



РАЗЗАМАЗОВ НИКИТА ИВАНОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ
МАШИНЫ С АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ РАБОЧИМИ
ОРГАНАМИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ В ПЛОДОПИТОМНИКАХ**

Специальность: 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Сороченко Сергей Федорович

Официальные оппоненты: **Егожев Артур Мухамедович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова», кафедра «Техническая механика и физика», заведующий кафедрой

Хорт Дмитрий Олегович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», лаборатория машинных технологий для возделывания и уборки плодовых и ягодных культур, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный аграрный университет»

Защита состоится «10» декабря 2026 г. в 14 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 24.1.211.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук по адресу: 630501, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, ул. Центральная, зд. 7, а/я 463, тел./факс: +7 (383) 348-12-09, e-mail: sibime@sfscs.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Сибирской научной сельскохозяйственной библиотеки, автореферат и диссертация размещены на сайтах: <https://www.sfscs.ru>, <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Отзыв на автореферат, оформленный установленным порядком, просим направлять по указанному адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета и e-mail: ds24121101@sfscs.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Иванников Алексей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Обработка почвы в плодопитомниках – одна из важнейших операций при возделывании плодовых и плодово-ягодных культур. Её выполнение приводит к накоплению и сохранению влаги в почве, благоприятным воздушному и тепловому режимам, улучшению деятельности почвенных микроорганизмов, очищению почв от сорных растений, которые конкурируют с культурными растениями за питательные вещества и снижают уровень их освещённости.

По состоянию на апрель 2026 года, в Ассоциации производителей посадочного материала насчитывается 193 питомника, из которых 164 занимаются выращиванием плодовых деревьев, ягодных кустарников, земляники садовой и материала для доращивания. По данным Росстата за 2025 год, в Российской Федерации площади садов и ягодников, в которых выращивают плодовые и плодово-ягодные культуры, занимают 434,2 тысячи гектаров (без учёта статистической информации по Донецкой и Луганской Народным Республикам, Запорожской и Херсонской областям).

Одна из проблем производителей посадочного материала плодовых и плодово-ягодных культур – преобладание ручного труда при обработке почвы в приствольных зонах культурных растений, характеризующегося высокой трудоёмкостью для рабочего персонала и низкой производительностью. Также при недостаточном уровне механизации в ряде случаев представляется затруднительным соблюсти необходимые сроки выполнения технологических операций по уходу за посадочным материалом, что впоследствии негативно отражается на количестве и качестве получаемой сельскохозяйственным предприятием продукции. Стоит отметить, что механизация обработки почвы в плодопитомниках без сопутствующей ей автоматизации имеет ряд недостатков: отсутствие комфортных условий труда оператора, отсутствие достаточного обзора рабочей зоны и, как следствие, наличие повреждений культурных растений, являющееся недопустимым. Проблема осложняется дефицитом кадров в сельском хозяйстве.

В связи с вышеизложенным, автоматизация обработки приствольной полосы в плодопитомниках представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Научные исследования проводились в период с 2020 по 2026 гг. в ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ) по тематике следующих НИОКР: «Разработка машины модульного типа с автоматизированной системой управления рабочими органами для приствольной обработки почвы в плодопитомниках» в рамках исполнения обязательств по договору № 16055ГУ/2020 от 24.12.2020 г. по программе «УМНИК» и «Машина с автоматической системой управления рабочими органами для междурядной и приствольной обработки почвы» в рамках исполнения обязательств по договору № 2262ГССС15-L/90164 от 01.11.2023 г. по программе «Студенческий стартап» между Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере и диссертантом; «Разработка машины с автоматической системой управления рабочими органами для обработки почвы» в рамках исполнения обязательств по договору № 25-24 от 02.02.2024 г. и «Испытание машины с автоматической системой управления рабочими органами для обработки почвы» в рамках исполнения обязательств по договору № 72-25 от 16.07.2025 г. между ООО «Техновызов» и АлтГТУ.

Научное исследование соответствует:

- Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утверждённой Указом Президента от 28.02.2024 № 145;
- приоритетным направлениям научно-технологического развития «Высокопродуктивное и устойчивое к изменениям природной среды сельское хозяйство» и «Адаптация к изменениям климата, сохранение и рациональное использование природных ресурсов».

Степень разработанности темы исследований. Научной основой для совершенствования существующих и разработки новых технических средств, а также комплексов машин по уходу за междурядьями и приствольными зонами плодовых насаждений, проведения исследований взаи-

модействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и машин по уходу за посадочным материалом с почвой и в области автоматизации процессов и распознавания объектов в растениеводстве являются работы коллективов учёных Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Мичуринского государственного аграрного университета, Всероссийского научно-исследовательского института садоводства им. И. В. Мичурина, Федерального научного селекционно-технологического центра садоводства и питомниководства и таких исследователей, как Ф. Е. Аниферов, П. В. Бондарев, С. М. Борисова, В. Г. Бросалин, В. В. Бычков, В. П. Горячкин, С. М. Джибилов, А. И. Дышеков, А. М. Егожев, А. А. Завражных, А. И. Завражных, В. А. Зубина, А. Г. Иванов, А. Ю. Измайлов, Г. И. Кадыкало, А. И. Кутырёв, Р. М. Латыпов, М. Н. Летошнев, А. Б. Лурье, К. А. Манаенков, Д. М. Недогреев, В. Н. Ожерельев, М. В. Ожерельева, И. М. Панов, Е. А. Перепелкин, П. М. Подолько, Е. А. Полищук, А. В. Пономарев, М. В. Сабликов, В. Г. Свиридов, С. М. Сидоренко, Г. Н. Синееков, И. Г. Смирнов, М. П. Смирнов, С. Ф. Сороченко, Е. И. Трубилин, Б. Г. Турбин, И. А. Успенский, Ю. А. Утков, И. М. Фархутдинов, А. Л. Хажметова, В. М. Халанский, В. В. Хатунцев, Д. О. Хорт, А. А. Цымбал, В. А. Шевкун, Т. Гуцол, Н. А. Киктев, В. В. Шевчук, М. Biliuk, X. P. Burgos-Artizzu, R. Gottschalk, M. Jewiarz, Á.S. Miralles, G. Pajares, A. Ribeiro, M. Tomasik и др.

Несмотря на значительный вклад отечественных и зарубежных исследователей в указанных областях, до настоящего времени остаётся недостаточно изученной проблема автоматизации обработки приствольной полосы в плодопитомниках с учётом взаимного расположения рабочих органов технического средства для обработки почвы и культурных растений.

Цель исследования – повышение эффективности работы машины для обработки почвы в плодопитомниках за счёт автоматизации управления рабочими органами при обработке приствольной полосы.

Задачи исследования:

1. Разработать принципиальную схему машины с автоматизированным управлением рабочими органами для обработки приствольной полосы.
2. Разработать математические модели, описывающие процесс взаимодействия бесприводного ротационного рабочего органа с почвой и процесс подачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы машины при автоматизированном управлении рабочими органами.
3. Обосновать конструктивно-технологическую схему и установить параметры и режимы работы машины с автоматизированным управлением рабочими органами для обработки почвы в плодопитомниках.
4. Провести испытания машины и выполнить экономическую оценку основных результатов исследования.

Рабочая гипотеза: автоматизация управления рабочими органами при обработке приствольной полосы позволяет достичь повышения эффективности работы машины для обработки почвы в плодопитомниках.

Объект исследования – технологический процесс обработки почвы в плодопитомниках; автоматизация обработки приствольной полосы.

Предмет исследования – закономерности технологического процесса обработки почвы в плодопитомниках; конструктивные решения, параметры и режимы работы машины с автоматизированным управлением рабочими органами для обработки почвы в плодопитомниках.

Методы исследования. Теоретические исследования проведены с использованием законов евклидовой геометрии, математического анализа, методов теоретической механики и сопротивления материалов, элементов теории автоматического управления. Обработка данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, осуществлена с использованием методов математической статистики, аппроксимации и интерполяции кривых.

Использованные программные продукты. В ходе выполнения исследования использованы следующие программные продукты: КОМПАС-3D, MathCAD, Microsoft Excel, а также среды разработки Arduino IDE, Visual Studio Code, PyCharm.

Научную новизну работы составляют:

- математическая модель процесса взаимодействия бесприводного ротационного рабочего органа с почвой, учитывающая совмещение его поперечного перемещения с продольным;
- математическая модель процесса подачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы машины при автоматизированном управлении рабочими органами, учитывающая задержку подачи этих управляющих воздействий;
- экспериментальные зависимости параметров, характеризующих задержку подачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы машины, от рабочей скорости машины.

Новизна разработанных конструктивно-технологических решений подтверждена патентами на изобретения № 2767791, 2806588, 2814021, 2821886, 2851360. Новизна программ управления рабочими органами подтверждена свидетельствами о государственной регистрации № 2023684665, 2025690127. Совокупность достигнутых научных результатов формирует научно обоснованную концепцию автоматизированного управления рабочими органами машины для обработки почвы в плодопитомниках, основанную на бесконтактном распознавании культурных растений и формировании управляющих воздействий с учётом их защитной зоны.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическую значимость работы составляют: принципиальная схема машины с автоматизированным управлением рабочими органами для обработки приствольной полосы; структурная схема и алгоритм работы автоматизированной системы управления рабочими органами для обработки приствольной полосы; математические модели процесса взаимодействия бесприводного ротационного рабочего органа с почвой и процесса подачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы машины при автоматизированном управлении рабочими органами. Практическую значимость работы составляют: конструктивно-технологическая схема машины с автоматизированным управлением рабочими органами для обработки почвы в плодопитомниках; программно-аппаратный комплекс, реализующий автоматизированную систему управления рабочими органами; параметры и режимы работы машины; экономическая оценка основных результатов исследования.

Реализация результатов исследований. Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» и в производственную деятельность ООО «Чуклин инжиниринг». Право использования патента на изобретение № 2767791 «Машина для междурядной и приствольной обработки почвы» предоставлено ООО «Алтайский завод автотракторного спецоборудования».

На защиту выносятся следующие основные положения:

- математические модели процесса взаимодействия бесприводного ротационного рабочего органа с почвой и процесса подачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы машины при автоматизированном управлении рабочими органами;
- конструктивно-технологическая схема машины с автоматизированным управлением рабочими органами для обработки почвы в плодопитомниках;
- результаты экспериментальных исследований по определению: точности позиционирования; максимальной допустимой рабочей скорости машины; зависимостей между параметрами, характеризующими задержку подачи соответствующего управляющего воздействия на исполнительный механизм, и рабочей скоростью машины; режимов работы машины.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность полученных результатов подтверждается тем, что экспериментальные исследования проведены с использованием современной контрольно-измерительной и вычислительной техники в соответствии с методиками, изложенными в действующих государственных стандартах, и с методиками, разработанными в ходе

выполнения работы, с достаточным количеством опытов и последующей статистической обработкой полученных данных. Результаты экспериментальных исследований подтверждают результаты теоретических. Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты согласуются с данными, представленными ранее другими авторами по данной тематике.

В ходе исследований разработаны и изготовлены лабораторные установки и опытный образец машины, который был представлен на выставках разработок подразделений Инжинирингового центра «ХимБиоМаш» и Студенческого конструкторского бюро АлтГТУ (СКБ АлтГТУ).

Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и отмечены наградами на следующих мероприятиях: городские научно-практические конференции молодых учёных «Молодёжь-Барнаулу» (г. Барнаул, 2020, 2022, 2023 гг.); всероссийские научно-технические конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука и молодёжь» (г. Барнаул, 2020, 2022–2025 гг.); стартап-сессии технологических предпринимателей «НТИ-ALTAI» (г. Барнаул, 2020, 2023 гг.); Российский Научный Конкурс Фонда Андрея Мельниченко (г. Барнаул, 2021 г.; г. Кемерово, 2022 г.); 31-й Международная агропромышленная выставка «АГРОРУСЬ» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); VI конкурс на соискание Национальной премии имени Александра Александровича Ежовского (2022 г.); конкурс бизнес-идей, научно-технических разработок и научно-исследовательских проектов под девизом «Молодые, дерзкие, перспективные» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); конкурс стипендиальной программы «Система» (2023 г.); III Всероссийская научно-практическая конференция «Современные цифровые технологии» (г. Барнаул, 2024 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы автомобильного транспорта и наземных технологических систем» (г. Барнаул, 2025 г.). Достигнута договорённость о сотрудничестве по теме настоящего исследования с Научно-исследовательским институтом садоводства Сибири им. М. А. Лисавенко (НИИСС им. М. А. Лисавенко).

Вклад автора. Диссертантом проведен анализ состояния вопроса обработки почвы в плодотопитниках, по результатам которого в соответствии с поставленной целью исследования определены задачи исследования; разработаны математические модели процесса взаимодействия бесприводного ротационного рабочего органа с почвой и процесса подачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы машины при автоматизированном управлении рабочими органами; установлены параметры и режимы работы машины; выполнена экономическая оценка основных результатов исследования. Автор принимал участие в разработке принципиальной и конструктивно-технологической схем машины, структурной схемы и алгоритма работы автоматизированной системы управления рабочими органами, программ для электронной вычислительной машины (ЭВМ), лабораторных установок и опытного образца машины, проведении экспериментальных исследований. Доля личного вклада автора в получение теоретических и практических результатов исследований, в том числе в представленных опубликованных работах, составляет 80 %.

Публикации. По теме исследования опубликована 21 работа, из которых пять научных статей – в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования РФ, пять патентов РФ на изобретение, два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Общий объём публикаций составляет 8,38 печатных листов, в том числе личный вклад диссертанта – 6,70 печатных листа.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка условных обозначений и сокращений, списка терминов, списка литературы и 15 приложений, содержит 280 страниц машинописного текста, в том числе 79 рисунков и 24 таблицы. Список литературы включает 193 наименования литературных источников, в т. ч. 17 источников на иностранных языках.

Соответствие работы паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса по пунктам направлений исследований 2, 3, 4, 5, 12, 15.

Благодарственное слово. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю Сергею Фёдоровичу Сороченко, коллективу СКБ АлтГТУ, коллективу ООО «Интертех», доктору сельскохозяйственных наук Николаю Анатольевичу Колпакову, кандидату экономических наук Ольге Борисовне Дроновой, заведующему научно-библиографическим отделом АлтГТУ Галине Витальевне Глушковой, коллективу студентов и выпускников АлтГТУ и АГУ, семье и друзьям за содействие, помощь и поддержку, оказанные при проведении диссертационного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, показаны степень разработанности темы исследования, связь со Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации и Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации, представлены цель и задачи исследования, сформулирована рабочая гипотеза, определены объект, предмет и методы исследования, представлены использованные программные продукты, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описана реализация результатов исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, показаны степень достоверности и апробация работы, описан вклад автора, представлены сведения о публикациях по теме исследования, структуре и объёме диссертации, показано соответствие работы паспорту научной специальности.

В первой главе «Состояние вопроса обработки почвы в плодопитомниках» приведено описание технологических процессов при производстве посадочного материала плодовых и плодово-ягодных культур в плодопитомниках. В настоящем исследовании рассмотрен период возделывания культурных растений в плодопитомнике с момента их посадки до выкопки, в ходе которого происходит уход за посадочным материалом. Представлены агротехнические требования, предъявляемые к машинам для обработки почвы в плодопитомниках.

Анализ состояния вопроса обработки почвы в плодопитомниках, включающий анализ технических средств и способов обработки почвы, научных исследований в области взаимодействия рабочих органов с почвой и в области автоматизации процессов и распознавания объектов, показал, что существующие технические средства и способы автоматизации процессов позволяют решать отдельные задачи обработки почвы и распознавания объектов, однако отсутствуют комплексные решения, обеспечивающие автоматизированное управление рабочими органами для обработки приствольной полосы в плодопитомниках с учётом взаимного расположения рабочих органов и защитных зон культурных растений.

По результатам проведённого анализа предложена классификация машин для обработки почвы в плодопитомниках, в соответствии с поставленной целью исследования определены задачи исследования.

Во второй главе «Теоретические исследования машины для обработки почвы в плодопитомниках» разработаны принципиальная схема машины с автоматизированным управлением рабочими органами для обработки приствольной полосы, структурная схема и алгоритм работы автоматизированной системы управления рабочими органами (АСУ), разработаны математические модели процесса взаимодействия бесприводного ротационного рабочего органа с почвой и процесса подачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы машины при

автоматизированном управлении рабочими органами, определены параметры машины и выполнен их расчёт согласно конструктивно-технологической схеме, основанной на принципиальной схеме машины.

Обработку приствольной полосы шириной $B_{\text{пол}}$ производят два бесприводных ротационных рабочих органа, каждый из которых обеспечивает рыхление почвы и вычёсывание сорняков в сторону от ряда закреплёнными на диске 1 (рисунок 1) по его периметру пальцами 2, заглублёнными в почву на глубину обработки h . Рыхление почвы и вычёсывание сорняков достигается вращением диска 1, происходящим за счёт его установки под углом ε к вертикали. Рабочие органы размещены на поворотных рамках 3, шарнирно присоединённых к корпусу 4. Рабочие органы, поворотные рамки 3 и корпус 4 образуют модуль, который установлен на раме машины 5 с одной степенью свободы, заключающейся в возможности перемещения в поперечном направлении. Машина снабжена двумя приводными устройствами 6 и 7, обеспечивающими движение рабочих органов относительно рамы 5: приводное устройство 6 предназначено для перемещения модуля в поперечном направлении, выполняемого при наличии смещения культурных растений ΔY , отличного от нуля; приводное устройство 7 – для сведения и разведения поворотных рамок 3 и, как следствие, рабочих органов, выполняемых для огибания защитной зоны культурного растения.

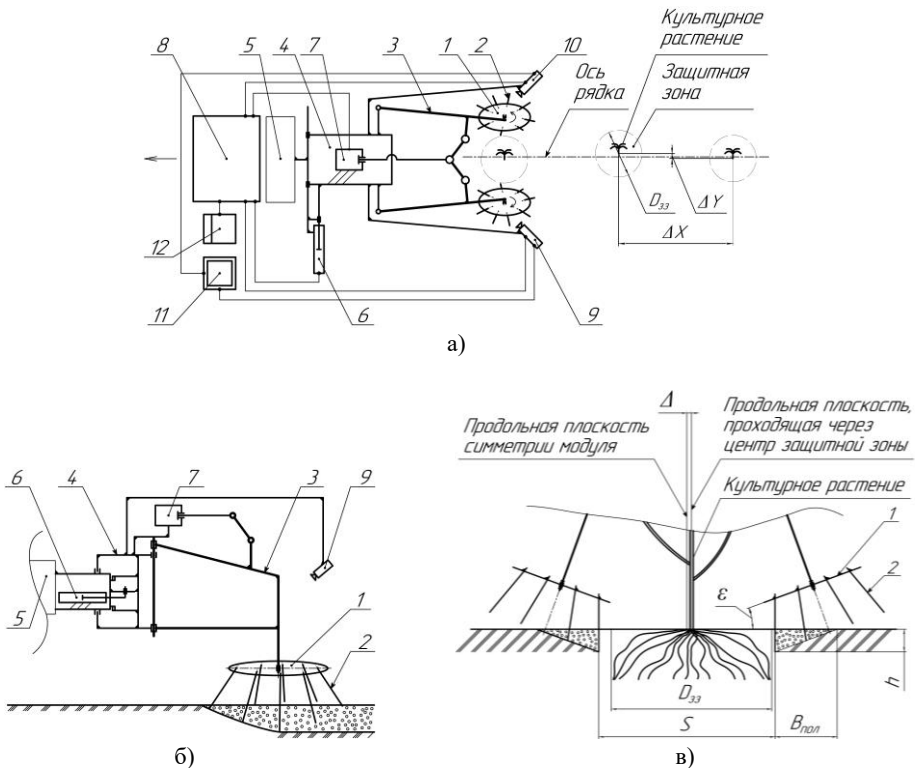


Рисунок 1 – Принципиальная схема машины с автоматизированным управлением рабочими органами для обработки приствольной полосы: а) вид сверху; б) вид слева; в) схема расположения рабочих органов относительно защитной зоны при её огибании (расшифровка позиций в тексте)

Управление положением рабочих органов происходит при помощи АСУ, которая включает подсистемы: управления положением модуля, управления положением рабочих органов друг относительно друга и бесконтактного распознавания культурного растения. Первую подсистему составляют контроллер 8 и приводное устройство 6; вторую – контроллер 8 и приводное устройство 7; третью – контроллер 8 и видеокамеры 9, 10.

Принцип работы системы основан на обработке контроллером 8 получаемых с видеокамер 9, 10 видеоизображений, в результате которой осуществляются: выявление цветового идентификатора культурного растения; расчёт количества сигналов шага модуля, которые необходимо подать на приводное устройство 6 таким образом, чтобы значение отклонения модуля от культурного растения Δ находилось в допустимом диапазоне, при этом при отсутствии культурного растения в поле зрения по крайней мере одной из видеокамер 9, 10 происходит перемещение модуля в центральное положение; контроль достижения критического значения положения модуля относительно i -го культурного растения в продольной плоскости, после которого контроллер 8 подаёт сигналы на приводное устройство 7: разведения рабочих органов до достижения рабочего зазора S , превышающего диаметр защитной зоны D_{33} ; удержания рабочего зазора S ; сведения рабочих органов, в случае если продольные расстояния от модуля до i -го и $(i+1)$ -ого культурных растений являются достаточными (в зависимости от соотношения между геометрическими параметрами рабочего органа и шага культурных растений ΔX).

Также в машине предусмотрена возможность переключения на режим ручного управления, осуществляемого при помощи элементов управления оператора: дисплея 11, на который с видеокамер 9, 10 поступают видеоизображения, и управляющего устройства 12, соединённого с контроллером 8.

Таким образом, машина представляет собой мехатронную систему, включающую механическую подсистему с рабочими органами и исполнительными механизмами, измерительную подсистему и АСУ.

Установлен критерий работоспособности машины в виде системы выражений:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 < S_{min} \leq S(t) \leq S_{max}^{D_{33}} = D_{33} + S_0, \\ S_0 = 2\Delta, \\ r_{лев}(t) \geq 0, \\ r_{пр}(t) \geq 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где S_{min} , $S_{max}^{D_{33}}$ – минимальный и максимальный при диаметре защитной зоны D_{33} рабочие зазоры соответственно; t – время; S_0 – точность позиционирования; $r_{лев}$, $r_{пр}$ – расстояния между траекторией вращения пальцев левого рабочего органа и границей защитной зоны, между траекторией вращения пальцев правого рабочего органа и границей защитной зоны соответственно.

Согласно принципиальной схеме машины (см. рисунок 1), схеме обработки приствольной полосы одного ряда (рисунок 2) и схеме движения левого рабочего органа (рисунок 3) установлены аналитические зависимости, позволяющие определить конструктивно-технологические и кинематические параметры машины (таблица 1). Введённые обозначения: R – радиус рабочего органа; R_{33} – радиус защитной зоны; V – скорость рабочего органа при огибании защитной зоны; V_X – рабочая скорость машины; $Y_{мод\max}$ – максимальное отклонение модуля от оси ряда; $y'_{ро\max}$ – максимальное значение координаты $y'_{ро}$ в системе координат эллипса, являющегося горизонтальной проекцией рабочего органа при разведённом состоянии рабочих органов; α – угол поворота рамки.

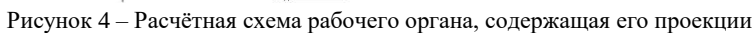
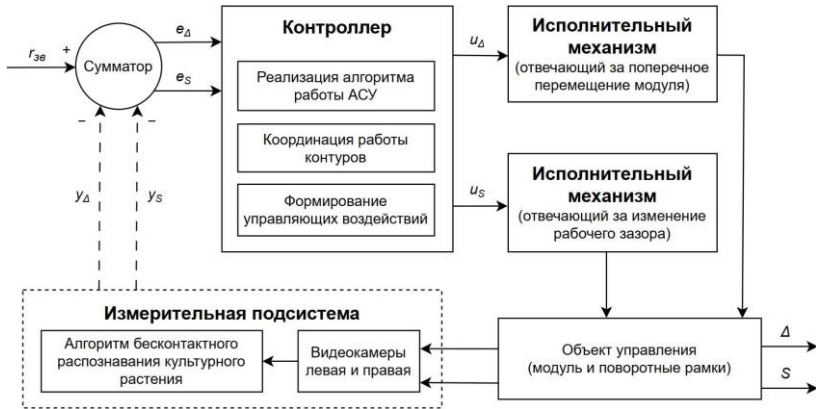


Таблица 2 – Аналитические зависимости, позволяющие определить силовые параметры машины

Параметр	Выражение для определения
Сила сопротивления почвы, действующая на палец	$P_n = \begin{cases} d_n \cdot (h - R \cdot (\sin \varepsilon - \cos \theta \cdot \operatorname{tg} \varepsilon)) \cdot \sin \gamma \cdot \sqrt{\sin^2 \theta + \left(\frac{\cos \theta}{\cos \varepsilon}\right)^2 + ctg^2 \gamma} \times \\ \times (H + \tau + \rho \cdot f \cdot \pi \cdot (V_X^2 \cdot ((\sin \varepsilon - \cos \theta)^2 + (\sin \varepsilon \cdot \sin \theta)^2) + \\ + 2 \cdot V_X \cdot V_{\text{мод}Y} \cdot \cos \varepsilon \cdot \sin \theta + V_{\text{мод}Y}^2)) \cdot \frac{1}{\cos \gamma \cdot \cos \varepsilon + \sin \gamma \cdot \operatorname{tg} \varepsilon \cdot \cos \theta} \\ \text{при } \theta \in \left[-\arccos\left(1 - \frac{h}{R \cdot \sin \varepsilon}\right); 0\right], \\ \\ d_n \cdot (h - R \cdot (\sin \varepsilon - \cos \theta \cdot \operatorname{tg} \varepsilon)) \cdot \sin \gamma \cdot \sqrt{\sin^2 \theta + \left(\frac{\cos \theta}{\cos \varepsilon}\right)^2 + ctg^2 \gamma} \times \\ \times (\tau + \rho \cdot f \cdot \pi \cdot (V_X^2 \cdot ((\sin \varepsilon - \cos \theta)^2 + (\sin \varepsilon \cdot \sin \theta)^2) + \\ + 2 \cdot V_X \cdot V_{\text{мод}Y} \cdot \cos \varepsilon \cdot \sin \theta + V_{\text{мод}Y}^2)) \cdot \frac{1}{\cos \gamma \cdot \cos \varepsilon + \sin \gamma \cdot \operatorname{tg} \varepsilon \cdot \cos \theta} \\ \text{при } \theta \in \left(0; \arccos\left(1 - \frac{h}{R \cdot \sin \varepsilon}\right)\right], \\ \\ 0 \\ \text{при } \theta \in \left(\arccos\left(1 - \frac{h}{R \cdot \sin \varepsilon}\right); 2\pi - \arccos\left(1 - \frac{h}{R \cdot \sin \varepsilon}\right)\right) \end{cases} \quad (6)$
Продольная и поперечная силы сопротивления почвы, действующие на рабочие органы модуля, соответственно	$P_{\text{мод}X} = n_{\text{ро}} \cdot \sum_{j=1}^c P_{\text{н}X} \left(\theta + \frac{(j-1) \cdot 2\pi}{c} \right), \quad (7)$ $P_{\text{мод}Y} = n_{\text{ро}} \cdot \sum_{j=1}^c P_{\text{н}Y} \left(\theta + \frac{(j-1) \cdot 2\pi}{c} \right) \quad (8)$
Сила сопротивления движению машины	$R_m = n_{\text{мод}} \cdot n_{\text{ро}} \cdot \left(\sum_{j=1}^c P_{\text{н}X} \left(\theta + \frac{(j-1) \cdot 2\pi}{c} \right) + k \cdot S_{\text{пл}} \right) + f_{\text{сп}} \cdot m \cdot g \quad (9)$
Примечание – $P_{\text{н}X}$, $P_{\text{н}Y}$ – продольная и поперечная составляющие силы сопротивления почвы, действующей на палец, соответственно	

Автоматизированная система управления, реализуемая в разработанной машине, представляет собой двухконтурную многоканальную замкнутую систему автоматического управления (рисунок 5). Регулируемыми координатами системы являются отклонение модуля от культурного растения Δ и рабочий зазор S . Задающее воздействие формируется в соответствии с критерием работоспособности машины. Измерительная подсистема включает измерительное устройство и алгоритм бесконтактного распознавания культурного растения, основанный на методе компьютерного стереозрения. Два взаимосвязанных контура автоматического регулирования используют общие измерительную подсистему и контроллер. Первый канал управления реализует контур автоматического регулирования отклонения модуля от культурного растения. Второй канал управления реализует контур автоматического регулирования рабочего зазора. Управление осуществляется по принципу минимизации ошибки регулирования каждой из регулируемых координат. Координация работы контуров и реализация алгоритма работы АСУ осуществляются контроллером, обеспечивающим синхронизацию процессов распознавания культурного растения, позиционирования модуля и изменения положения рабочих органов друг относительно друга.

Основными действиями и функциями алгоритма работы системы являются: подготовка, запуск и обработка системы, передача видеоизображений с видеоканера на дисплей. В подготовку системы входят настройки подсистем управления положением модуля, управления положением рабочих органов друг относительно друга, бесконтактного распознавания культурного растения и запись данных, полученных в ходе настроек, на запоминающее устройство с последующим их считыванием. Действия, выполняемые в ходе обработки системы: получение контроллером видеоизображений с видеоканера; обработка видеоизображений с последующим выявлением цветового идентификатора; поперечное перемещение модуля; разведение и сведение рабочих органов.



e – ошибка регулирования; $r_{зв}$ – задающее воздействие; S – рабочий зазор; u – управляющее воздействие; y – сигнал измерительной информации; Δ – отклонение модуля от культурного растения; индексами Δ и S обозначена принадлежность соответствующей величины к каналу автоматического регулирования отклонения модуля от культурного растения и к каналу автоматического регулирования рабочего зазора соответственно; стрелками со сплошной линией обозначены прямые связи; стрелками со штриховой линией обозначена отрицательная обратная связь

Рисунок 5 – Структурная схема АСУ для обработки приствольной полосы

Выдвинуто предположение, что вид зависимостей между параметрами, характеризующими задержку подачи управляющего воздействия (время задержки подачи управляющего воздействия на поперечное перемещение модуля относительно распознанного культурного растения $t_3^{\text{мод}}$, время задержки подачи управляющего воздействия на перемещение модуля в центральное положение $t_3^{\text{ц}}$, время задержки подачи управляющего воздействия на разведение рабочих органов $t_3^{\text{р}}$ и время задержки подачи управляющего воздействия на сведение рабочих органов $t_3^{\text{с}}$), и рабочей скоростью машины V_X – степенной. Предположение подтверждено в ходе экспериментальных исследований, и получены выражения, позволяющие определить указанные параметры (с. 17).

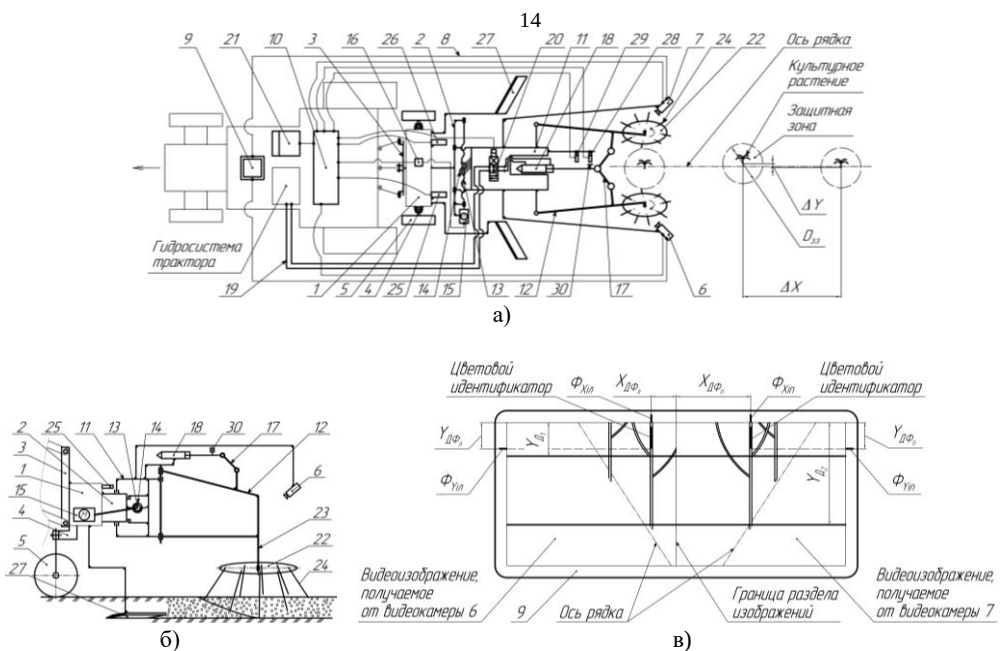
Таким образом, разработаны математические модели:

- процесса взаимодействия бесприводного ротационного рабочего органа с почвой, учитывающая совмещение его поперечного перемещения с продольным и описывающая взаимосвязь конструктивно-технологических, кинематических и силовых параметров машины;

- процесса подачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы машины при автоматизированном управлении рабочими органами, учитывающая задержку подачи этих управляющих воздействий и описывающая взаимосвязь параметров, характеризующих эту задержку, и рабочей скорости машины.

Обоснована конструктивно-технологическая схема машины с автоматизированным управлением рабочими органами для обработки почвы в плодопитомниках (рисунок 6), основанная на принципиальной схеме машины.

Согласно данной схеме и ранее полученным аналитическим зависимостям выполнен расчёт параметров машины с учётом значений параметров посадок, определённых по результатам измерений, проведённых в плодопитомнике № 3 (таблица 3), при $\varepsilon = 20^\circ$, $\gamma = 25^\circ$, $S_{\text{зз}}^{\text{р}} = 220$ мм, $S_{\text{мин}} = 5$ мм, $d = 365$ мм, $d_{\text{п}} = 12$ мм, $c = 8$, $n_{\text{р0}} = 2$, $V_X = 1,5$ км/ч, $h = 80$ мм, $\rho = 1\,100$ кг/м³, $f = 0,5$, $H = 50$ кПа, $\tau = 20$ кПа, согласно которому: $Y_{\text{рд}} = 20,2$ см, $R_{\text{р}} = 300$ мм (при котором $\alpha = 15,8^\circ$), $B_{\text{пол}} = 220$ мм, угол конусности конца пальца $\alpha_{\text{к}} = 50^\circ$, $V_{\text{моду}} = 0,2$ м/с, $t_3^{\text{мод}} = t_3^{\text{р}} = 5,41$ мс, $t_3^{\text{ц}} = t_3^{\text{с}} = 27,28$ мс, $P_{\text{моду}}^{\text{хmax}} = 275,06$ Н, $P_{\text{моду}}^{\text{уmax}} = 80,04$ Н.



1 – рама; 2 – поперечная балка; 3 – навесное устройство; 4 – кронштейны; 5 – опорное колесо; 6, 7 – левая и правая видеокамеры соответственно; 8 – электропровод; 9 – дисплей; 10 – корпус; 11 – поворотная рамка; 12 – винт; 13 – гайка; 14 – шаговый двигатель; 15 – драйвер; 16 – тяга; 17 – гидроцилиндр; 18 – трубопровод; 19 – электрогидроаспределитель; 20 – контроллер; 21 – управляющее устройство; 22 – диск; 23 – ось; 24 – палец; 25, 26 – ограничитель перемещения модуля; 27 – полостьная лапа; 28, 29 – ограничитель перемещения штока гидроцилиндра 17; 30 – возбудитель ограничителей перемещения 28, 29; $\Phi_{X_{il}}$, $\Phi_{X_{in}}$, $\Phi_{Y_{il}}$, $\Phi_{Y_{in}}$ – флажки, которыми контроллер помечает цветовой идентификатор на видеоизображениях; $X_{д\Phi_{il}}$, $X_{д\Phi_{in}}$, $Y_{д\Phi_{il}}$, $Y_{д\Phi_{in}}$ – координаты соответствующих флажков Φ_i ; $Y_{дв}$, $Y_{дн}$ – верхнее и нижнее критические значения координаты Φ_{Yi} соответственно

Рисунок 6 – Конструктивно-технологическая схема машины с автоматизированным управлением рабочими органами для обработки почвы: а) вид сверху; б) вид слева; в) дисплей с видеоизображениями, получаемыми от видеокамер

В третьей главе «Экспериментальные исследования машины для обработки почвы в плодопитомниках» представлена программа экспериментальных исследований машины, включающая измерения параметров посадок в плодопитомниках, лабораторное исследование машины с ручной электрифицированной системой управления рабочими органами, лабораторное исследование машины с автоматизированным управлением и лабораторно-полевое исследование опытного образца машины. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Измерения параметров посадок определяли в трёх плодопитомниках Алтайского края. В плодопитомнике № 1 измерения проводили на посадках вишни, выполненных вручную в щели, образованные щелеобразователем с бесприводными рабочими органами. В плодопитомниках № 2 и № 3 измерения проводили на посадках чёрной смородины и жимолости соответственно. Для образования щелей в этих плодопитомниках использовали четырёхрядный роторный щелеобразователь, разработанный коллективом СКБ АлтГТУ, а посадку культурных растений так же, как и в плодопитомнике № 1, выполняли вручную. Результаты выполненных измерений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты измерений параметров посадок в плодопитомниках Алтайского края, см

Параметр	Значение для плодопитомника № 1	Значение для плодопитомника № 2	Значение для плодопитомника № 3
Доверительный интервал отклонения культурного растения $Y_{кр}$	(–18,1; 18,1)	(–8,9; 9,6)	(–9,8; 10,1)
Доверительный интервал смещения культурных растений ΔY	(–16,3; 15,3)	(–6,2; 6,1)	(–6,1; 6,6)
Средний шаг культурных растений $\Delta X_{ср}$	15,0	13,6	13,7

При проведении лабораторных исследований машины использованы лабораторные установки – имитатор рядка и имитатор модуля машины – и опытный образец машины.

Имитатор рядка (рисунок 7) содержит раму 1, на которой закреплены корпусные подшипники 2, натяжные устройства 3 и мотор-редуктор 4. На подшипниках 2 установлены приводной 5 и натяжной 6 барабаны, которые обхватываются транспортёрной лентой 7, содержащей планки 8, предназначенные для закрепления имитаторов культурного растения 9, каждый из которых при проведении лабораторных исследований представлял собой пластмассовую трубочку с размещённым на ней кусочком изолянта красного цвета, выполняющим роль цветового идентификатора.

Имитатор модуля машины (рисунок 8) состоит из рамы 1, содержащей поперечную балку 2. На раме 1 закреплены шаговый двигатель 3, полиамидные пластины 4 и корпусные подшипники 5, на которых установлен винт шарико-винтовой передачи (ШВП) 6, соединённый посредством упругой муфты 7 с выходным валом шагового двигателя 3. Гайка ШВП 8 жёстко соединена с корпусом 9, на котором закреплены имитаторы рамки 10 с установленными на них имитаторами рабочего органа 11, полиамидные пластины 12 и роликовая опора 13. Имитаторы рабочего органа 11 представляют собой пластины, зазор $S_{\text{лаб}}$ между которыми регулируется посредством изменения сопрягаемых отверстий в имитаторах рамок 10 и в пластинах 11. Полиамидные пластины 4 и полиамидные пластины 12 контактируют друг с другом, а роликовая опора 13 контактирует с рамой 1, что обеспечивает линейное перемещение корпуса 9 вдоль балки 2.

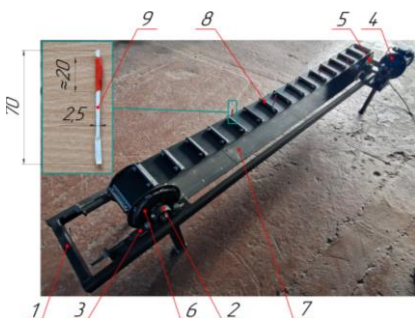


Рисунок 7 – Имитатор рядка
(расшифровка позиций в тексте)

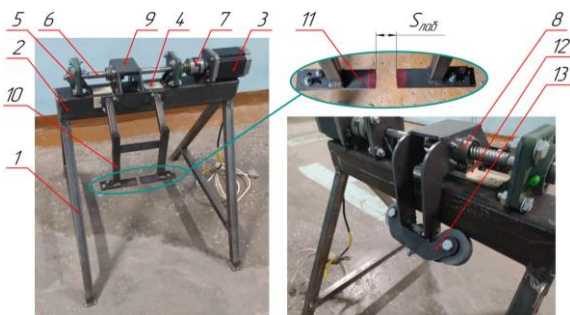
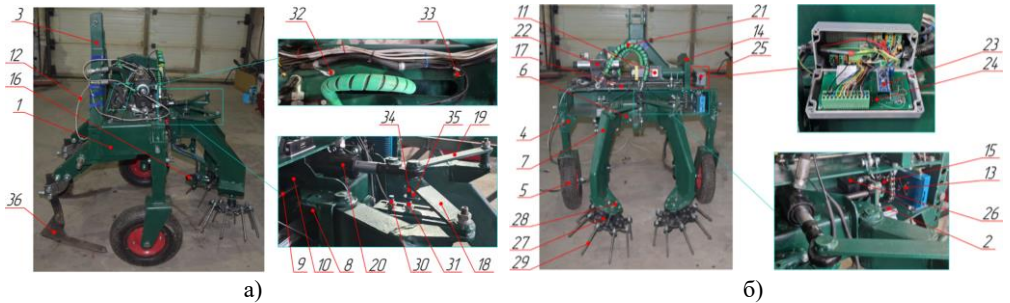


Рисунок 8 – Имитатор модуля машины
(расшифровка позиций в тексте)

В опытном образце машины (рисунок 9) контроллером выступает комплекс «процессор ноутбука + микроконтроллер». Драйвер соединён с аккумулятором. Во время проведения лабораторного исследования электрогидрораспределитель посредством гидрошлангов был соединён с гидросистемой гидравлического стенда, во время проведения лабораторно-полевого ис-

следования – с гидросистемой трактора. Ноутбук, аккумулятор, гидравлический стенд и трактор на рисунке не показаны.



а)

б)

1 – рама; 2 – направляющая; 3 – навесное устройство; 4 – кронштейн; 5 – опорное колесо; 6 – корпус; 7 – поворотная рамка; 8 – каретка; 9 – винт ШВП; 10 – гайка ШВП; 11 – шаговый двигатель; 12 – электропровод; 13 – драйвер; 14 – защитный кожух; 15 – ведомая звёздочка; 16 – видеочамера; 17 – USB-концентратор; 18, 19 – тяга; 20 – гидроцилиндр; 21 – гидрошланг; 22 – электрогидрораспределитель; 23 – микроконтроллер; 24 – плата; 25 – защитный корпус; 26 – преобразователь напряжения; 27 – диск; 28 – ось; 29 – палец; 30, 31, 32, 33 – индуктивный датчик; 34 – шплинт; 35 – возбудитель индуктивных датчиков; 36 – полочная лапа

Рисунок 9 – Опытный образец машины: а) вид слева с выносными элементами;

б) вид сзади с выносными элементами

По результатам экспериментов, проведённых на лабораторном стенде имитации обработки почвы в ручном электрифицированном режиме, установлено следующее: поперечная скорость модуля $V_{\text{моду}}$ должна превышать максимальную скорость корпуса имитатора модуля $V_{\text{киммак}}$; минимальное допустимое значение точности позиционирования равно $S_{0\text{min}} = 20$ мм.

По результатам экспериментов, проведённых на лабораторном стенде имитации обработки почвы в автоматизированном режиме, установлено следующее: работа стенда стабильна при скорости транспортёрной ленты (соответствующей рабочей скорости машины V_X) $V_L < 1,7$ км/ч; зависимости времени задержки подачи управляющего воздействия от скорости транспортёрной ленты являются степенными, что отражают графики, представленные на рисунках 10 и 11.

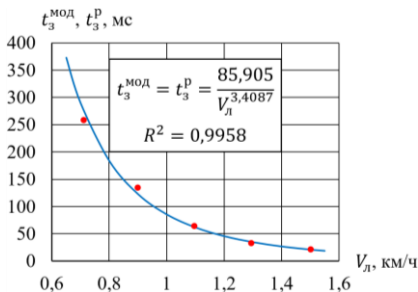


Рисунок 10 – График зависимости времени задержки подачи управляющего воздействия на поперечное перемещение модуля относительно распознанного культурного растения и на разведение рабочих органов от скорости транспортёрной ленты

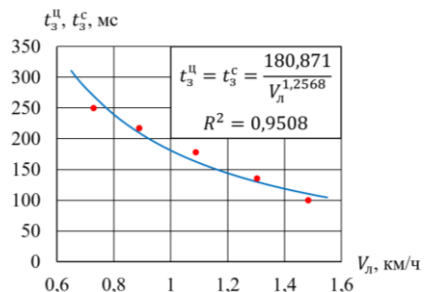


Рисунок 11 – График зависимости времени задержки подачи управляющего воздействия на перемещение модуля в центральное положение и сведение рабочих органов от скорости транспортёрной ленты

Лабораторно-полевое исследование опытного образца машины проведено на поле НИИСС им. М. А. Лисавенко. Агрегатирование опытного образца выполнено с трактором «Беларусь» МТЗ-50Л. Имитация ряда культурных растений выполнена путём размещения имитаторов культурного растения, каждый из которых представлял собой композитный колышек с размещённым на нём в качестве цветового идентификатора кусочком изолянтной красной краски.

По результатам экспериментов установлено, что зависимость между временем задержки подачи управляющего воздействия и рабочей скоростью машины описывается следующей системой выражений:

$$\begin{cases} t_3^{\text{мод}}(V_X) = t_3^{\text{р}}(V_X) = \frac{21,566}{V_X^{3,4087}}, \\ t_3^{\text{ц}}(V_X) = t_3^{\text{с}}(V_X) = \frac{45,407}{V_X^{1,2568}} \end{cases} \quad (10)$$

где $t_3^{\text{мод}}$, $t_3^{\text{р}}$, $t_3^{\text{ц}}$, $t_3^{\text{с}}$ – в мс, V_X – в км/ч, что подтверждает выдвинутое предположение о виде данных зависимостей.

Расположение имитаторов рабочего органа относительно имитаторов культурного растения при проведении опытов представлено на рисунке 12 в виде кадров проведённой видеосъёмки, расположенных в хронологическом порядке.

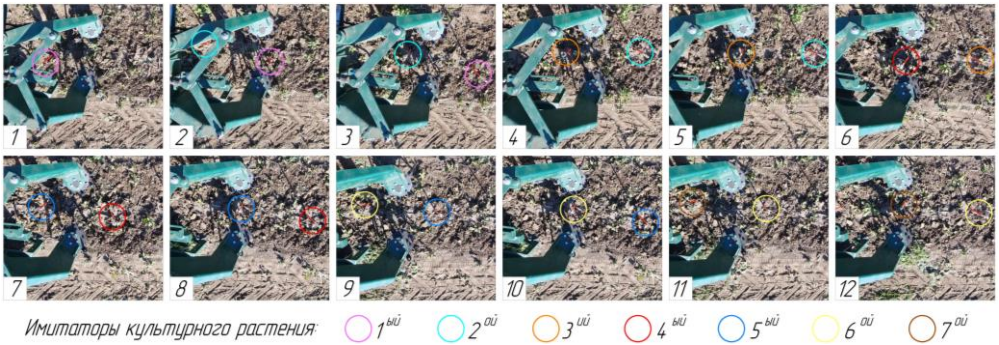


Рисунок 12 – Стоп-кадры видеосъёмки, выполненной во время лабораторно-полевого исследования опытного образца машины (движение машины – справа налево)

В четвёртой главе «Технико-экономическая оценка использования предложенной машины» выполнен подбор трактора, с которым допускается агрегатировать двухмодульный вариант предложенной машины, выполнен расчёт параметров предложенного МТА, определены интегральный показатель конкурентоспособности, экономический эффект от внедрения предложенной машины и срок окупаемости дополнительных капиталовложений.

По результатам расчёта параметров МТА, выполненного с учётом параметров предварительно выбранного трактора Агромаш-30ТК 121, гидроцилиндра, полольных лап, ранее принятых значений параметров машины и почвы при массе машины $m = 360$ кг, массе модуля $m_{\text{мод}} = 40$ кг, шаге винта ШВП $S_{\text{ШВП}} = 20$ мм, КПД цепной передачи $\eta_{\text{цп}} = 0,97$, количестве зубьев ведомой звёздочки $z_1 = 15$, количестве зубьев ведущей звёздочки $z_2 = 13$, количестве полольных лап модуля $n_{\text{пл}} = 2$, рабочей скорости машины $V_X = 1,61$ км/ч, удельном сопротивлении почвы $k = 50$ кПа, коэффициенте сопротивления перекачиванию $f_{\text{сп}} = 0,2$, коэффициенте трения скольжения стали по стали $\mu = 0,1$ получены следующие значения: $P_{\text{мод}X_{\text{max}}} = 275,3$ Н; $P_{\text{мод}Y_{\text{max}}} =$

$= 80,23 \text{ Н}$; $R_{\text{м} \max}^{\text{п}} = 1\,410,9 \text{ Н}$; максимальная мощность шагового двигателя, используемого для перемещения модуля в поперечном направлении, $N_{\text{шд} \max} = 26,44 \text{ Вт}$; максимальная эффективная мощность двигателя трактора $N_{e \max}^{\text{п}} = 13\,562,3 \text{ Вт}$; усреднённая эффективная мощность двигателя трактора $\overline{N_e^{\text{п}}} = 7\,932,6 \text{ Вт}$.

Установлено, что значения интегрального показателя конкурентоспособности предложенной машины лежат в диапазонах $k_{\text{м}} \in [1,91; 2,19]$ и $k_{\text{м}} \in [1,95; 2,31]$ в сравнении с отечественной МПП-2 компании ООО «Ваш трактор» и канадской Weeder Eco II компании UNIVERCO Inc соответственно, что свидетельствует о её высоком уровне конкурентоспособности.

Получены выражения для определения годового экономического эффекта от внедрения предложенной машины $\mathcal{E}_{\text{год}}$ и срока окупаемости дополнительных капиталовложений $T_{\text{ок}}$ (в качестве базовой выбрана машина МПП-2, поскольку на российском рынке представлена именно она):

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = -0,44 \cdot \mathcal{C}_{\text{м}}^{\text{п}} + 30\,996,70 \cdot S_{\text{пп}} + 176\,000,00, \quad (11)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{2,5 \cdot \mathcal{C}_{\text{м}}^{\text{п}} - 1\,000\,000,0}{400\,000,0 - \mathcal{C}_{\text{м}}^{\text{п}} + 70\,447,0 \cdot S_{\text{пп}}}, \quad (12)$$

где $\mathcal{E}_{\text{год}}$ и $\mathcal{C}_{\text{м}}^{\text{п}}$ – в рублях, $S_{\text{пп}}$ – в га, $T_{\text{ок}}$ – в годах.

В случае если необходимо обеспечить срок окупаемости дополнительных капиталовложений $T_{\text{ок}}$, не превышающий срок полезного использования машины $T_{\text{пим}} = 8$ лет, то следует также учитывать следующее выражение:

$$\mathcal{C}_{\text{м}}^{\text{п}} - 53\,674 \cdot S_{\text{пп}} - 400\,000 \leq 0. \quad (13)$$

Максимальная допустимая площадь плодopитомника $S_{\text{пп} \max}$ – площадь, при которой машина достигает полной загрузки в течение рабочего дня на протяжении всего сезона возделывания культур – равна $S_{\text{пп} \max} = 75,13$ га при принятых количестве раз выполнения обработки почвы $n_{\text{рв}} = 3$ и максимальном количестве дней работы машины в году $D_{\text{год} \max} = 100$ (в период с мая по август).

Поскольку в Алтайском крае распространены сельскохозяйственные предприятия с площадями плодopитомников до 15 га, то в качестве примеров результата расчёта рассмотрено применение предложенной машины в плодopитомниках площадями 5, 10 и 15 га. Так, для сельскохозяйственного предприятия с площадью плодopитомника $S_{\text{пп}} = 10$ га при цене предложенной машины $\mathcal{C}_{\text{м}}^{\text{п}} = 650\,000$ руб. приведённые затраты для предложенного МТА $J^{\text{п}}$ ниже, чем для базового $J^{\text{б}}$, на 6 666 руб./га, годовой экономический эффект от внедрения предложенной машины составил $\mathcal{E}_{\text{год}} = 199\,967$ руб., а срок окупаемости дополнительных капиталовложений – $T_{\text{ок}} = 1,38$ года, что обусловлено снижением приведённых затрат, достигаемым за счёт автоматизации управления рабочими органами при обработке приствольной полосы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана принципиальная схема машины, согласно которой обработку приствольной полосы производят два бесприводных ротационных рабочих органа, управление которыми происходит автоматизированно. Принцип работы автоматизированной системы управления основан на обработке контроллером видеоизображений с последующими выявлением цветового идентификатора культурного растения и подачей управляющих воздействий на исполнительные механизмы машины. Разработана структурная схема системы, согласно которой она является двух-контурной многоканальной замкнутой, функционирующей на основе отрицательной обратной связи. Первый канал управления реализует контур автоматического регулирования отклонения модуля, содержащего рабочие органы, от культурного растения. Второй канал управления реализует контур автоматического регулирования рабочего зазора. Управление осуществляется по принципу минимизации ошибки регулирования каждой из регулируемых координат. Разработан алгоритм работы системы для обработки приствольной полосы, основными действиями и функциями которого являются подготовка, запуск, обработка, передача видеоизображений с видеокамер на дисплей.

2. Разработана математическая модель процесса взаимодействия бесприводного ротационного рабочего органа с почвой, учитывающая совмещение его поперечного перемещения с продольным и описывающая взаимосвязь конструктивно-технологических, кинематических и силовых параметров машины. Разработана математическая модель процесса подачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы машины при автоматизированном управлении рабочими органами, учитывающая задержку подачи этих управляющих воздействий и описывающая взаимосвязь параметров, характеризующих эту задержку, и рабочей скорости машины.

3. Обоснована конструктивно-технологическая схема машины для обработки почвы в плодопитомниках, согласно которой рабочие органы машины являются бесприводными ротационными, установленными на корпусе модуля с возможностью изменения рабочего зазора с помощью гидроцилиндра при управлении посредством электрогидрораспределителя, причём корпус модуля имеет возможность поперечного перемещения при управлении посредством шагового двигателя, а обработку междурядий выполняют попольные лапы. Установлены параметры машины при углах наклона диска рабочего органа к горизонтальной плоскости $\varepsilon = 20^\circ$ и наклона пальца к оси вращения диска рабочего органа $\gamma = 25^\circ$, максимальном рабочем зазоре $S_{max}^{D_{33}} = 220$ мм, минимальном рабочем зазоре $S_{min} = 5$ мм, диаметре рабочего органа $d = 365$ мм, диаметре пальца $d_{п} = 12$ мм, количестве пальцев рабочего органа $c = 8$, количестве рабочих органов модуля $n_{po} = 2$, рабочей скорости машины $V_x = 1,5$ км/ч, глубине обработки почвы $h = 80$ мм с учётом физико-механических свойств почвы и параметров посадок в плодопитомниках Алтайского края: рабочий диапазон модуля $Y_{рд} = 20,2$ см; расстояние между осью вращения рамки и осью вращения рабочего органа $R_p = 300$ мм, при этом угол поворота рамки $\alpha = 15,8^\circ$; ширина обработанной полосы $B_{пол} = 220$ мм; угол конусности конца пальца $\alpha_k = 50^\circ$; необходимая поперечная скорость модуля $V_{моду} = 0,2$ м/с; время задержки подачи управляющего воздействия на поперечное перемещение модуля относительно распознанного культурного растения и на разведение рабочих органов $t_3^{мод} = t_3^p = 5,41$ мс; время задержки подачи управляющего воздействия на перемещение модуля в центральное положение и на сведение рабочих органов $t_3^u = t_3^c = 27,28$ мс; максимальное значение продольной силы сопротивления почвы, действующей на рабочие органы модуля, $P_{модx_{max}} = 275,06$ Н, поперечной – $P_{моду_{max}} = 80,04$ Н.

4. По результатам лабораторных исследований установлено следующее: минимальное допустимое значение точности позиционирования $S_{0min} = 20$ мм; работа автоматизированной си-

стемы управления стабильна при рабочей скорости машины $V_X < 1,7$ км/ч. По результатам лабораторно-полевого исследования машины: подтверждено предположение о виде зависимостей между параметрами, характеризующими задержку подачи соответствующего управляющего воздействия на исполнительный механизм, и рабочей скоростью машины V_X ; определены выражения, которыми задаются данные зависимости – $t_3^{\text{мод}} = t_3^{\text{р}} = \frac{21,566}{V_X^{3,4087}}$, $t_3^{\text{ц}} = t_3^{\text{с}} = \frac{45,407}{V_X^{1,2568}} (t_3^{\text{мод}}, t_3^{\text{р}}, t_3^{\text{ц}}, t_3^{\text{с}} - \text{в мс, } V_X - \text{в км/ч})$. Экспериментально установлены режимы работы машины: рабочая скорость машины V_X – до 1,7 км, глубина обработки почвы h – до 80 мм.

5. Установлено, что значения интегрального показателя конкурентоспособности двухмодульного варианта предложенной машины лежат в диапазоне $k_m \in [1,91; 2,31]$ в сравнении с отечественной МПП-2 и канадской Weeder Eco II, что свидетельствует о её высоком уровне конкурентоспособности. Определены аналитические зависимости, связывающие годовой экономический эффект от внедрения предложенной машины $\mathcal{E}_{\text{год}}$, срок окупаемости дополнительных капиталовложений $T_{\text{ок}}$, цену предложенной машины $\Pi_m^{\text{п}}$ и площадь плодопитомника $S_{\text{пп}}$. Так, для сельскохозяйственного предприятия при $S_{\text{пп}} = 10$ га и $\Pi_m^{\text{п}} = 650\,000$ руб. годовой экономический эффект от внедрения предложенной машины и срок окупаемости дополнительных капиталовложений соответственно равны $\mathcal{E}_{\text{год}} = 199\,967$ руб. и $T_{\text{ок}} = 1,38$ года, что обусловлено снижением приведённых затрат, достигаемым за счёт автоматизации управления рабочими органами при обработке приствольной полосы.

Рекомендации производству

При разработке, модернизации, совершенствовании или адаптации машины с автоматизированной системой управления рабочими органами для обработки почвы в плодопитомниках применительно к условиям конкретного сельскохозяйственного предприятия или предприятия-изготовителя рекомендуется:

1. Пользоваться разработанными математическими моделями процесса взаимодействия бесприводного ротационного рабочего органа с почвой и процесса подачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы машины при автоматизированном управлении рабочими органами.

2. Рабочую скорость машины, превышающую 1,7 км/ч, и глубину обработки почвы, превышающую 80 мм, обеспечить применением воздействующего на модуль энергетического средства, обладающего более высокими максимальными значениями частоты вращения выходного вала и крутящего момента, передаваемого им, в сравнении с использованным в настоящем исследовании.

3. Расчёт технико-экономических показателей машины выполнять согласно представленным выражениям после уточнения значений исходных данных.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Результаты выполненной диссертационной работы могут лечь в основу дальнейших исследований, направленных на решение следующих задач:

1. Разработка интеллектуальной системы распознавания культурных растений, не требующей размещения идентификаторов на них и основанной на применении нейронных сетей и технологии машинного зрения.

2. Разработка имитационной компьютерной модели процесса взаимодействия бесприводного ротационного рабочего органа с почвой.

3. Разработка машины с автоматизированной системой управления рабочими органами для обработки почвы при возделывании овощных и овощебахчевых культур.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. Сороченко, С. Ф. Определение функциональных зависимостей выходных параметров движения рабочих органов машины для приставной обработки почвы в плодопитомниках и садах / С. Ф. Сороченко, **Н. И. Раззамазов** // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 4. – С. 109–116.
2. **Раззамазов, Н. И.** Результаты лабораторных исследований системы управления рабочими органами машины для приставной обработки почвы / Н. И. Раззамазов, С. Ф. Сороченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – № 4. – С. 99–106.
3. **Раззамазов, Н. И.** Исследование пассивного ротационного рабочего органа почвообрабатывающей машины / Н. И. Раззамазов, С. Ф. Сороченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – № 7. – С. 79–87.
4. Сороченко, С. Ф. К обоснованию параметров машины с автоматизированной системой управления рабочими органами для обработки почвы в плодопитомниках / С. Ф. Сороченко, **Н. И. Раззамазов** // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2024. – № 1. – С. 96–102.
5. **Раззамазов, Н. И.** Классификация машин для обработки почвы в плодопитомниках / Н. И. Раззамазов, С. Ф. Сороченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2025. – № 4. – С. 82–90.

Патенты на изобретения

6. Патент № 2767791 Российская Федерация, МПК A01B39/16 (2006.01), A01B33/06 (2006.01). Машина для междурядной и приставной обработки почвы : № 2021114807 / заявл. 24.05.2021 : опубл. 21.03.2022 / С. Ф. Сороченко, **Н. И. Раззамазов**, Н. М. Чулкин, Р. В. Метальников ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – 11 с.
7. Патент № 2806588 Российская Федерация, МПК A01B39/08 (2006.01), A01B39/16 (2006.01), A01B63/32 (2006.01). Машина для междурядной и приставной обработки почвы : № 2022133752 / заявл. 21.12.2022 : опубл. 01.11.2023 / С. Ф. Сороченко, **Н. И. Раззамазов**, Н. М. Чулкин, Н. А. Колпаков ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – 12 с.
8. Патент № 2814021 Российская Федерация, МПК A01B 39/16 (2006.01), A01B 39/08 (2006.01), A01B 63/30 (2006.01). Машина для междурядной и приставной обработки почвы : № 2023126637 / заявл. 17.10.2023 : опубл. 21.02.2024 / С. Ф. Сороченко, **Н. И. Раззамазов**, Н. М. Чулкин, К. В. Польских ; патентообладатели Раззамазов Никита Иванович, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – 10 с.
9. Патент № 2821886 Российская Федерация, МПК A01B 39/08 (2006.01), A01B 39/16 (2006.01), A01B 35/18 (2006.01). Машина для обработки почвы : № 2024100009 / заявл. 01.01.2024 : опубл. 27.06.2024 / С. Ф. Сороченко, **Н. И. Раззамазов** ; патентообладатель ООО «Техновызов». – 12 с.
10. Патент № 2851360 Российская Федерация, МПК A01B 69/00 (2006.01), A01B 39/16 (2006.01), A01B 39/18 (2006.01). Способ управления рабочими органами технического средства для приставной обработки почвы : № 2025115010 / заявл. 02.06.2025 : опубл. 24.11.2025 / **Н. И. Раззамазов**, С. Ф. Сороченко, Н. А. Пушкин ; патентообладатель ООО «Техновызов». – 15 с.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684665 Российской Федерация. Система управления рабочими органами машины для приствольной обработки почвы : № 2023683675 / заявл. 06.11.2023 : опубл. 17.11.2023 / **Н. И. Раззамазов**, С. Ф. Сороченко, В. С. Коновалов ; правообладатель Раззамазов Никита Иванович. – 1 с.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025690127 Российская Федерация. Программа автоматизированного управления рабочими органами машины для приствольной обработки почвы : № 2025689525 / заявл. 25.10.2025 : опубл. 05.11.2025 / **Н. И. Раззамазов**, Н. А. Пушков, Р. О. Тогузов, М. Г. Сабылин ; правообладатель ООО «Техновызов». – 1 с.

Публикации в рецензируемых изданиях РИНЦ

13. **Раззамазов, Н. И.** Распознавание объектов при приствольной обработке почвы в плодопитомниках / Н. И. Раззамазов, С. Ф. Сороченко // Наука и молодежь: материалы XVII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / Алтайский гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул, 2020. – Ч. 4. – С. 44–46.

14. **Раззамазов, Н. И.** Перспективы совершенствования машины для приствольной обработки почвы в плодопитомниках / Н. И. Раззамазов // Молодежь – Барнаулу : материалы XXII гор. науч.-практ. конф. молодых ученых (2–9 нояб. 2020 г.) / гл. ред. Ю. В. Анохин ; Алтайский гос. ун-т. – Барнаул, 2021. – С. 50.

15. **Раззамазов, Н. И.** Разработка стенда для проведения исследований машины для приствольной обработки почвы в плодопитомниках / Н. И. Раззамазов, С. Ф. Сороченко // Ползуновский альманах. – 2022. – № 2, т. 2. – С. 16–19.

16. **Раззамазов, Н. И.** Анализ существующих решений в области механизации и автоматизации междурядной и приствольной обработки почвы в плодопитомниках и молодых садах / Н. И. Раззамазов, С. Ф. Сороченко // Ползуновский альманах. – 2023. – Т. 2, № 2 – С. 17–19.

17. **Раззамазов, Н. И.** Анализ и классификация систем управления рабочими органами машин для обработки почвы в плодопитомниках и садах / Н. И. Раззамазов ; науч. рук. С. Ф. Сороченко // Наука и молодежь : материалы XXI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / Алтайский гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул, 2024. – Т. 1, ч. 1. – С. 32–34.

18. Разработка автоматической системы управления рабочими органами машины для приствольной обработки почвы / Н. А. Пушков, **Н. И. Раззамазов**, В. С. Афонин, С. Ф. Сороченко // Современные цифровые технологии : сб. материалов III Всерос. науч.-практ. конф. (03 июня 2024 г.). – Барнаул, 2024. – С. 268–271.

19. **Раззамазов, Н. И.** Разработка машины с автоматической системой управления рабочими органами для обработки почвы в плодопитомниках / Н. И. Раззамазов // Молодежь – Барнаулу : материалы XXV гор. науч.-практ. конф. молодых ученых / отв. ред. Штебнер А. Л. – Барнаул, 2024. – С. 59–60.

20. **Раззамазов, Н. И.** Анализ видов обработки почвы и борьбы с сорной растительностью при возделывании культур в плодопитомниках / Н. И. Раззамазов ; науч. рук. С. Ф. Сороченко // Наука и молодежь : материалы XXII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / Алтайский гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул, 2025. – Т. 1, ч. 1. – С. 29–31.

21. **Раззамазов, Н. И.** К технико-экономической оценке использования машины с автоматизированной системой управления рабочими органами для обработки почвы в плодопитомниках / Н. И. Раззамазов, С. Ф. Сороченко // Актуальные вопросы автомобильного транспорта и наземных технологических систем (АВАТ-2025) : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. / Алтайский гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул, 2025. – С. 99–103.