассмотрена математическая модель кинематического управления движением четырёхколёсным ТС, предложенная д-ром физ.-мат. наук Е.А. Митюшевым, д-ром физ.-мат. наук С.А. Брестовой и канд. физ.-мат. наук Ф.Д. Мисюра, основанная на классических работах Е.А. Чудакова, и Й. Раймпеля.

Рассмотрим кинематическую схему движения четырёхколёсного ТС приведённую на рисунке 8. Будем считать, что при движении ТС выполняется кинематическое условие Аккермана (2). Колёса вращаются без проскальзывания. Определим уравнения кинематического управления движением для данного ТС.

Где θ_B и θ_H — угол поворота управляемых колес внутреннего и наружного соответственно, которые определяются с учетом положения мгновенного центра скоростей O .

Рулевая трапеция Аккермана приведённая на рисунке 4 с достаточной степенью точности обеспечивает реализацию принципа Аккермана. Таким образом окружность радиусом R_{π} будет соответствовать траектории движения центра масс ТС:

$$R_{\pi} = \sqrt{a^2 + L^2 \operatorname{ctg}^2 \theta}, \quad (9)$$

где θ определяется из формулы (4) и является углом, эквивалентным углу поворота двухколёсной модели, имеющей аналогичную базу L и осуществляющей движение по окружности радиуса R_{π} .

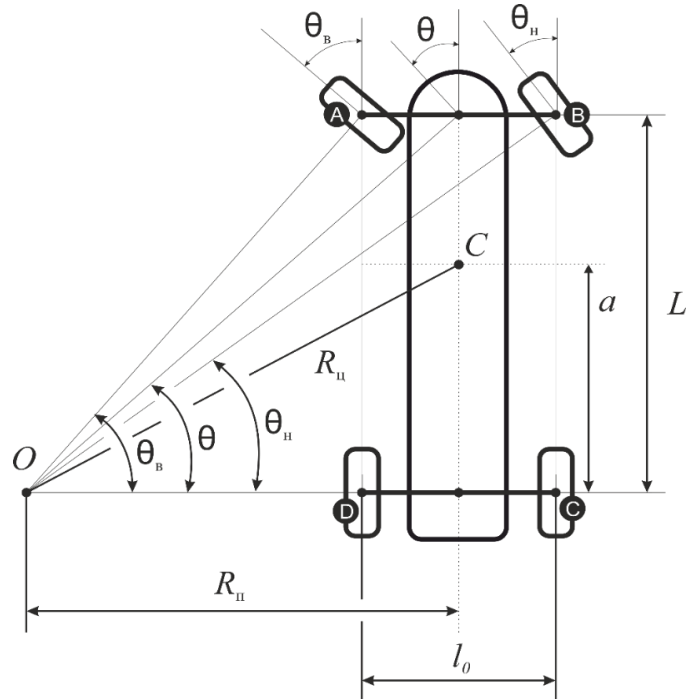


Рисунок 8 – Кинематическая схема движения четырехколесного транспортного средства.

Примем θ в качестве параметра управления и введём его в натуральное уравнение движения центра масс ТС:

$$k = k(s),$$

где

$$k(s) = \frac{1}{R_{\text{ц}}}.$$

Таким образом из (9) можно найти закон управления ТС по заданной траектории:

$$\theta = \frac{k(s)}{|k(s)|} \operatorname{arccctg} \sqrt{\frac{\frac{1}{k^2(s)} - a^2}{L^2}} \quad (10)$$

При параметрическом задании с достаточно точным приближением можно определить, как равенство

$$k = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}y}{\sqrt{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^3}} \quad (11)$$

Тогда (10) с учётом (11) примет вид:

$$\theta = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}y}{|\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}y|} \operatorname{arccctg} \sqrt{\frac{\frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^3}{(\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}y)^2} - a^2}{L^2}}. \quad (12)$$

Закон изменения углов поворота передних колес ТС с учетом (2) и (4) определяется как:

$$\operatorname{ctg} \theta_{\text{в}} = \operatorname{ctg} \theta - \frac{l_0}{2L}, \quad \operatorname{ctg} \theta_{\text{н}} = \operatorname{ctg} \theta + \frac{l_0}{2L}.$$

Угловая скорость кузова ТС в его вращении вокруг вертикальной оси определяется равенством: $\omega = \dot{\psi}$, где ψ угол поворота касательной к траектории движения ТС.

С учетом определения кривизны траектории можно записать:

$$\omega = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d\psi}{ds} \frac{ds}{dt} = v_c k(s). \quad (13)$$

$$v_c = \sqrt{\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2}.$$

Траектории точек касания колес определяются уравнениями:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \psi(t) & -\sin \psi(t) \\ \sin \psi(t) & \cos \psi(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x + (L - a) \\ y - \frac{l_0}{2} \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} x_B \\ y_B \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \psi(t) & -\sin \psi(t) \\ \sin \psi(t) & \cos \psi(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x + (L - a) \\ y + \frac{l_0}{2} \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \psi(t) & -\sin \psi(t) \\ \sin \psi(t) & \cos \psi(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - a \\ y + \frac{l_0}{2} \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} x_D \\ y_D \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \psi(t) & -\sin \psi(t) \\ \sin \psi(t) & \cos \psi(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - a \\ y - \frac{l_0}{2} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

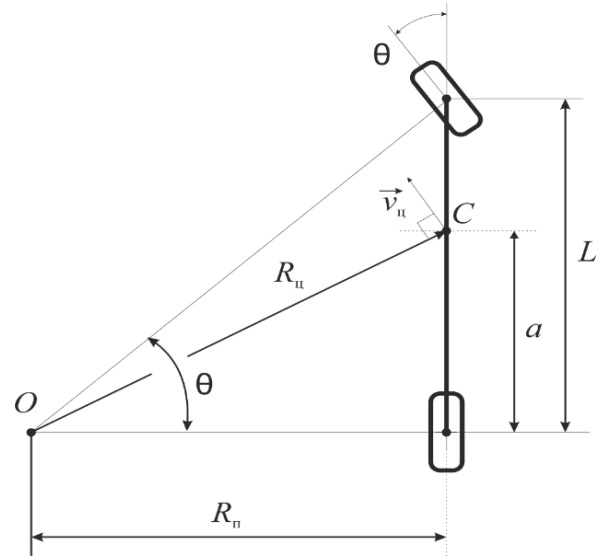


Рисунок 9 – Двухколёсная модель ТС.

Рассмотрим пример кинематического управления четырёхколёсным ТС, приведённый в публикации д-ра физ.-мат. наук Е.А. Митюшева, д-ра физ.-мат. наук С.А. Брестовой и канд. физ.-мат. наук Ф.Д. Мисюры. Пусть траектория движения центра масс ТС задана уравнениями: $x = 5t$ м, $y = 5 - 5 \cos \frac{\pi}{2} t$ м. Габариты ТС $l_0 = 1.5$ м, $L = 2$ м, $a = 1$ м. В условиях рассматриваемого примера получим:

$$\theta = \frac{\frac{25\pi^2}{4} \cos \frac{\pi}{2} t}{\left| \frac{25\pi^2}{4} \cos \frac{\pi}{2} t \right|} \operatorname{arccctg} \sqrt{\frac{\frac{\left(5^2 + \left(\frac{5\pi}{2} \sin \frac{\pi}{2} t\right)^2\right)^3}{\left(\frac{25\pi^2}{4} \cos \frac{\pi}{2} t\right)^2} - a^2}{L^2}},$$

График закона управления для рассматриваемого примера приведён на рисунке 10. Визуализация движения ТС выполнено в пакете MathCAD. На рисунке 11 показаны кадры анимации движения колес ТС для моментов времени: $t = 1$ с, $t = 2$ с, $t = 3$ с, $t = 4$ с.

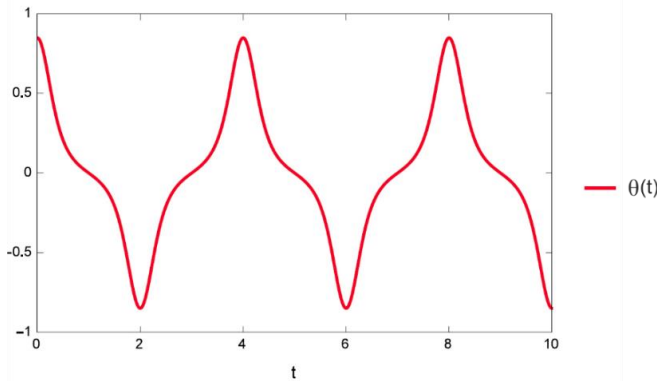


Рисунок 10 – График закона управления

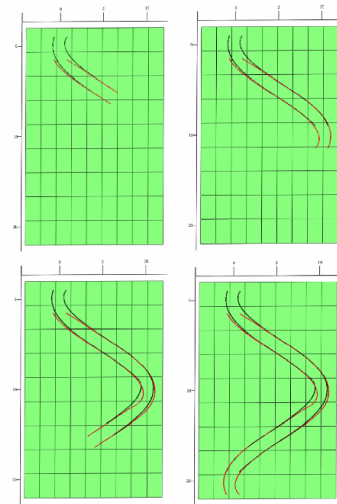


Рисунок 11 – Кадры анимации следов оставляемых ТС

В третьей главе разработана структурная схема информационных потоков системы управления мобильной платформой, удовлетворяющая выбранной стратегии планирования выполнения задания (рисунок 12).

Здесь СУВ, интегрированная в инфраструктуру логистического центра, осуществляет определение цели перемещения мобильной платформой. СУВ, используя информационный канал И1, передаёт мобильной платформе данные о его заданном и фактическом пространственных расположениях относительно, глобальной системы координат, привязанной к территории складского комплекса.

СУВ является сторонней системой по отношению к мобильной платформе, т.е. передача данных осуществляется по беспроводной сети. ГТ, используя совокупность данных СУВ, системы датчиков внешней информации, осуществляет планирование маршрута мобильной платформой, т.е. определение некоторой кривой, по которой необходимо пройти для того, чтобы достичь заданного пространственного расположения (планирование маршрута осуществляется относительно системы координат мобильной платформы).

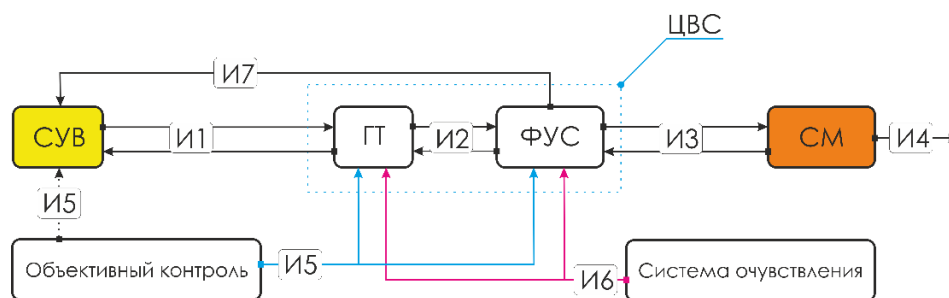


Рисунок 12 – Структурная схема информационного взаимодействия. СУВ – система управления верхнего уровня; ЦВС – центральная вычислительная система мобильной платформы; ГТ – модуль генератора маршрута; ФУС – модуль формирования сигналов управления; СМ – сигнальный модуль; И1... И6 – каналы передачи данных.

Под системой объективного контроля подразумевается интегрированный в инфраструктуру логистического центра массив потолочных лазерных сканеров. Полученный маршрут по каналу И2 передаётся модулю ФУС, который осуществляет планирование выполнения задания мобильной платформой и через рассчитанные интервалы времени передаёт данные модулю СМ. СМ преобразует данные ФУС в электрические сигналы управления и передаёт их на исполнительные устройства мобильной платформы. Как только ФУС получает информацию от СМ о том, что весь набор управляющих воздействий отработан, используя данные систем очувствления и объективного контроля, проводится верификация положения мобильной платформы относительно заданного пространственного расположения, после чего ФУС передаёт информацию о выполнении задачи перемещения СУВ. В процессе движения ФУС использует данные канала И5 для контроля отклонения мобильной платформы от маршрута и в случае, если такое отклонение фиксируется, проводит коррекцию задания. Также во время движения ФУС непрерывно анализирует информацию, получаемую от системы датчиков внешней информации, которая выступает в качестве сигнала защитной остановки в случае обнаружения препятствия. Если препятствие обнаружено, СУВ обращается к ГТ за альтернативным маршрутом, позволяющим продолжить движение к заданному пространственному расположению и исключающим столкновение с препятствием.

Предложена геометрическая модель представления мобильной платформы как объекта управления, полученная на основании проведённого анализа особенности конструкции четырехколёсных транспортных средств, имеющих автомобильную компоновку (рисунок 13).

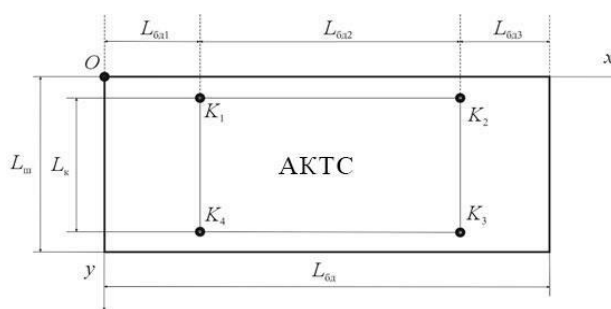


Рисунок 13 – Представление мобильной платформы в работе. Точки K_1, K_2, K_3, K_4 – точки касания колёс АКТС дорожного полотна; $L_{бд}, L_{бд1}, L_{бд2}, L_{бд3}, L_{ш}, L_{к}$ – базовые геометрические параметры АКТС; xOy – системами координат мобильной платформы.

Здесь K_1, K_2, K_3, K_4 – точки касания колёс робота поверхности перемещения. K_1, K_2 – свободно катящиеся симметричные колёсные модули, K_3, K_4 – симметричные поворотные колёсные модули. Большой прямоугольник – габаритные размеры робототехнического комплекса, включающие выступающие элементы конструкции и транспортируемый груз. Выбор такого представления мобильной платформы позволяет:

- использовать преимущества, обусловленные конструктивными особенностями выбранного типа транспортных средств, а именно жёстких механических связей между траекторией движения управляющих и свободно катящихся колёс;
- снизить требования к вычислительным мощностям бортовой ЦВС, не потеряв при этом практической ценности полученных результатов, с учётом установленных ограничений на скорость движения транспортёров.

Проведён анализ типов кривых на предмет выбора наилучшей альтернативы в качестве кривой опорной траектории для формирования маршрута робота. В результате выполненного исследования выбор сделан в пользу кривых Безье, что обусловлено следующим:

- Конечная форма кривой Безье зависит только от взаимного расположения вершин опорного многоугольника, что следует из математической основы – базиса Бернштейна.
- Простота управления и предсказуемость изменения формы кривой позволяют свести задачу планирования опорной кривой к определению координат вершин опорного многоугольника, при которых полученная кривая будет удовлетворять требуемым условиям, наложенным на опорную траекторию.
- Наличие готовых, хорошо оптимизированных решений (программных модулей и библиотек), реализующих работу с данным классом кривых.

Основываясь на результатах изучения механических связей между точками касания колёс кинематической схемы выбранного типа транспортёра, разработан геометрический алгоритм, позволяющий формировать произвольные маршруты, особенностями которого являются, во-первых, учёт конструктивных особенностей рассматриваемого типа транспортных средств, во-вторых, возможность определения пространственного расположения робота на маршруте во время исполнения задания, в-третьих, простота программной реализации.

Введём систему координат мобильной платформы $x_1O_1y_1$, базисную точку которой привяжем к точке касания поверхности перемещения (точка касания) неповоротным колёсным модулем мобильной платформы. Для определённости будем считать, что точка отсчёта введённой системы координат на момент начала движения совпадает с положением точки касания заднего колеса мобильной платформы, расположенного по левому борту, которое будем называть – задним колесом. Предположим, что ось x_1 проходит через точки касания колёсами, мобильной платформы находящимися на одной продольной оси, т.е. задним колесом и передним поворотным колёсным модулем (передним колесом) что проиллюстрировано на рисунке 14. Направление оси x_1 совпадает с направлением движения робота. Пусть определена функция f , такая, что для каждой точки на отрезке $[x_0; x_{Pn}]$ можно однозначно определить касательную f_{ki} , где под отрезком $[x_0; x_{Pn}]$ будем понимать интервал f , совпадающий с траекторией заднего колеса мобильной платформы, т.е. являющийся опорной траекторией.

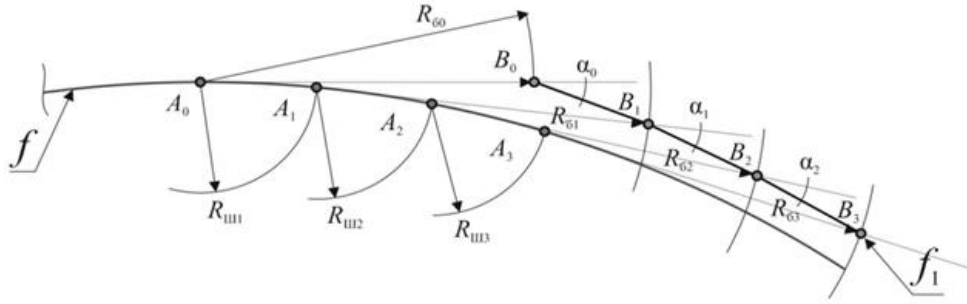


Рисунок 14 – Алгоритм обработки траектории. Мобильная платформа движется вперёд; f – опорная траектория; f_1 – кусочно-линейная аппроксимация траектории переднего колеса; f_{k1}, f_{k2}, f_{k3} – касательные к опорной траектории; P_0, P_1, P_2, P_3 – положение заднего колеса на опорной траектории при перемещении мобильной платформы; B_0, B_1, B_2, B_3 – точки касания переднего колеса; $R_{ш}$ – шаг по опорной траектории; R_6 – базовый радиус; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – углы отклонения переднего колеса от продольной оси мобильной платформы.

Дополнительно потребуем, чтобы на интервале $[x_0; x_{Pn}]$ кривизна f не превышала минимального радиуса разворота робота $R_{min} = f(v)$, что обусловлено возможностью робота «выполнить» перемещение по данной траектории.

В произвольной точке P_i , такой что $P_{xi} \in [x_0; x_{Pn}]$, проведём окружность радиуса R_6 с центром P_i , где R_6 – расстояние между точками касания заднего и переднего колёс мобильной платформы. Затем проведём касательную f_{ki} в точке P_i . На следующем шаге найдём точки пересечения окружности и касательной. С учётом модельных допущений точка касания переднего колеса всегда находится на касательной к траектории заднего колеса, тогда одна из найденных точек, расположенная по ходу движения, будет определять положение переднего колеса, соответствующее текущему положению заднего колеса. Следовательно, если обойти интервал $[x_0; x_{Pn}]$ с некоторым шагом, то можно получить набор точек B , отражающих положение переднего колеса для каждой точки P , определяющей положение заднего колеса. Зная положения переднего колеса и принимая допущение, что в момент начала движения угол отклонения переднего колеса от продольной оси мобильной платформы известен, можно определить набор углов отклонения переднего колеса от продольной оси мобильной платформы для каждого шага, т.е. набор пространственных расположений, которые необходимо выполнить, чтобы заднее колесо мобильной платформы переместилось по опорной траектории.

Будем считать, что функция f – опорная траектория, заданная кривой Безье 3-его порядка $P(t)$, и имеет вид (14). Параметр t – безразмерная величина, имеющая физический смысл временного интервала, за который робот исполняет задание, изменяется в пределах $[0,1]$.

$$P(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3, t \in [0,1] \quad (14)$$

Здесь $P(t)$ – функция компонент опорных вершин в точке t . Используя представление опорной траектории (14), мы можем определить координаты x, y точки P_i для любого t на интервале $t \in [0,1]$. Будем двигаться по опорной траектории с шагом Δt , таким, что:

$$\Delta S(\Delta t) \ll R_6, R_6 = \text{const} \quad (15)$$

где ΔS – перемещение по опорной траектории за время Δt . Используя систему уравнений (16), для каждого шага определим положения точки касания переднего колеса относительно

введённой системы координат как пересечение касательной к опорной траектории и окружности R_6 с центром в точке P_i .

$$\begin{cases} (x - P(t_i)_x)^2 + (y - P(t_i)_y)^2 = R_6^2 \\ y(x) = P(t_i)_y + \frac{\dot{P}(t_i)_y}{\dot{P}(t_i)_x} (x - P(t_i)_x) \end{cases} \quad (16)$$

Угол отклонения переднего колеса от продольной оси мобильной платформы на i -м шаге определим, как угол между прямой, проведённой через точки B_i и B_{i+1} , и касательной к траектории заднего колеса f_{ki} в точке P_i и назовём α_i . Тогда угол «доворота» переднего колеса – β_i , т.е. угол, на который нужно повернуть переднее колесо, чтобы перевести его из положения, соответствующего углу α_i , в положение α_{i+1} , и будет искомым управляющим воздействием на i -м шаге. Блок - схема программы, реализующей разработанный алгоритм, приведена на рисунке 15.

Точность кусочно-линейной аппроксимации траектории переднего колеса и, как следствие, качество отработки траектории напрямую зависит от N – количества шагов по кривой опорной траектории. Опытным путём установлено, что при $N < 20$ и скорости движения, не превышающей 1,38 м/с, во время движения мобильной платформы наблюдается эффект «рыскания», однако при $N = 40$ данный эффект исчезает, транспортёр движется плавно. Следует заметить, что разработанный алгоритм не учитывает динамических характеристик, влияющих на

поперечный увод мобильной платформы, однако, принимая во внимание ограничения, наложенные на скорость движения транспортёра, можно утверждать, что ошибка, связанная с динамикой робота, пренебрежимо мала. При необходимости же ее исключения компенсация отклонения от желаемой траектории может осуществляться с помощью данных, полученных от системы объективного контроля.

На основании результатов изучения поведения кривых выбранного типа разработано алгоритмическое обеспечение модуля ГТ системы управления траекторией движения мобильной платформы. Сложность задачи определения опорной траектории заключается в том, что существует множество вариантов исполнения одного и того же задания. То есть в общем случае существует бесконечное множество альтернативных кривых, удовлетворяющих условиям задания с учётом всех имеющихся ограничений, обусловленных наличием как статических, так и динамических препятствий. Следовательно, задача генерации опорной

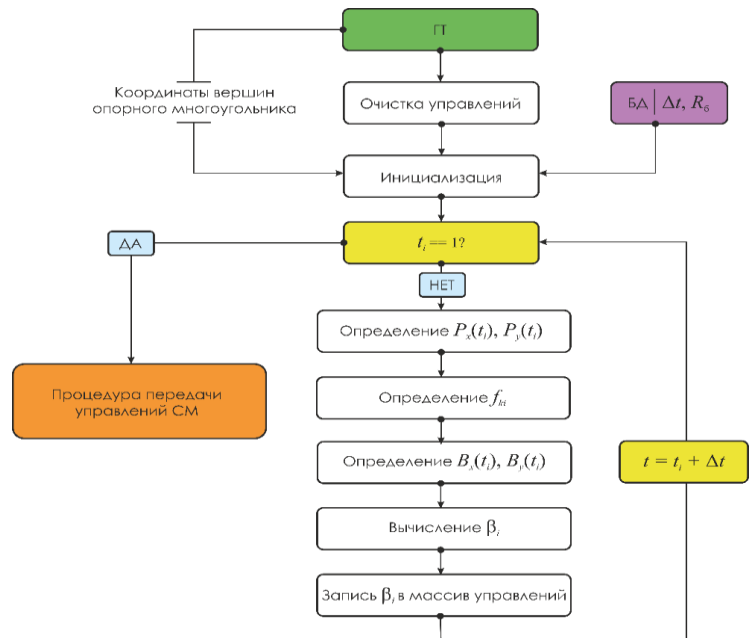


Рисунок 15 – Блок-схема алгоритма программы исполнения задания роботом.

траектории преобразуется в задачу поиска наилучшей альтернативы на заданном множестве, из которого требуется выбрать опорную траекторию, причём, только одну, что предполагает пошаговое сужение области поиска. В связи с этим произведена декомпозиция задачи поиска опорной траектории, а модуль ГТ получил блочную организацию (рисунок 16).

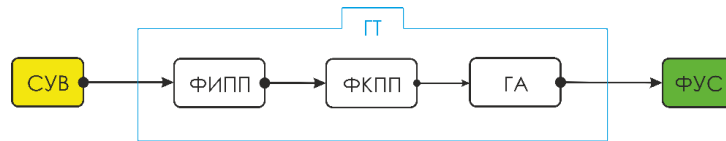


Рисунок 16 – Структурная схема модуля генератора опорных траекторий - ГТ; СУВ – система управления верхнего уровня; ФУС – модуль формирования сигналов управления; ФИПП – блок формирования исходного пространства поиска; ФКПП – блок формирования конечного пространства поиска; ГА – генетический алгоритм.

Так как в качестве опорных кривых выбраны кривые Безье 3-его порядка, задача генерации опорной кривой сводится к определению координат вершин опорного четырёхугольника относительно системы координат мобильной платформы, т.е. пространство поиска будет представлять собой множество точек, определённых на плоскости.

Пусть на пути робота существует некоторое динамическое препятствие, тогда начальное и заданное пространственные расположения определяют опорную траекторию подобную приведённой на рисунке 17.

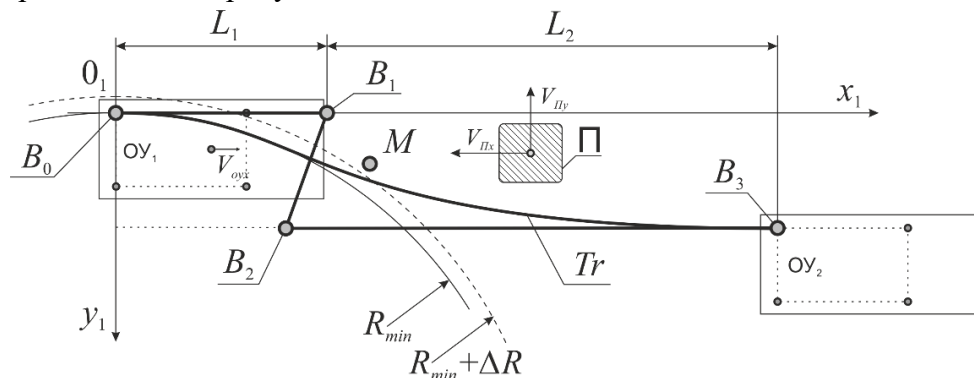


Рисунок 17 – Маневрирование мобильной платформы. x_1y_1 – система координат мобильной платформы; OY_1 – начальное пространственное расположение; OY_2 – заданное пространственное расположение; П – препятствие; М – точка гипотетического столкновения; B_0, B_1, B_2, B_3 – вершины опорного многоугольника; Tr – опорная кривая.

На основании изучения схем маневрирования был сделан вывод, что решающее значение для успешного ухода от столкновения с препятствием имеет скорость прохождения роботом участка от точки, начального пространственного расположения (точка B_0), до точки гипотетического столкновения (точка М, рисунок 17), на основании чего траектория движения робота при объезде препятствия была разделена на два участка. Первый участок был назван фазой активного уклонения, второй участок, на котором происходит выход из манёвра, – фазой релаксации. Тогда требование к опорной кривой при выполнении ухода от столкновения с препятствием сформулируем следующим образом: пусть у-координаты всех точек, принадлежащих опорной кривой на участке фазы активного уклонения, отличаются от координат у фазы релаксации, соответствующей минимальному радиусу разворота мобильной платформы, не более, чем на ΔR , то есть:

$$R_{min} \leq y(x) \leq R_{min} + \Delta R, \text{ при } x \in [0, D_x], \Delta R \ll L_{ш}. \quad (17)$$

К фазе релаксации никаких требований предъявлять не будем. Обозначим вершины опорного многоугольника, определяющего искомую опорную кривую, B_0, B_1, B_2, B_3 . Пусть известно, что положение вершины B_0 совпадает с начальным пространственным расположением робота (имеет координаты $[0,0]$ относительно системы координат мобильной платформы $x_1 O_1 y_1$). Координаты вершины B_3 определяются заданным пространственным расположением. Будем считать, что координата x вершины B_3 находится на расстоянии $3R_{min}$ от точки начала движения, т.е.

$$B_{3x} = L_1 + L_2 = 3R_{min}. \quad (18)$$

Расстояние в $3R_{min}$ является достаточным для выполнения любого манёвра, в том числе полного разворота мобильной платформы, без снижения скорости движения, что обусловлено конструкцией выбранного типа транспортёра. В свою очередь, координату y для вершины B_3 будем определять, используя формулу:

$$B_{3y} = M_y + L_{бз}. \quad (19)$$

Здесь $L_{бз} = const$ - расстояние между наиболее близкими друг к другу точек мобильной платформы и препятствия в момент гипотетического столкновения. Тогда определение исходного пространства поиска для опорной кривой сводится к определению множеств возможных значений координат для вершин B_1 и B_2 . Однако, в данной постановке задача поиска опорной кривой является неразрешимой, т.к. существует бесконечное количество вариаций расположения вершин B_1 и B_2 , при которых определённая ими кривая будет пригодной для использования в качестве основы для определения маршрута робота. Сузим исходное пространство поиска, введя дополнительные ограничения, а именно, будем считать, что $B_{1y} = B_{0y}$ и $B_{2y} = B_{4y}$, что существенно сокращает количество возможных альтернатив, при этом не теряется практическая ценность полученного решения.

$$B_{1,2xi} = B_{1,2xi-1} + \Delta x, \text{ где } \Delta x = \frac{R_{min}(v)}{d} = const. \quad (20)$$

Предположим, что координаты x вершин B_1, B_2 принадлежат интервалу $[0, R_{min}]$, допущение основано на том, что изучение кривых, где $B_{1x}, B_{2x} \rightarrow B_{3x}$ лишено всякого смысла. Будем считать, что пространство поиска координат x для вершин B_1 и B_2 является дискретным с шагом Δx (определяется желаемым количеством шагов d на интервале $[0, R_{min}]$), т.е.

Тогда с учётом сделанных предположений и введённых ограничений исходное пространство поиска будет представлено областью, изображённой на рисунке 18 одинарной штриховкой, и может быть задано в виде таблицы 1.

Таблица 1. Координаты вершин опорного многоугольника

B_0	B_1	B_2	B_3
$[0,0]$	$[0, 0]$	$[0, M_y + L_{бз}]$	$[3R_{min}, M_y + L_{бз}]$
...	...	...	...
$[0,0]$	$[R_{min}, 0]$	$[R_{min}, M_y + L_{бз}]$	$[3R_{min}, M_y + L_{бз}]$

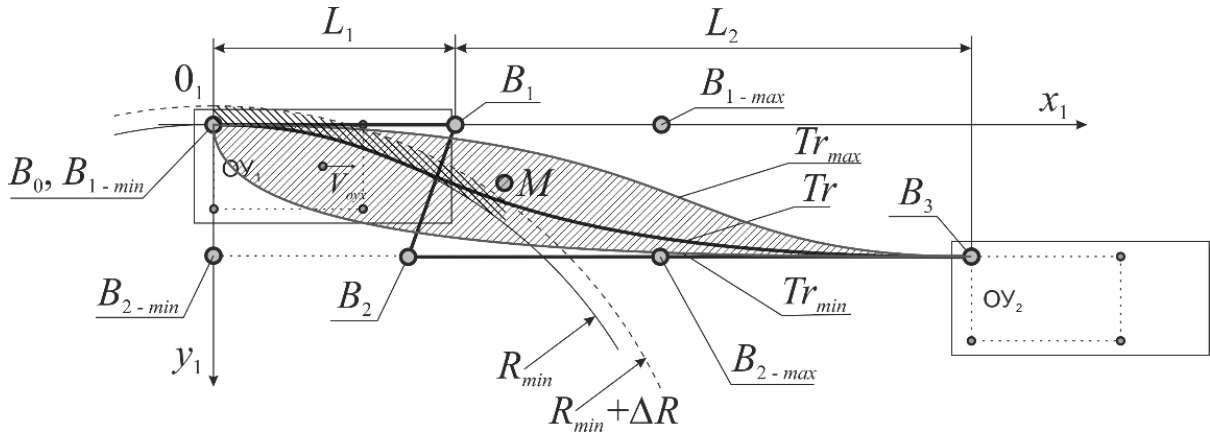


Рисунок 18 – Исходная и конечная области поиска опорной кривой. Исходное пространство поиска – одинарная штриховка; Конечное пространство поиска двойная штриховка; Tr_{max} , Tr_{min} , кривые определяющие границы исходного пространства поиска; Tr – искомая опорная кривая. L_1 – фаза активного уклонения; L_2 – фаза релаксации; R_{min} – минимальный радиус разворота; $R_{min} + \Delta R$ – ограничивающая окружность; $B_{1,n}$ – варианты расположения точек опорного многоугольника.

Определив шаг Δx и минимальный радиус разворота R_{min} , можно сформировать исходное пространство поиска опорной кривой, для чего используем итерационный алгоритм, блок-схема которого приведена на рисунке 19.

Пусть на некотором интервале L_1 необходимо определить принадлежность некоторой кривой K трубке заданных ограничений, где под трубкой ограничений понимается область между двумя концентрическими окружностями радиусов R_{min} и $R_{min} + \Delta R$. Обойдём интервал L_1 , двигаясь по кривой вдоль оси x с некоторым шагом Δx , много меньшим ΔR . Тогда условие попадания кривой в трубку ограничений можно записать следующим образом:

$$y_r(n\Delta x) + \Delta R, \text{ при} \\ 0 < n < \text{round}\left(\frac{L_1}{\Delta x}\right), \quad (21)$$

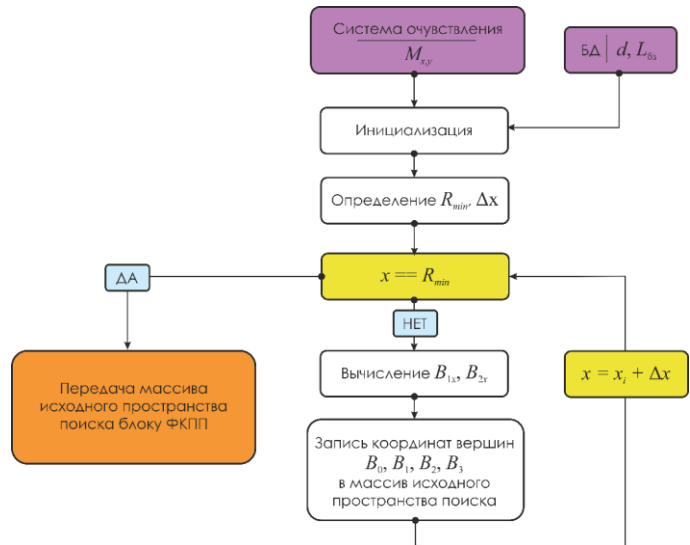


Рисунок 19 – Блок-схема алгоритма формирования исходного пространства поиска опорной кривой.

где $y_r(n\Delta x)$ – соответствующая координата y ограничивающей окружности, а n – номер шага по кривой. Таким образом, на выходе блока ФКПП, реализующего алгоритм выбраковки кривых, мы получаем массив кривых конечного пространства поиска, каждая из которых может быть использована в качестве опорной кривой для модуля ФУС. Следующим шагом производится выбор единственной – наилучшей кривой из определённого конечного множества альтернатив, для чего в рамках исследования используется стандартная реализация генетического алгоритма.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию разработанной алгоритмической базы системы исполнения задания роботом.

Проведено экспериментальное исследование алгоритмической базы модуля ФУС посредством вычислительных экспериментов с разными начальными условиями.

Осуществлён поиск набора управляющих воздействий при выполнении манёвра парковки мобильной платформы в ограниченном пространстве с последующим анализом аппроксимации фактически полученной траектории движения переднего колеса. По условиям эксперимента схема маневрирования аналогична манёвру «параллельная парковка» для легкового автомобиля, «парковочный карман» ограничен зарядной платформой. В качестве расчётных параметров мобильной платформы здесь и далее использованы габаритные размеры транспортёра типа ЕТ1 производства БАЛКАНКАР РЕКОРД АО. Параметры опорной кривой определены на основании следа заднего колеса, полученного при выполнении маневрирования аналогичным транспортным средством под управлением человека-оператора. Шаг по кривой опорной траектории $\Delta t = 0,05$. Скорость движения мобильной платформы является постоянной и составляет 0,638 м/с, движение осуществляется задним ходом. Цель эксперимента – оценка точности отработки траектории (рисунок 20). Допустимое отклонение от продольной оси следа эталонной траектории принято равным $\Delta \varepsilon = 0,05\text{м}$ (обусловлено шириной следа колеса). Полный перечень отклонений в виде графика показан на рисунке 21, максимальное зафиксированное отклонение от продольной оси следа эталонной траектории 0,01471 м, дисперсия и математическое ожидание составили соответственно $D = 5.5988999\text{E-}05\text{м}^2$, $M = -0.001009\text{м}$.

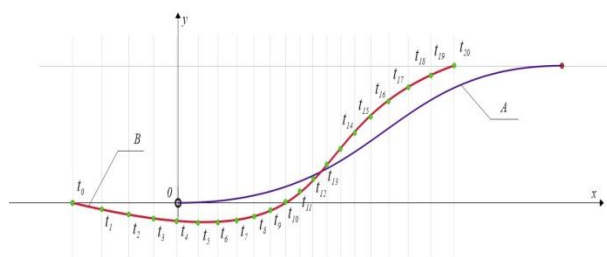
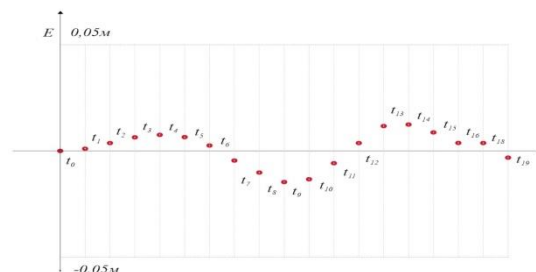


Рисунок 20 – Аппроксимация траектории переднего колеса для манёвра «парковка в ограниченном пространстве». А – Аппроксимация кривой опорной траектории; В – эталонная кривая траектории движения переднего колеса; $t_1...t_{20}$ – вычисленные координаты на траектории переднего колеса.

Рисунок 21 – Отклонения от продольной оси следа эталонной траектории.



Осуществлён поиск управляющих воздействий для опорной траектории, заранее рассчитанной модулем ГТ. По условиям эксперимента мобильная платформа движется вперёд, скорость 2,777 м/с (10 км/ч), допустимое отклонение $\Delta \varepsilon = 0,05\text{м}$, параметры опорной кривой и константы, использованные в процессе вычислений, сведены в таблицу 2.

Таблица 2.

Координаты вершин опорного многоугольника исследуемой кривой				Шаг, м	Длина базы АКТС, м	Точность округления
B_0	B_1	B_2	B_3	Δt	$L_{бд}$	p
[0; 20]	[20; 20]	[10.6; 0]	[60; 0]	0,025	5	10^{-3}

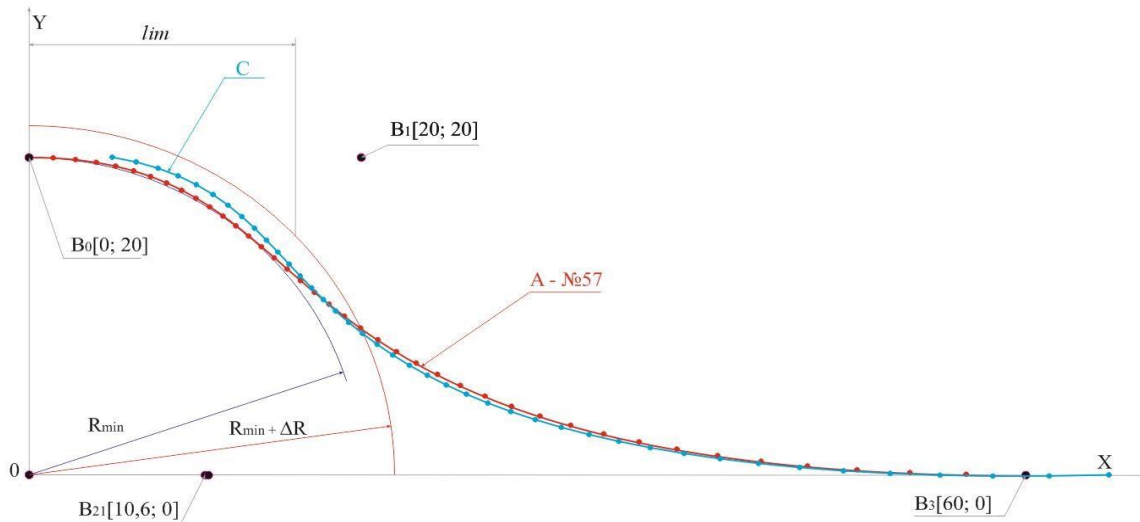


Рисунок 22 – Кусочно-линейные аппроксимации траектории заднего и переднего колеса. C – кусочно-линейная аппроксимация траектории переднего колеса мобильной платформы; A – опорная траектория, переданная модулю ФУС.

Результат эксперимента проиллюстрирован на рисунке 22, максимальное зафиксированное отклонение 0,02164м.

Проведено исследование алгоритмической базы модуля ГТ посредством вычислительного эксперимента, в процессе которого осуществлялся поиск опорной кривой для манёвра ухода от столкновения с внезапно возникшим на пути транспортёра препятствием. По условию эксперимента координаты вершин опорного многоугольника эталонной кривой известны: B_0 [0; 20], B_1 [20; 20], B_2 [10.6; 0], B_3 [60;0]. Входные данные приведены в таблице 3.

Таблица 3. Поиск опорной траектории, входные данные

$B_{1x}, B_{2x}, м$	d	p	V м/с	R_{min}	ΔR , м
[0; 20]	100	10^{-3}	2,777	20	2

B_{1x}, B_{2x} – интервал поиска координат x точек опорного многоугольника; d – количество шагов алгоритма ($\Delta x = L_1/d = 0,2$); p – точность вычислений; V м/с – скорость АТМ; R_{min} – минимальный радиус разворота; ΔR – радиус буферной зоны.

Полученные параметры кривых, ограничивающих исходное пространство поиска, приведены в таблице 4 (здесь № – номер кривой).

На сформированном исходном пространстве поиска проведём операцию выбраковки кривых, не удовлетворяющих условию (21). Сформированное

Таблица 4. Исходное пространство поиска

№	B_0	B_1	B_2	B_3
1	[0, 0]	[0, 0]	[0, 20]	[60, 20]
...	...	...	...	...
10201	[0, 0]	[20, 0]	[20, 20]	[60, 20]

конечное множество кривых подвергнем двоично-десятичному кодированию и на полученном пространстве применим генетический алгоритм (количество запусков алгоритма – 3), настроечные параметры которого приведены в таблице 5.

N_o – количество кривых в кодовом пространстве; N_p – количество особей в поколении; N_i – количество итераций алгоритма до принудительного останова; d – делитель пространства поиска; Len – максимальная длина кодового слова; p – точность машинных вычислений. Иллюстрация процесса приближения к решению приведена на рисунке 23, на оси абсцисс указано количество итераций, которое потребовалось для определения наилучшей кривой. На оси ординат указаны длины лучших кривых текущего поколения решений. Результаты поиска кривой опорной траектории для всех 3 выборок сведены в таблицу 6.

Таблица 5. Настроечные параметры ГА

N_o	N_p	N_i	d	Len	p
67	14	100	5	7	10^{-3}

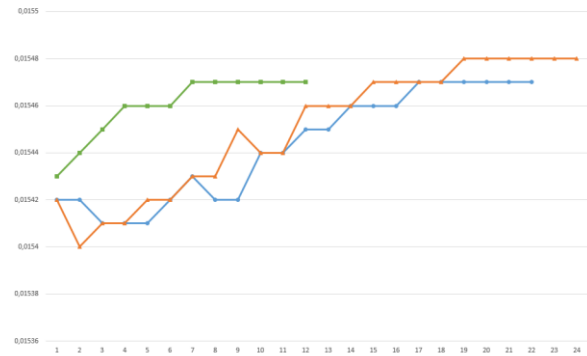


Рисунок 23 – Поиск кривой опорной траектории посредством ГА.

Здесь B_0, B_1, B_2, B_3 – координаты точек опорных многоугольников найденных кривых; ITR – количество итераций генетического алгоритма.

Таблица 6. Результирующие кривые

№	FN	CD	$F_{цсл}$	B_0, B_1, B_2, B_3	ITR
1	57	0111001	119,374	[0; 20], [20; 20], [10.6; 0], [60; 0]	41
2	57	0111001	119,374	[0; 20], [20; 20], [10.6; 0], [60; 0]	20
3	58	0111010	119,383	[0; 20], [20; 20], [10.8; 0], [60; 0]	25

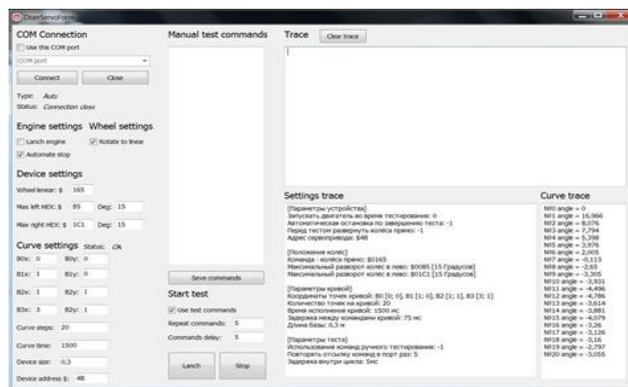


Рисунок 24 – Слева – интерфейс программы выполнения задания, разработанной для модели ATM01; справа – фото - отработка ATM01 по заданной криволинейной траектории.

Проведены полунатурные испытания, для чего разработаны две модели мобильной платформы (ATM01 на базе модели автомобиля, ATM02 имеющее большие габаритные размеры и массу, что позволяет дать оценку погрешностям, связанным с инерциальными свойствами реального робототехнического комплекса). Для моделей разработана аппаратная реализация модулей ФУС, а также программное обеспечение, имитирующее работу модуля

ГТ. Обработка траектории фиксировалось на видео. По условиям экспериментов эталонные траектории известны заранее, фото эксперимента приведено на рисунке 24 (справа).

Эмпирическим путём получен график, отражающий зависимость «плавности» хода мобильной платформы от количества пролётных точек в задании (рисунок 24), опираясь на который, возможно совершать настройку системы управления мобильной платформой на базе предложенных алгоритмов.

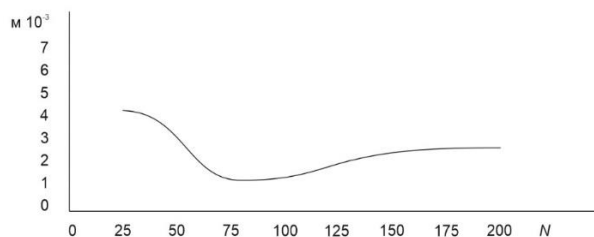


Рисунок 24 - Общий вид зависимости «плавности» хода мобильной платформы от количества пролётных точек в задании.

Проведена сравнительная оценка временных затрат на перемещение грузов на участке неавтоматизированной транспортировки. Моделирование осуществлено с помощью комплекса имитационного моделирования RDO. В рамках моделирования считалось, что транспортировка грузов осуществляется 30 погрузчиками, в первом случае - под управлением человека-оператора, во втором случае – в автоматическом режиме, условия рабочей среды в обоих случаях одинаковы. Для имитации поведения человека-оператора введены задержки, распределение которых носило случайный характер. Типы задержек: неверно выбранный маршрут движения (не кратчайший путь), простой транспортёра (не мгновенная реакция на поставленную транспортную задачу), ошибочное перемещение груза (груз доставлен не к указанному терминалу). Всего в каждом случае было выполнено фиксированное количество перемещений (300 транспортных задач). Графическая интерпретация результатов исследования приведена на рисунке 25.

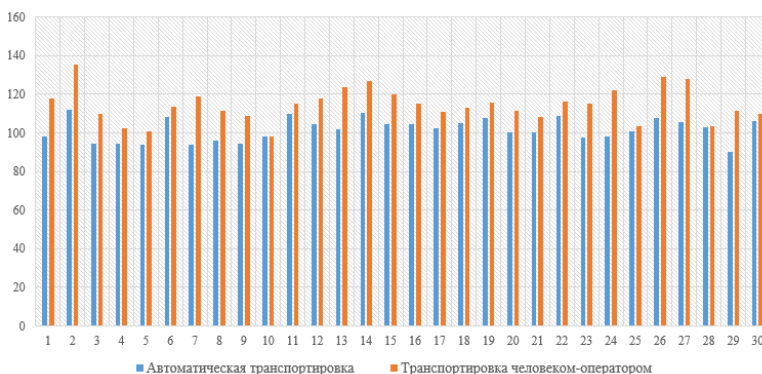


Рисунок 25 - Сравнительная оценка временных затрат на транспортировку грузов

Анализ результатов проведённого моделирования показал, что автоматизация перемещения объектов хранения обеспечивает сокращение времени обработки грузов на 11.06%, что в условиях реального логистического центра является существенным.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнена научно-квалификационная работа, в которой содержится решение научной задачи, позволяющее сократить временные затраты на транспортировку объектов хранения по территории логистического центра на 11.06% за счёт применения мобильных колёсных роботов-транспортёров, реализующих планирование и исполнение заданий посредством алгоритмов основанных на методе опорных траекторий и кривых Безье третьего порядка.

2. Установлена связь между траекторией движения мобильного колёсного робота и кривыми Безье третьего порядка, обусловленная, жёсткими механическими связями, характерными для подвесок мобильных платформ реализующих четырёхколёсную кинематическую схему с автомобильной компоновкой колёс.

3. На основании установленной связи разработан алгоритм планирования маршрута мобильного робота, особенностью которого является использование кривых Безье третьего порядка в качестве опорной кривой для построения маршрута робота.

4. Разработан алгоритм выбора маршрута выполнения задания мобильным роботом из множества альтернативных маршрутов, определённых кривыми Безье третьего порядка. Особенность предложенного алгоритма заключается в использовании эволюционных методов поиска на заданном множестве решений.

5. Разработан алгоритм определения пролётных точек маршрута мобильного робота, заданного кривой Безье третьего порядка.

6. Разработан алгоритм автоматического расчёта набора управляющих воздействий, необходимых для отработки мобильным роботом маршрута, на основании массива пролётных точек, формирующих маршрут.

7. Эмпирически определен график зависимости изменения «поперечной плавности хода» во время исполнения задания мобильной платформой от количества управляющих воздействий, выданных на исполнительные узлы системы управления направлением движением робота, на основании которого выработаны инженерные рекомендации по определению количества управляющих воздействий при внедрении систем управления траекторией движением мобильной платформы на базе разработанных алгоритмов.

4. Проведена оценка влияния динамических параметров мобильной платформы на продольное отклонение от заданной траектории в рамках определённого задачей диапазона скоростей (1,38м/с). В результате проведённого моделирования установлено, что при перемещении мобильной платформы на 20м отклонение, возникающее вследствие влияния динамических характеристик, находится в диапазоне $8 \cdot 10^{-3} \text{ м} - 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, что не превышает допустимых значений, определённых требованиями, налагаемыми перемещаемыми грузами.

5. Произведена оценка изменения временных затрат на транспортировку объектов хранения по территории складского комплекса при внедрении предложенной системы автоматизации управления движением транспортёров. Результаты моделирования показали, что автоматизация перемещения грузов приведёт снижению временных затрат на 11.06%.

6. Создан программный пакет, реализующий разработанные алгоритмы, а также позволяющий осуществлять отладку и настройку аппаратной части на этапе создания прототипов мобильных платформ, в том числе осуществлять трассировку пролётных точек маршрута.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации:

1. Алексеев, А.А. Метод оптимизации сложных кривых с использованием генетических методов поиска / А.А. Алексеев, К.А. Палагута // Информационные и телекоммуникационные технологии. №13, 2011. С. 90 -100. (Из списка ВАК)

2. Алексеев, А.А. Алгоритм прогнозирования лобового столкновения / А.А. Алексеев, К.А. Палагута // Естественные и технические науки. №1(51) 2011. С. 209-214. (Из списка ВАК)
3. Алексеев, А.А. Автоматический объезд препятствий внутрицеховым транспортом / А.А. Алексеев, В.Г. Бебени, А.И. Крюков, К.А. Палагута, И.С. Шубникова // Естественные и технические науки. №12 2014. С. 301-306. (Из списка ВАК)
4. Алексеев, А.А. Управление траекторией движения, автоматизированного внутрицехового транспортного средства // Естественные и технические науки. №12 2014. С. 298-300. (Из списка ВАК)
5. Палагута, К.А. Метод формирования области поиска для оптимизации траектории уклонения автомобиля от лобового столкновения / К.А. Палагута, А.А. Алексеев // Мехатроника, Автоматизация, Управление. №2, 2012. С. 44 – 48. (Из списка ВАК)
6. Крюков, А.И. Анализ измерительных преобразователей, применяемых в системах активной безопасности автотранспортных средств / А.И. Крюков, А.А. Алексеев, И.С. Шубникова, К.А. Палагута // Труды НПЦ АП, 2015 . (Из списка ВАК)
7. Палагута, К.А. Построение кинематической траектории движения автомобиля в экстремальных условиях / Палагута К.А., Алексеев А.А. // Машиностроение и инженерное образование, №3, 2012. С. 36 – 43. (Из списка ВАК)

Патенты Российской Федерации

1. Палагута, К.А. Система для предотвращения лобового столкновения автомобилей / К.А. Палагута, А.А. Алексеев, И.С. Шубникова // Патент на изобретение №120780, 2012.
2. Палагута, К.А. Устройство для предотвращения лобового столкновения автомобилей. / К.А. Палагута, А.А. Алексеев, // Патент России №112447, МПК G01S 13/00, зарегистрирован – 10.01.2012.
3. Палагута, К.А. Способ предупреждения столкновения транспортного средства с динамическим препятствием / К.А. Палагута, А.А. Алексеев, И.С. Шубникова // Патент на изобретение №2526144, 2014.

Публикации в сборниках РИНЦ и прочее:

1. Палагута, К.А. Алгоритм расчёта участка траектории для параллельной парковки автомобиля. / К.А. Палагута, А.А. Алексеев // Известия МГИУ. 2009. №4 (17) с.
2. Палагута, К.А. Кривые Безье как опорные кривые для построения траектории автомобиля / К.А. Палагута, А.А. Алексеев // Материалы международной научно-практической конференции ИНФО-2010. (г. Сочи, 1-10 октября 2010 г.), М.:МИЭМ, 2010, 624 с. с. 49-50.
3. Палагута, К.А. Алгоритм ведения автомобиля по криволинейной траектории / К.А. Палагута, А.А. Алексеев // Сборник трудов международной научно-практической конференции МНТК – 2010. (г. Серпухов, 28 июня – 2 июля 2010 г.), г. Серпухов, 2010, 510 с. С. 362-364.

4. Палагута, К.А. Поиск оптимальной опорной траектории автоматизированного транспортного средства. / Палагута, А.А. Алексеев // Материалы 4-й Всероссийской мультikonференции Т.2. – г. Таганрог: Издательство ТТИ ЮФУ, 2011.
5. Палагута, К.А. Моделирование траекторий для системы предотвращения столкновений транспортных средств / Палагута, А.А. Алексеев // Молодая наука АФ – 2011: Сборник научных трудов. – М.: МГИУ, 2011. С. 10.
6. Палагута, К.А. Поиск оптимальной опорной траектории автоматизированного транспортного средства / Палагута, А.А. Алексеев // Материалы 4-й Всероссийской мультikonференции, том 2, 3-8 октября 2011 г.
7. Палагута, К.А. Использование объектно-ориентированного языка программирования для определения размеров объекта / К.А. Палагута, А.А. Алексеев, И.С. Шубникова // Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2014», часть 5. МИРЭА 2014 С. 84-85.
8. Алексеев, А.А. Выбор измерительных преобразователей для робототележки, функционирующей в недетерминированной среде. / А.А. Алексеев, В.Г. Бебенин, А.И. Крюков, К.А. Палагута, И.С. Шубникова // Инновации на основе информационных и телекоммуникационных технологий: Материалы научно-практической конференции. / Научный ред. А.Н. Тихонов; Общ. ред. С.У. Увайсов; Отв. ред. И.А. Иванов – М.: НИУ ВШЭ, 2015, 672с. Стр.431-433.
9. Палагута, К.А. Автоматизация процесса транспортировки объектов хранения по территории логистического центра. / К.А. Палагута, А.А. Алексеев // Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции «Информационные и коммуникационные технологии в образовании, науке и производстве» под. редакцией Ю.А. Романенко, Н.А. Анисинкиной, О.А. Солошенко, С.А.Чвелёвой. – Протвино, АО «НПО «Турботехника», 2016, 507с. Стр. 298-301.
10. Palaguta, K.A. THE USE OF GENETIC ALGORITHMS FOR CALCULATING THE TRAJECTORY OF THE OBSTACLE DETOUR / K.A. Palaguta, A.A. Alexeev // Information Innovative Technologies: Materials of the International scientific – practical conference. /Ed. Uvaysov S. U., Ivanov I.A. – М.: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2018, 652 p. ISSN 2542-1824, p. 225-229