



УТВЕРЖДАЮ

Ректор

ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ

кандидат технических наук, доцент

В. А. Цепляев

10.06.2025г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет» на диссертационную работу **Волошкина Артёма Александровича** на тему «Методы проектирования и оптимизации автономной робототехнической системы для сбора фруктов», представленную к публичной защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

Актуальность темы диссертационной работы

В области сельского хозяйства многие задачи успешно решаются благодаря использованию робототехнических средств. Эти задачи не ограничиваются только сбором урожая, но также включают автоматизацию процессов, повышение эффективности работы и минимизацию повреждений плодов. Роботизированные системы широко применяются для сбора фруктов, особенно в условиях, где требуется высокая точность и бережное обращение с продукцией. Применение сложных и технологически продвинутых устройств позволяет отнести механический сбор урожая к категории высокотехнологичных решений, внедрение которых в сельскохозяйственную практику, их разработка и производство являются одной из ключевых программ развития агротехники. Создание и использование новых видов роботизированных систем с улучшенными характеристиками прочности механической конструкции, эргономичности и адаптивности к различным условиям представляют собой актуальное и приоритетное направление в механизации сельского хозяйства. В этой связи, тема диссертационной работы Волошкина Артёма Александровича является современной и актуальной и представляет, как теоретический, так и практический интерес.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания Минобрнауки РФ, проект № FZWN-2020-0017.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение и список литературы из 128 источников. Диссертационная работа изложена

на 176 страницах, содержит 10 таблиц, 82 рисунка и 5 приложений. Каждая глава работы заканчивается формулированием выводов, которые соотносятся с задачами проводимых исследований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также дана информация об апробациях результатов проделанной работы, публикациях по теме исследования и основных положениях, выносимых на защиту.

В первой главе выполнен обзор и анализ существующих робототехнических систем для сбора фруктов. Выявлено, что в настоящее время роботизированные системы разделены на массовый и штучный сбор фруктов, при котором широко применяются автоматизация, особенно в условиях, требующих высокой точности и бережного обращения с плодами. Показана целесообразность создания и применения новых типов роботизированных комплексов с высокими показателями структурной прочности, эргономичности и адаптивности к различным условиям. Такие системы могут быть использованы для сбора различных видов плодов и обеспечивать не только захват и отрыв плодов от веток, но и их транспортировку с минимальными повреждениями, что особенно важно для повышения качества продукции и снижения потерь при сборе урожая. Представленный в обзоре метод проектирования РТС соблюдается на протяжении всей работы, доказывая совою целесообразность.

Во второй главе представлена математическая модель автономной робототехнической системы для сбора фруктов, описывающая зависимость положения выходного звена от углов ориентации подвижной платформы, длин приводных штанг и выдвижения телескопического звена с учётом особенностей конструкции робота-трипода с дополнительной центральной кинематической цепью. Определены условия достижимости рабочего пространства, исключая возможные особые положения и пересечения звеньев механизма, с учётом установленных уровней параметрических ограничений, зависящих от компактности конструкции и её функциональной эффективности. Критерий оптимизации сформулирован в виде свёртки двух компонент: первый учитывает минимизацию недостижимых ориентаций платформы при заданных ограничениях на диапазоны движения линейных приводов, второй направлен на снижение габаритов конструкции.

Предложена схема запатентованного захватного устройства для сбора фруктов и описан метод оптимизации его конструктивных параметров. Захватное устройство состоит из внешней и внутренней труб, шагового двигателя, зубчатой передачи, сегментов с пальцами и других элементов. Для определения оптимальных параметров захватного устройства была составлена расчетная схема и проведена оптимизация с использованием генетического алгоритма в среде MATLAB. В результате оптимизации были получены оптимальные значения параметров: радиус закрепления пружины, длина пальца, углы конуса и между пальцем и рычагом кулачка.

Также во второй главе предложен двухэтапный алгоритм технического зрения для определения координат фруктов. На первом этапе используется фронтальная RGB-D камера, установленная на мобильной платформе, которая определяет положение деревьев и фруктов. Нейронная сеть сегментирует кроны деревьев и выявляет фрукты, используя данные глубины. На втором этапе камера, установленная на захватном устройстве, уточняет координаты фруктов с помощью нейронной сети и метода преобразования Хафа. Данные двух камер объединяются с помощью фильтра Калмана для точного позиционирования при сборе.

В третьей главе разработан метод автоматизированного проектирования автономной робототехнической системы для сбора фруктов с использованием CAD/CAE-систем, с помощью которого получена точная параметризованная электронно-цифровая модель системы, обладающая высоким уровнем идентичности с реальным механизмом. Это позволяет автоматизировать процесс проектирования и значительно ускорить его реализацию. Разработана имитационная модель, на основе которой проведен динамический анализ робототехнической системы при заданных траекториях движения. Это позволило получить полное представление о взаимосвязях кинематических и динамических параметров робота-трипода и телескопического звена с захватным устройством. Также были учтены инерционные характеристики, действующие при работе системы, а также рассмотрены силы, возникающие в приводных парах при различных сценариях сбора фруктов. Выявлена необходимость оптимизации конструкции шарнирных соединений и нижней платформы робота-трипода для обеспечения необходимых движений при сохранении установленных кинематических и прочностных характеристик.

Четвертая глава посвящена описанию создания экспериментального образца автономной робототехнической системы для сбора фруктов на базе колесного робота «Scout 2.0» и робота-трипода с телескопическим звеном и захватным устройством. Проведены испытания, подтвердившие работоспособность системы: максимальный наклон платформы, составил $\pm 44^{\circ}08'$, что соответствует данным имитационной модели с расхождением менее 1%. В промышленном саду «БелСад» РТС успешно выполнила навигацию, позиционирование и сбор плодов. Захватное устройство показало высокую скорость сбора. Также проведены эксперименты по локализации деревьев и распознаванию фруктов с использованием технического зрения и LiDAR. Результаты показали, что система способна безопасно обходить препятствия в неструктурированной среде. Разработанная конструкция апробирована в реальных условиях и позволяет комбинировать методы отрывания и скручивания, а также обеспечивать транспортировку и складирование плодов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных соискателем в диссертационной работе, обеспечена строгими математическими выводами, согласованностью с опубликованными результатами научных исследований других авторов, подтверждаются результатами компьютерного моделирования, экспериментальными исследованиями разработанного образца робототехнической системы для сбора фруктов. Достоверность результатов подтверждена высокой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований. Полученные данные имеют высокую воспроизводимость и не противоречат общепринятым данным и работам других авторов.

Научная новизна

Предложена модульная структура робототехнической системы для сбора фруктов, выполненная на базе мобильной колёсной платформы и робота-трипода, в котором для исключения избыточных степеней свободы и повышения управляемости использована пассивная центральная кинематическая цепь с выдвижным телескопическим звеном, а также захватное устройство с гибкой трубой для транспортировки и складирования фруктов; предложена структура и параметризованная модель специального захватного устройства, позволяющего комбинировать методы отрывания и скручивания фруктов за счёт наличия на корпусе винтовой поверхности, по которой перемещается внутренняя труба, имеющая на одном торце пальцы, обеспечивающие захват и отделение фруктов.

Разработана математическая модель кинематики робототехнической системы, описывающая зависимость положения телескопического звена с захватным устройством от углов ориентации подвижной платформы робота-трипода, учитывающая положения шарниров крепления кинематических цепей робота-трипода в виде систем нелинейных уравнений, определяющих ограничения на множество достижимых положений и ориентаций выходного звена и допустимых диапазонов движения линейных приводов.

Синтезирован эвристический алгоритм многокритериальной оптимизации параметров робота-трипода, на первом этапе которого выполняется нормализация критериев, а на втором этапе - итеративная процедура оптимизации на основе однокритериальных эволюционных алгоритмов с использованием свёртки критериев с переменными коэффициентами важности. Использование в качестве критериев компактности конструкции и критерия, зависящего от количества недостижимых ориентаций платформы при заданных ограничениях на диапазоны приводных штанг, позволяет расширить функциональные и эксплуатационные характеристики.

Синтезирован двухэтапный алгоритм технического зрения для локализации деревьев и распознавания фруктов на основе интеграции

нейросетевых алгоритмов и преобразования хафа; на первом этапе алгоритма выполняется формирование списка заданий на основе идентификации крон деревьев, а на втором - актуализация списка заданий на основе идентификации и сегментации плодов с учётом их спелости, что позволяет на основе визуальных данных комбинировать автономную навигацию и идентификацию координат объектов.

Разработан комбинированный метод проектирования робототехнической системы для сбора фруктов, включающий формализацию всех стадий проектирования: создание математических и электронно-цифровых моделей, цифровых двойников, топологическую оптимизацию распределения материала в конструктивных элементах с использованием cad/cae-систем, позволяющий на основе полной динамической и имитационной моделей получить детализированный цифровой двойник робототехнической системы и ее рациональную конструкцию.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Исследование обладает теоретической значимостью, так как направлено на создание методологии проектирования робототехнических систем, предназначенных для сбора фруктов. В ходе работы были разработаны схемы, модели и алгоритмы, а также предложены эффективные подходы к оптимизации геометрических и конструктивных параметров. Кроме того, создано программно-аппаратное обеспечение для построения рабочей области и проведения оптимизации.

Практическая значимость исследования определяется разработкой эффективных методов и стратегий для оптимального проектирования и внедрения новых типов робототехнических систем в агропромышленный комплекс. Эти системы предназначены для автоматизации процесса сбора плодов. Разработан полномасштабный экспериментальный образец робототехнической системы для автоматизированного сбора плодов.

Теоретические результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке бакалавров и магистров по направлению подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» - направленность «Технология машиностроения» и направлению подготовки 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» - направленность «Робототехника и искусственный интеллект». Полученные в диссертационной работе результаты внедрены и используются в проектно-конструкторской и производственной деятельности ООО «РобоКомпонент» (г. Москва)

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Полученные результаты могут быть применены в практике отечественных сельскохозяйственных предприятий, таких как фермерские хозяйства, питомники и промышленные сады. Использование этих разработок позволит расширить возможности автоматизации процессов

сбора урожая, включая работу в сложных условиях и повышение эффективности сбора плодов с минимальными потерями.

Основные публикации, отражающие содержание диссертации

По материалам диссертационной работы Волошкина А.А., опубликовано 22 статьи, в том числе 7 статей в центральных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 15 статей в изданиях, индексируемых базами Web of Science и Scopus, получен 1 патент РФ на изобретение, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Автореферат достаточно полно отражает основные положения, результаты, выводы и содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. На странице 69-70 диссертации указано, что оптимальные конфигурации получены в результате итеративной оптимизации. Однако, в работе не описано, что именно подразумевается под итеративной оптимизацией и как алгоритмически она реализована.

2. На странице 130 упоминается «итеративная нелинейная задача наименьших квадратов», но не раскрывается, почему именно этот метод выбран. Необходимо добавить обоснование.

3. Не ясно, какова величина угла давления в шарнире Д (угол между вектором скорости и нормальной реакцией), ведь он в значительной степени будет влиять на силу трения и работоспособность механизма, показанного на рис. 2.16 (стр.88).

4. В тексте диссертации (раздел 3.4, стр. 115) не раскрыто, вследствие чего в результате моделирования происходит спонтанное колебательное изменение скорости плода на графике рис. 3.20 б) на интервале времени от 1 до 6 секунд.

5. В ходе оптимизации рассмотрено 4 уровня ограничений, однако по результату был выбран вариант с максимальным уровнем ограничений, обеспечивающий максимальную эргономику и технологичность. Неясно зачем было необходимо выполнить анализ других трёх уровней ограничений, если заведомо известно, что они менее эргономичны и технологичны.

6. В разделе про оптимизацию геометрических параметров (Стр. 65) описываются алгоритмы, но не всегда понятно, как они связаны с конкретными задачами исследования.

Несмотря на указанные замечания, работа в целом производит положительное впечатление и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Соответствие диссертации научной специальности

Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы, а именно областям исследований: п. 1. Развитие теоретических основ и

методов анализа, структурного и параметрического синтеза и автоматизированного проектирования роботов и робототехнических систем; п. 4. Математическое и полунатурное моделирование мехатронных и робототехнических систем, включая взаимодействие со средой, анализ их характеристик, оптимизация и синтез по результатам моделирования; п. 11. Методы и средства автоматизированного проектирования, анализа и оптимизации роботизированных систем, комплексов, ячеек и линий. Исследование, повышение эффективности и безопасности эксплуатации автоматизированных технологических процессов, создаваемых на базе робототехнических и мехатронных систем.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Волошкина Артёма «Методы проектирования и оптимизации автономной робототехнической системы для сбора фруктов» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные схемно-технические решения, модели и алгоритмы автономной робототехнической системы для сбора фруктов. Работа обладает научной новизной, теоретической и практической ценностью. Соответствует требованиям п. 9 - 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

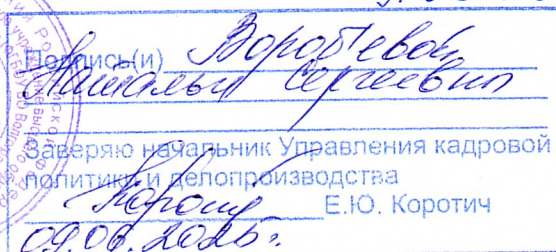
Диссертационная работа, автореферат диссертационной работы и отзыв ведущей организации рассмотрены и одобрены на расширенном заседании кафедры «Механика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет», присутствовало на заседании 20 человек, в том числе 7 докторов наук. Результаты голосования: «за» - 20; «против» - нет; «воздержались» - нет, протокол № 12 от 09.06.2025 г.).

Председатель заседания, доктор технических наук (специальность 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы), доцент, заведующий кафедрой «Механика» ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ

Н.С. Воробьева

Н.С. Воробьева

09.06.2025г.



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ).

Адрес: 400002, Волгоградская область, г. Волгоград, проспект Университетский, 26, телефон: +7 (8442) 41-17-84, факс: +7 (8442) 41-10-85, электронная почта: volgau@volgau.com, официальный сайт организации: <https://volgau.com>.