



На правах рукописи

ГАЛИУЛЛИН ИСКАНДЕР ГАЯЗОВИЧ

**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНЫХ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Специальность: 2.2.11 – Информационно-измерительные и управ-
ляющие системы

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», институт искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии, кафедра физики перспективных технологий и материаловедения.

Научный руководитель: **ЧИКРИН Дмитрий Евгеньевич**,
доктор технических наук, директор Института
искусственного интеллекта, робототехники
и системной инженерии ФГАОУ ВО «Казанский
(Приволжский) федеральный университет»

Официальные оппоненты: **ВАСИЛЬЕВ Сергей Анатольевич**,
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой прикладной механики и графики
ФГАОУ ВО «Чувашский государственный
университет имени И.Н. Ульянова»

АГАФОНОВ Антон Александрович,
доктор технических наук, доцент кафедры
геоинформатики и информационной безопасности
ФГАОУ ВО «Самарский национальный
исследовательский университет имени академика
С.П. Королёва»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2025 г. в ____ на заседании
диссертационного совета 99.0.135.02 в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке
БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова и на сайте

<https://voenmeh.ru/nauka/dissertaczionnye-sovety/dissertaczionnyj-sovet-99-0-135-02/>

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Смирнова Мария Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Отечественная экономика сталкивается с вызовами современности, требует инновационных решений для повышения эффективности практически всех отраслей народного хозяйства. В последние десятилетия наблюдается нарастающее внедрение ресурсосберегающих технологий, информационно-измерительных и управляющих систем, средств автоматизации для решения широкого спектра производственных задач. Фактически революционным стало стремительное освоение автономных технологий и беспилотных транспортных систем отечественными промышленными предприятиями и научными организациями.

Создание и масштабное использование беспилотных сельскохозяйственных транспортных систем (БСТС) направлено не только на обеспечение технологического суверенитета и продовольственной независимости Российской Федерации, но и на сокращение трудозатрат и повышения производительности, а также на значительное снижение негативного воздействия на окружающую среду.

Создание современных БСТС требует не только разработки самих систем, но и учета ряда методологических аспектов. Важность комплексного проектирования, включая применение концепции бережливого производства и шаблонов проектирования, высока, поскольку эффективное внедрение БСТС зависит от создания технологических, экологически устойчивых и оптимальных решений.

Таким образом, диссертация посвящена исследованию и разработке современных сельскохозяйственных БСТС, с фокусом на сценариях эксплуатации, уровнях использования современных методологий проектирования информационно-управляющих систем (ИС) для создания эффективных и устойчивых технологических решений в сельском хозяйстве.

При подготовке исследования рассмотрены научные работы связанные с перспективами развития беспилотной сельскохозяйственной техники, интеллектуальными системами в сельском хозяйстве, повышением уровня интеграции беспилотных технологий в сельскохозяйственную технику и перспективами применения беспилотного транспорта в России за авторствами: Каратаевой О.Г., Виноградова О.В., Харламова Д.И., Митенева Н.С., Алексеев Ю.М., Пономарева Д.А., Шияновой К.С., Кацуба Ю.Н., Караваева Н.А., Бондаревой А.А. и Паршиной Л.Н. и др.

Объект исследования

Объектом исследования являются современные беспилотные сельскохозяйственные транспортные системы и инфокоммуникационные компоненты, входящие в их структуру.

Предмет исследования

Предметом исследования являются процессы проектирования, оптимизации и интеграции этих систем в сельскохозяйственную деятельность.

Цель и задачи работы

Основная цель работы:

Повышение уровня интеграции информационно-управляющих процедур в процессы создания и эксплуатации БСТС на основе разработки шаблонов их проектирования с определением и устранением ключевых системных ограничений.

Основные задачи научных исследований:

Для достижения поставленной цели определяются следующие задачи:

1. Исследование возможностей и разработка методов адаптации существующих шаблонов проектирования в автомобильной промышленности к транспортным средствам сельскохозяйственного назначения на основе анализа существующих и перспективных беспилотных сельскохозяйственных транспортных систем.

2. Анализ и выявление системных ограничений информационно-измерительных и управляющих систем, интегрированных в сельскохозяйственные транспортные средства, для их последующего устранения и повышения эффективности работы системы.

3. Разработка методов устранения системных ограничений на основе концепции бережливого производства и теории ограничений Элияху Голдратта для повышения эффективности функционирования беспилотных сельскохозяйственных транспортных систем.

4. Разработка методов виртуального моделирования и проведение полунатурных испытаний разработанных информационно-управляющих систем для обеспечения оптимизации проектирования и оценки их показателей.

Степень успешного решения данных задач определит теоретическую ценность работы, предоставляя новые знания в области беспилотных систем для сельского хозяйства, а также ее практическую ценность, создавая основу для эффективного внедрения инноваций в данную отрасль.

Методы исследований

В процессе научного исследования были получены результаты через анализ и систематизацию последних достижений в области сельскохозяйственной автоматизации; сравнительный анализ для выявления различий и сходств между существующими беспилотными системами, а также для определения их преимуществ и недостатков. Теоретическая база работы формировалась с использованием методов математического и виртуального моделирования, обработки изображений, а также технологий распознавания образов и фильтрации цифровых данных.

Кроме того, применялись принципы бережливого производства и теории ограничений для рассмотрения вопросов оптимизации процессов проектирования инфокоммуникационных систем беспилотных транспортных средств с целью повышения эффективности.

Экспериментальная составляющая включала в себя натурные испытания и применение программного обеспечения для математического и системного моделирования.

Научная новизна работы

1. Разработан универсальный шаблон проектирования беспилотных сельскохозяйственных транспортных систем, состоящий из 4 подсистем и 14 функциональных блоков, что позволяет создать новые элементы структуры информационно-измерительных и управляющих систем для сельскохозяйственного назначения.

2. В работе впервые выявлены и описаны ключевые системные ограничения информационно-управляющих систем беспилотных сельскохозяйственных транспортных средств. Это значимо для понимания особенностей функционирования данных систем и определения направлений их улучшения. Ключевые системные ограничения:

- ограниченность ресурсов и строгая приоритезация задач вычислительной подсистемы (латентность срабатывания на уровне 0,5-1 сек; количество одновременно выполняемых задач не более 2-х).

- пропускная способность, латентность, джиттер, помехоустойчивость подсистемы коммуникации и связи (скорость связи без потери соединения не более 1-2 Мбит\с, латентность на уровне 300-400 мс, джиттер на уровне 20-50 мс).

- частота получения навигационных оценок, точность позиционирования, качество сигнала и количество наблюдаемых спутников в подсистеме позиционирования и навигации (частота получения навигационных оценок 1Гц, точность позиционирования – 2-3 метра, обеспечивается достаточное качество приема сигналов спутников исключительно на открытой местности, без заезда в укрытия гаражного\ангарного типа).

- скорость обработки данных, количество и качество различных распознаваемых объектов в подсистеме машинного зрения (количество обрабатываемых кадров – до 2 в секунду, количества одновременно анализируемых объектов – от 3 до 5; стабильная работа исключительно в условиях отсутствия засветки и неблагоприятных погодных явлений).

3. Предложены новые методы устранения системных ограничений в сельскохозяйственных беспилотных транспортных системах, основанные на синергии бережливого производства и теории ограничений. Этот подход является инновационным и позволяет эффективно оптимизировать процессы функционирования данных систем:

- вычислительная подсистема: использование операционной системы реального времени совместно с промышленными микроконтроллерами с приоритезацией задач с использованием расширения реального времени обеспечивает латентность срабатывания на уровне 0,05-0,1 сек с количеством одновременно выполняемых задач – до 14 с динамической регулировкой приоритетов (соответственно количеству функциональных блоков информационно-управляющих системы).

- система позиционирования и навигации: использование многоточечной системы инерциальной навигации одновременно с методом получения высокоточных координат и взаимной калибровкой показаний обеспечивает повышение частоты обновления навигационных оценок до 100 Гц с уменьшением СКО позиционирования до 0,1 метра. Одновременно с этим достигается функционирование системы навигации в полном автономе (в условиях недоступности навигационного созвездия спутников ГНСС) до 10-15 минут с точностью до 1,5% от пройденной траектории в указанном режиме.

- система связи: использование низколатентных профилей радиointерфейсов 5G одновременно с применением протокола помехоустойчивой связи без установления соединения позволяет радикально (в 10 и более раз) снизить количество разрывов (потерь пакетов, сопровождающих повреждения и-или комплексную потерю видеокadra) при скоростях передачи до 10-20 Мбит/с.

- машинное зрение: использование современных аппаратно-акселерированных нейросетей последнего поколения, оптимизированных по размеру видеопамати и разрешению совместно с унификацией условий наблюдения при помощи алгоритмов адаптивной нормализации видеопотока обеспечили увеличение показателя количества кадров обработки до 10 в секунду и количества одновременно анализируемых объектов от 15 до 20, в том числе при неблагоприятных условиях наблюдения (снег, дождь, туман, сумерки и пр.)

4. Разработана новая структура и методы построения виртуальных полигонов – верифицируемых систем достоверной симуляции и комплексного воспроизведения динамических процессов и объектов робототехнических транспортных систем сельскохозяйственного назначения. Это новшество позволяет создавать более точные и реалистичные модели данных систем для проверки и верификации их работы: наивысшее процентное соотношение максимального отклонения по отношению к общей длине траектории составляет 0,42%, а СКО по отношению к длине траектории: 0,14% (сравнение маршрутов движения реального и виртуального БСТС).

Практическая ценность работы

1). Разработанные шаблоны проектирования обеспечивают ускорение и значительную степень унификации технических решений при разработке систем беспилотных транспортных средств.

2). Принципы определения системных ограничений позволяют обнаружить ограничения на стадии проектирования и обеспечить учет их при принятии конкретных технических решений.

3). Идентификация и снятие системных ограничений способствует более быстрому и точному принятию решений в ходе разработки инфокоммуникационных систем. Это ускоряет внедрение новых технологий и снижает временные затраты.

4). Подходы виртуального и полунатурного моделирования предлагают инструменты для более эффективной верификации разработанных систем. Это уменьшает риски при внедрении новых технологий и способствует созданию более надежных и адаптируемых беспилотных сельскохозяйственных транспортных средств.

Реализация работы

Результаты работы внедрены в деятельность ООО «ТПК МТЗ-Татарстан» при проведении работ по автоматизации тракторов Беларус-112Н, Беларус-3522.

Материалы диссертационной работы внедрены и использованы в Научно-исследовательском центре «Центр превосходства Специальная робототехника и искусственный интеллект» Института вычислительной математики и информационных технологий для разработки серии беспилотных сельскохозяйственных наземных транспортных средств при получении ключевых результатов Центра по программе Приоритет-2030.

Указанные внедрения подтверждены актами.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались, обсуждались и представлялись на следующих конференциях:

- Научно-техническая конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко “Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении” (КомТех-2023), г. Таганрог, 2023 г.

- XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023), Робототехника и мехатроника (РиМ-2023), г. Волгоград, 2023 г.

- Одиннадцатая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2023), г. Казань, 2023 г.

- Мультидисциплинарный международный форум «Kazan Digital Week – 2022», «Kazan Digital Week – 2023», г. Казань, 2022, 2023 гг.

Публикации

Основные научные и практические результаты работы представлены в 7 статьях в изданиях из списка ВАК по специальности, результаты интеллектуальной деятельности защищены 13 свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Научные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие научные положения, выдвигаемые на основе полученных в диссертационной работе результатов:

1) Разработаны шаблоны проектирования информационно-управляющих систем беспилотных сельскохозяйственных транспортных систем (соотв. п.п. 2,3 паспорта специальности 2.2.11).

2) Определены системные ограничения БСТС и их отдельных подсистем, включая вычислительную подсистему, подсистему машинного зрения, подсистему навигации и ориентации и др. (соотв. п.п. 2,6 паспорта специальности 2.2.11).

3) С использованием концепции бережливого производства и теории ограничений Элияху Голдратта определены методы снятия ранее найденных системных ограничений (соотв. п.п. 1,4 паспорта специальности 2.2.11).

4) Разработан инструментарий системы физико-технического виртуального моделирования БСТС и их отдельных подсистем для целей оптимизации скорости построения и оценки показателей разрабатываемых информационно-управляющих систем (соотв. п.п. 7,8 паспорта специальности 2.2.11).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего в себя 124 наименований отечественных и зарубежных источников, в том числе 20 работ автора и содержит 210 страниц основного машинописного текста, 52 рисунка, 13 таблиц.

Личный вклад автора

Автор внес значительный личный вклад в исследование, представленное в данной диссертации. Основные достижения и вклад заключается в:

- разработке и успешной реализации инновационных шаблонов проектирования, что существенно обогатило методологию разработки информационно-управляющих систем беспилотных сельскохозяйственных транспортных средств;

- идентификации и детальном анализе ключевых системных ограничений в беспилотных сельскохозяйственных транспортных системах, что создало основу для последующего снятия данных ограничений;

- разработке эффективных методов устранения системных ограничений, основанных на синергии концепции бережливого производства и теории ограничений, что предоставило новые принципы и их успешную практическую проверку;

- создании инновационной структуры и методов построения виртуальных полигонов для верификации систем достоверной симуляции беспилотных сельскохозяйственных транспортных систем;

- руководстве группой специалистов и инженеров КФУ, занимающихся низкоуровневой разработкой и автоматизацией основных узлов тракторов малого и тяжелого классов;

- личное участие и руководство при построении архитектуры, разработке алгоритмов, написании программ и отладке программного обеспечения на целевой сельскохозяйственной технике;

- руководстве проведением испытаний систем с целью получения данных для проведения верификации работоспособности и эффективности разработанных систем.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы цель и задачи работы, определены практическая ценность и область применения результатов, приведены сведения об апробации работы и представлены основные положения, выносимые на защиту. Исследования автора посвящены построению информационно-управляющих систем транспортных средств сельскохозяйственного назначения.

В первой главе – «Сценарии эксплуатации, уровни автоматизации техники в сельском хозяйстве и известные реализации» - проведен обзор существующих и перспективных БСТС в сельском хозяйстве; были рассмотрены инфокоммуникационные системы БСТС и методологии их проектирования.

В настоящее время БСТС представляют собой комплексную информационно-управляющую систему, состоящую из нескольких инфокоммуникационных подсистем:

1. **Позиционирование и навигация:** обеспечивает определение местоположения БСТС и точное определение времени.

2. **Машинное зрение:** использует различные датчики и камеры для создания трехмерной модели окружающего пространства и обнаружения препятствий.

3. **Коммуникация и связь:** обеспечивает передачу данных между компонентами системы и обеспечивает связь с внешней средой.

4. **Вычислительная подсистема БСТС:** включает в себя систему телеуправления, поддержку принятия решения и автопилотирования. Общая структурная схема ИС БСТС представлена на Рисунке 1.

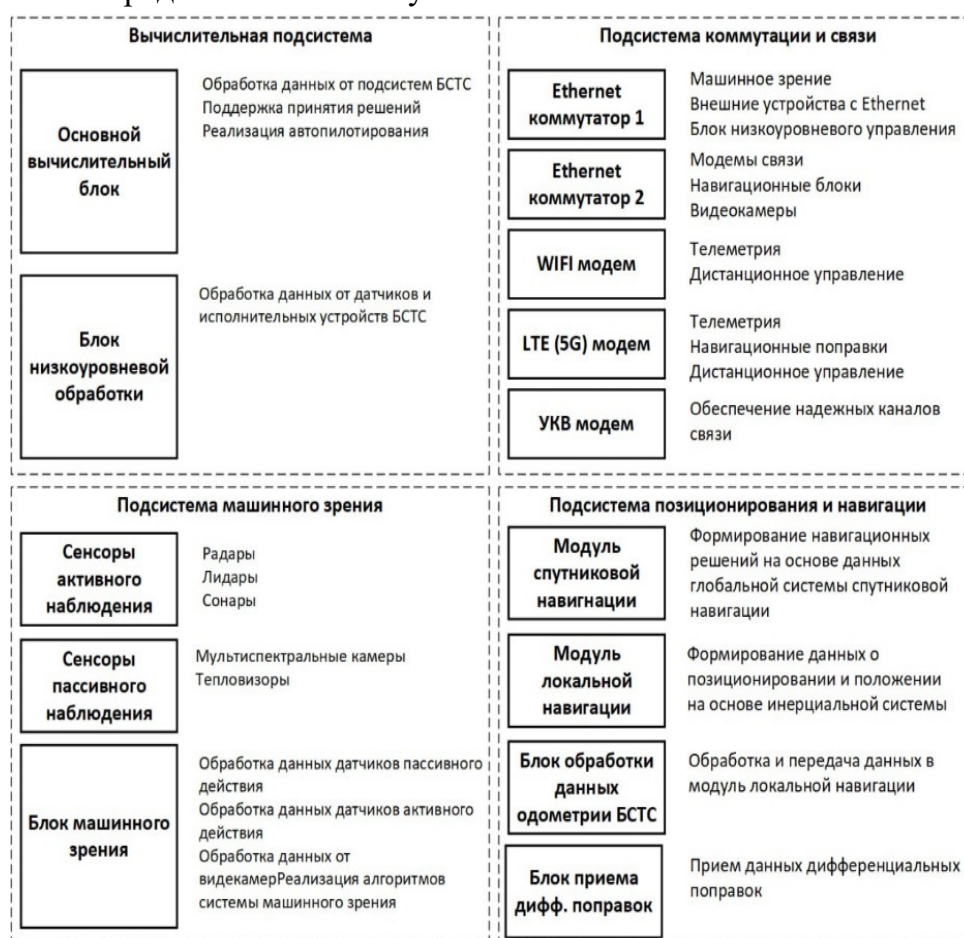


Рисунок 1 - Общая структурная схема ИС БСТС

В целом, ИС БСТС является сложной системой, требующей комплексного подхода к проектированию и разработке. Каждая из подсистем имеет свои особенности и требует специальных знаний и навыков для проектирования и интеграции в общую систему.

Оптимальным подходом к разработке ИС БСТС является применение концепции бережливого производства, которая предлагает систематический и структурированный подход к разработке, основанный на принципах

минимизации потерь, повышения качества и непрерывного улучшения системы. Для возможности применения этих принципов необходима стандартизированная и универсальная система – шаблоны проектирования. Шаблоны проектирования являются основным ключевым механизмом применения принципов бережливого производства.

Вторая глава «Реализация шаблонов проектирования в различных ИС БСТС с точки зрения реализации концепции бережливого производства и теории ограничения Голдратта» представляет собой систематическую работу по определению и преодолению системных ограничений на стадии разработки ИС БСТС.

Системное ограничение – это элемент или фактор, который ограничивает или замедляет работу системы в целом. Оно является узким местом или слабым звеном в процессе, которое влияет на общую производительность системы.

Определены главные ограничения для каждой из подсистем ИС БСТС:

1. В вычислительной подсистеме были определены следующие системные ограничения: ограниченность ресурсов и строгая приоритезация задач.

2. В подсистеме коммуникации и связи, системные ограничения включали в себя пропускную способность каналов связи, латентность и задержки, помехоустойчивость, защиту данных и совместимость с разными устройствами.

3. В подсистеме позиционирования и навигации, ограничения включали точность позиционирования, доступность сигналов навигационных спутников и зависимость от глобальных систем навигации.

4. В подсистеме машинного зрения, системные ограничения включали качество обработки изображений, эффективность в условиях неблагоприятных факторов, скорость обработки данных и распознавание разнообразных объектов.

Для преодоления ограниченности ресурсов в вычислительной подсистеме ИС БСТС предлагается использовать трехуровневую схему. Каждый уровень выполняет определенные задачи и использует соответствующие аппаратные и программные ресурсы:

1. Низкий уровень. На низком уровне системы используются специализированные микроконтроллеры, которые предназначены для выполнения простых и быстрых операций, таких как считывание данных с датчиков, управление актуаторами и другие рутинные функции.

2. Средний уровень. На среднем уровне системы осуществляется выполнение сложных задач, ограниченных по времени. Для реализации таких задач используются специализированные аппаратные средства, которые обладают высокой производительностью и способны обрабатывать большие объемы данных.

3. Высокий уровень. На высоком уровне системы выполняются разнообразные задачи, включая стратегическое планирование, обработку данных в большом объеме и задачи, которые не являются критичными по времени исполнения.

Оптимальным и основным подходом для преодоления ограничений строгой приоритезации задач является использование систем реального времени.

При разработке подсистемы коммуникации и связи ИС БСТС предлагается использование технология 5G для обеспечения высокой пропускной способности, низкой латентности, помехоустойчивости и надежности, а также поддержки большого количества устройств. Для обеспечения высокоскоростной связи 5G, требуется применение надежного и высокоэффективного протокола транспортного уровня. Исходя из проведенного анализа больше всех преимуществ имеет протокол связи без установления соединения с гарантированной доставкой.

Для формирования навигационно-временного поля БСТС предлагается использовать высокоточные аппаратно-программные средства, которые опираются на сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Среди технологий, соответ-

ствующих требованиям к точности позиционирования (указанных в главе 1), выделяются RTK (Real Time Kinematic) и PPP (Precise Point Positioning). RTK, несомненно, предоставляет высокую точность, однако ограничивает область использования действием базовых станций ГНСС. Это ограничение можно считать одним из системных ограничений, так как оно связано с радиусом действия базовых станций.

Далее предлагается решение («Созвездие»), разработанное с участием автора. На Рисунке 3 представлена общая структурная схема и фотография системы навигации «Созвездие». Система имеет в своем составе инерциальную подсистему (2 инерциальных сборки), ГНСС подсистемы, работающая в режиме PPP (ГНСС приемник и ГНСС антенна) и вычислительного блока.



Рисунок 3 – Структурная схема и фотография системы «Созвездие»

Для формирования точных навигационных оценок используется алгоритм компенсации стохастических ошибок распределенной ИНС (блок-схема на Рисунке 4).

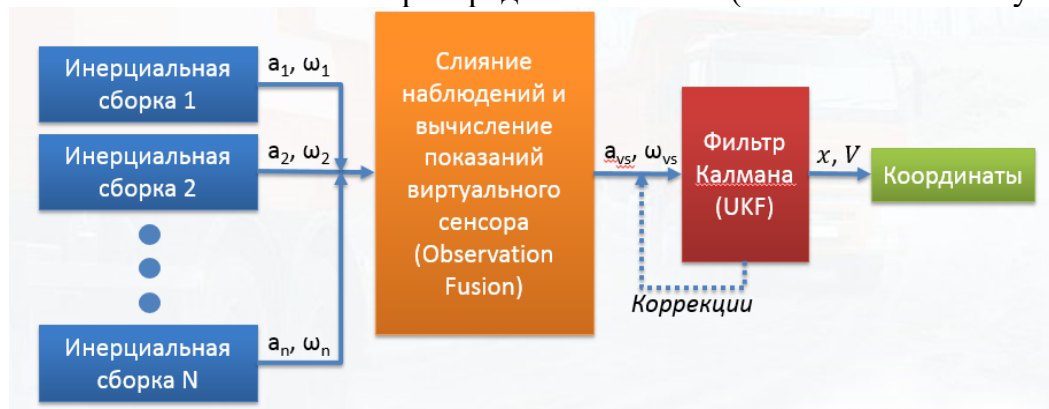


Рисунок 4 – Блок-схема обработки данных с инерциальных датчиков

Инерциальная подсистема позволяет получать навигационные оценки (координаты и углы поворота транспортного средства) при плохом качестве или полном отсутствии ГНСС сигнала. Система «Созвездие» успешно снимает системные ограничения, описанные в контексте подсистемы позиционирования и навигации в ИС БСТС.

При проектировании подсистемы машинного зрения в ИС БСТС среди основных задач стоит задача эффективного обнаружения и классификации разнообразных препятствий, таких как столбы, деревья, кустарники, овраги и другие объекты. Для снятия системных ограничений используются методы детектирования и классификации, а также алгоритмы нормализации изображений. Эти алгоритмы включают в себя оценку уровня шума, коррекцию резкости, компенсацию засветки и контрастности, а также алгоритмы детектирования и классификации объектов. По итогам исследования темы де-

тектирования и классификации объектов на изображениях в рамках данной работы используется сверточная нейронная сеть. Для реализации системы машинного зрения автором была использована технология ускорения вычислений на базе векторных ускорителей.

Результаты проведения испытаний распознавания (детектирование и классификация) представлены в Таблицах 1 и 2. За нулевую гипотезу принято отсутствие целевого объекта на кадре: ошибка I-го рода соответствует ложной тревоге, ошибка II-го рода – пропуску цели.

Таблица 1 – Результаты детектирования объектов.

Вид ошибки	Номер испытания									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I-го рода	2,82	2,09	1,81	1,26	1,90	2,81	2,80	1,84	2,33	2,32
II-го рода	3,46	2,82	3,19	2,97	2,45	3,24	2,97	2,83	3,52	2,25

Таблица 2 – Результаты классификации объектов.

Вид ошибки	Номер испытания									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I-го рода	2,13	2,54	2,89	2,39	2,62	2,32	2,77	2,39	2,96	2,15
II-го рода	2,11	2,39	2,56	2,08	2,60	2,83	2,64	2,86	2,71	2,38

На Рисунке 5 представлены результаты сегментации препятствий подсистемы машинного зрения ИС БСТС.



Рисунок 5 – Результаты испытаний распознавания

Проведенное исследование выявило высокую эффективность применения нейронной сети в задаче сегментации и детектировании.

Таким образом, разработанные алгоритмы нормализации изображений и использование нейронной сети, совместно с технологией ускорения вычислений на базе векторных ускорителей, позволили снять системные ограничения, и обеспечили высокую эффективность работы подсистемы машинного зрения.

В третьей главе «Проектирование и реализация информационно-управляющих систем БСТС» детально рассматривается процесс автоматизации двух моделей тракторов «МТЗ-112Н-01» и «МТЗ-3522». Каждый раздел этой главы представляет собой глубокий анализ технических аспектов, используемых систем и перспектив дальнейшей автоматизации.

При решении задач автоматизации тракторной техники малого трактора МТЗ-112 и тяжелого трактора МТЗ-3522 использовались шаблоны проектирования. Они были

сформированы как на основе анализа тенденций в области беспилотной техники, так и на основе собственных наработок, полученных коллективом при участии автора в течение реализации ряда проектов по автоматизации различных видов транспортных средств.

Для автоматизации набора органов управления, необходимых для контролируемого движения тракторов, были разработаны и установлены блоки управления (Рисунок 6).

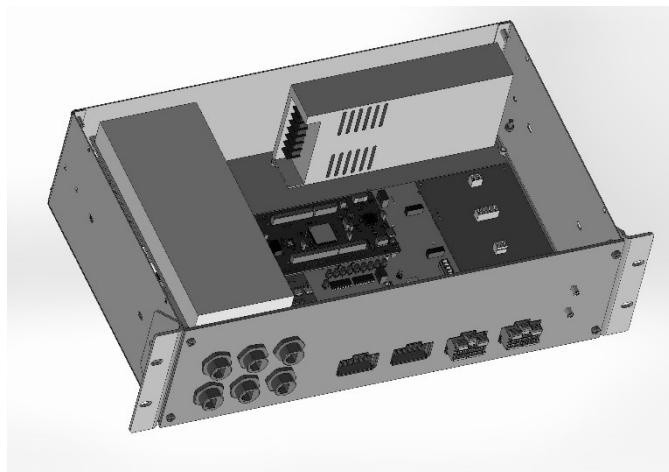


Рисунок 6 – 3D модель блока управления трактором.

В целях энергоэффективности, повышения комфорта работы и уровня безопасности на задний вал трактора «МТЗ-112Н-01» был установлен электродвигатель и специально спроектированные одометры.

Благодаря прецизионному потенциометру, установленному на рулевую рейку, блок управления определяет угол поворота и автоматически регулирует работу колес, обеспечивая плавные и точные повороты тракторов.

Поворот колес осуществляется использованием электроуправляемого распределительного гидравлического

устройства «КОСМОС SK PRD», который был встроен в гидравлическую систему тракторов.

Помимо этого, в главе детально описаны разработанные ПО для обеспечения работы автоматизированного управления трактором «МТЗ-112Н-01» (13 наименований) и трактором «МТЗ-3522» (6 наименований).

Четвертая глава «Виртуальное моделирование» посвящена разработке и применению виртуальных моделей для БТС. Каждый раздел этой главы детально рассматривает аспекты создания виртуальных окружений, моделей транспортных средств, систем сенсорики и алгоритмов управления.

При построении реальных систем беспилотного транспорта следует учитывать, какое оборудование (в том числе и сенсорика) будет установлено в технику. Более того, алгоритмы автопилотирования транспортного средства, а также системы распознавания объектов требуют тщательной проверки, так как могут возникнуть ошибки в ходе эксплуатации системы, что может привести к негативным последствиям, в том числе и связанных с риском для жизни людей, находящихся как в транспортных средствах, так и являющихся пешеходами. Такие огромные риски делают задачу виртуального моделирования разрабатываемой системы для беспилотного трактора тяжелого класса актуальной и одной из самых важных.

Для обеспечения полной работоспособности системы беспилотного трактора тяжелого класса была использована сенсорика – 8 сонаров, лидар, камера, 2 GPS датчика. Структурная схема модели трактора с установленной сенсорикой и указанием типа соединений между звеньями показана на Рисунке 7. Трактор тяжелого класса, полученный в результате собранной модели в виртуальном симуляторе показан на Рисунке 8.

Алгоритм управления виртуального БСТС состоит из компонентов – блок управления, блок обратной связи виртуального БСТС (Рисунок 9 и Рисунок 10 соответственно).

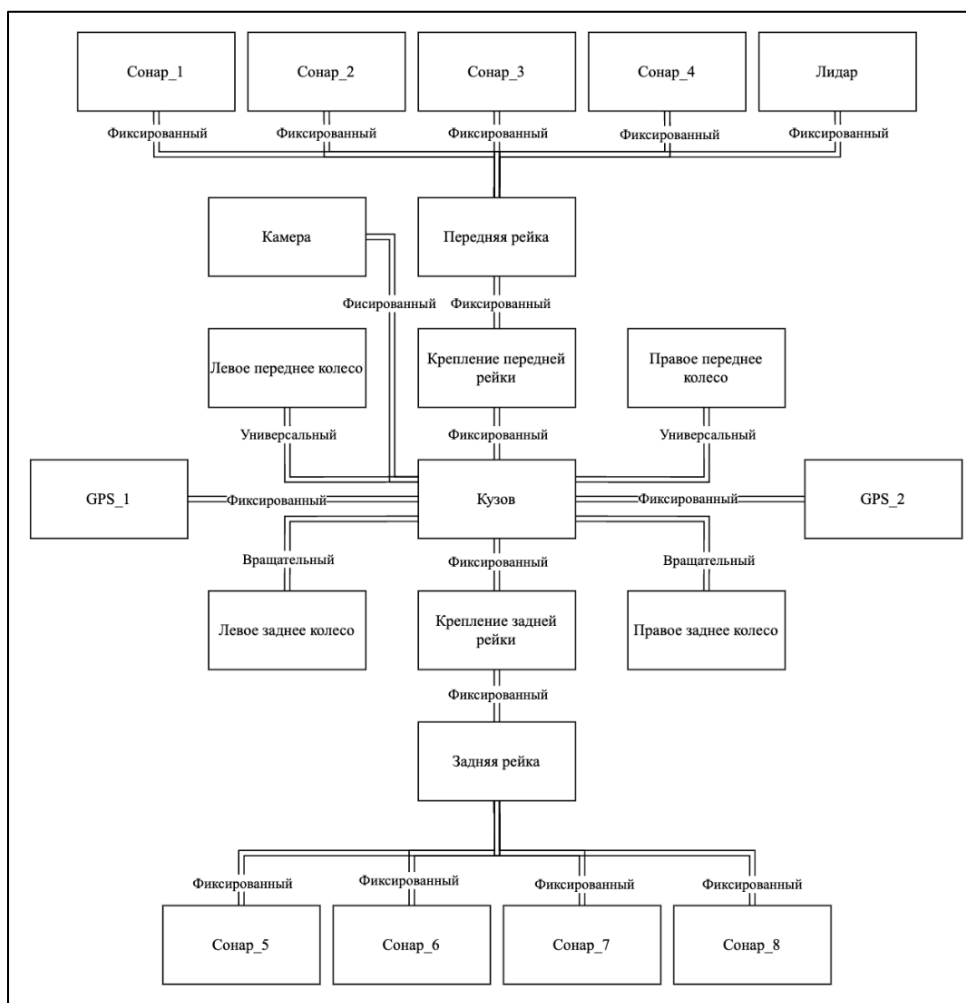


Рисунок 7 – Структурная схема виртуального трактора тяжелого класса с установленной сенсорикой.

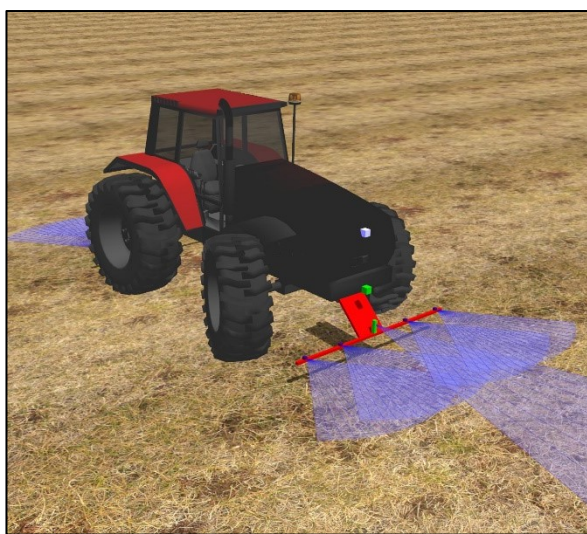


Рисунок 8 – Модель тяжелого трактора

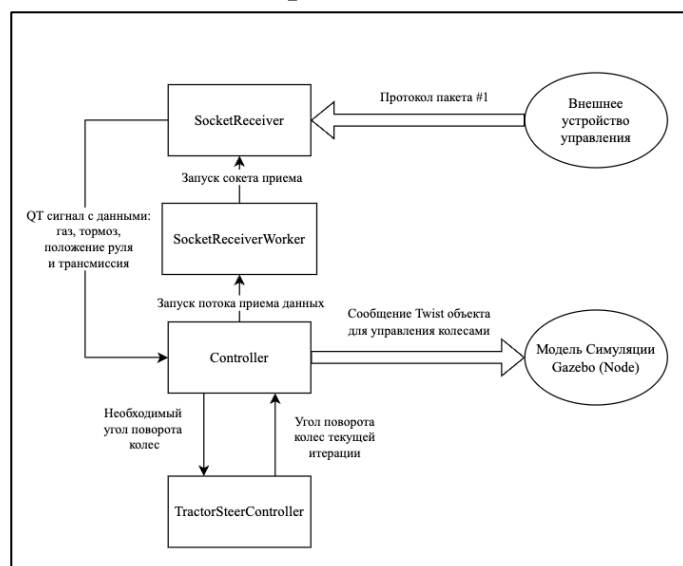


Рисунок 9 – Структурная схема блока управления.

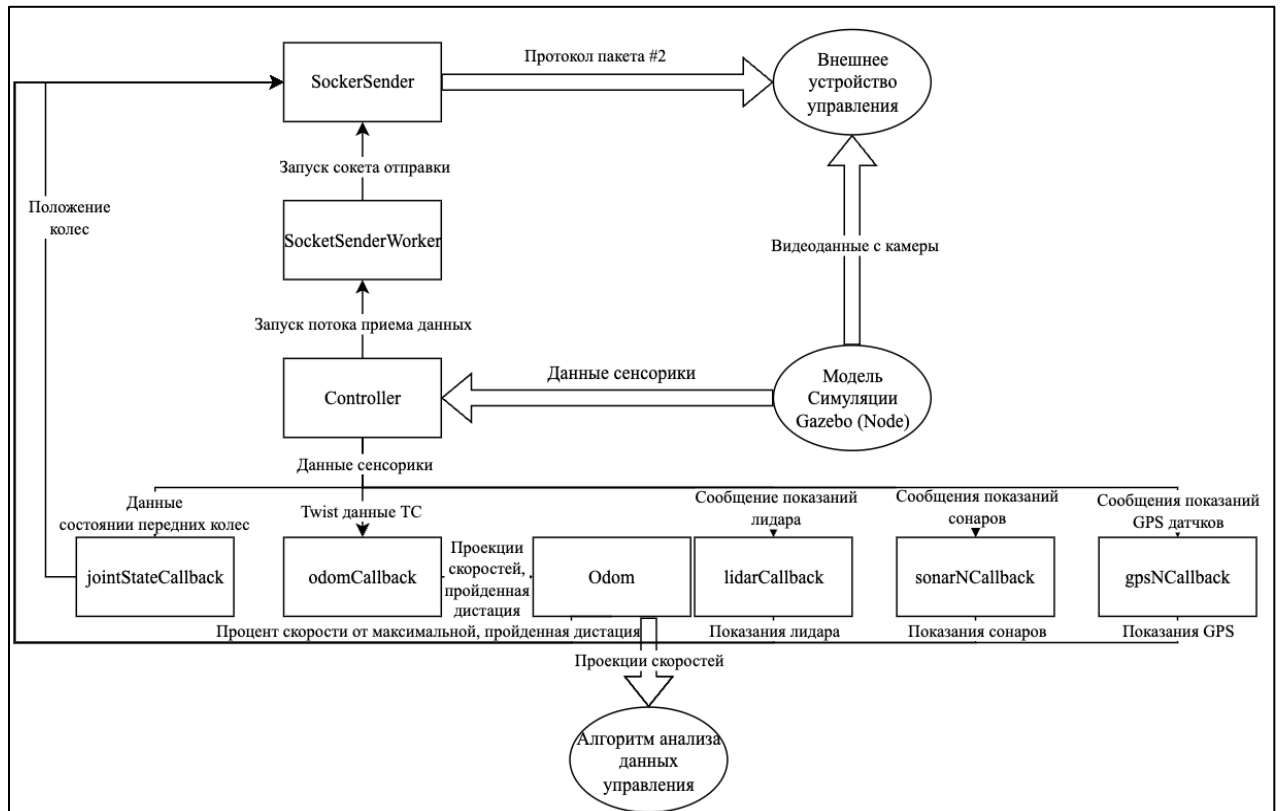


Рисунок 10 – Структурная схема блока обратной связи БСТС.

Для определения качества выполнения сценариев используются следующие критерии:

Максимальное отклонение от точек маршрутного задания:

$$\max_{dev} = \max(|x_{vi} - x_{ri}|, |y_{vi} - y_{ri}|), i = \overline{1..N}$$

СКО от точки маршрутного задания:

$$СКО = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N ((x_{vi} - x_{ri})^2 + (y_{vi} - y_{ri})^2)}$$

Проведена верификация алгоритма управления упрощенного автопилота БСТС в процессе движения по маршруту на открытой территории с препятствиями. На Рисунке 11 приведены примеры маршрутов, в Таблице 3 представлены результаты испытаний в виде максимальных отклонений ($\max_{dev}$) и средних квадратических отклонений (СКО) маршрутов движения реального и виртуального БСТС друг от друга.

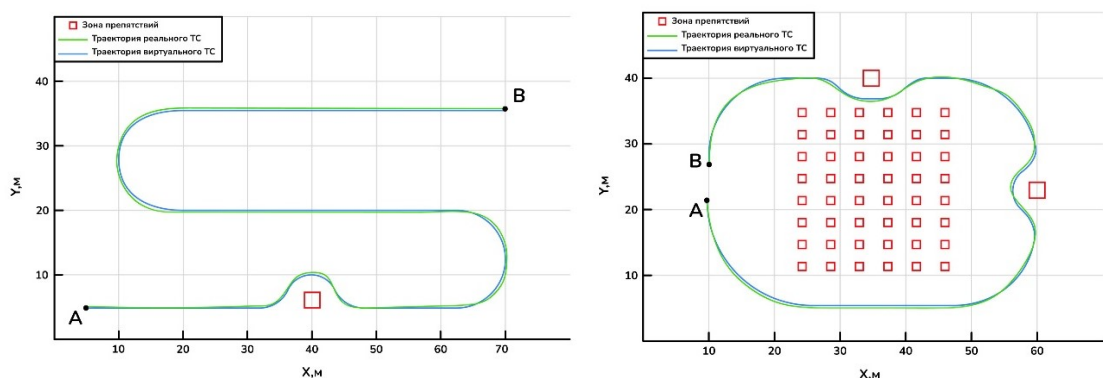


Рисунок 11 – Примеры маршрутов испытания БСТС.

Таблица 3 – Результаты испытаний движения реального и виртуального БСТС.

№	Длина маршрута (м)	Максимальное отклонение (м)	СКО (м)
1	154,3	0.324	0.106
2	167,6	0.345	0.109
3	501.6	1.047	0.308
4	544.8	0.905	0.294
5	1506,3	6.321	2.185

По результатам всех проведенных экспериментов наивысшее процентное соотношение максимального отклонения по отношению к общей длине траектории составляет 0,42%, а СКО по отношению к длине траектории: 0,14%. Полученные предельные значения отклонений позволяют говорить о верифицируемости проведенных натурных экспериментов виртуальными испытаниями и высокой достоверности разработанных шаблонов проектирования БСТС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Цель данной диссертационной работы заключалась в разработке и внедрении эффективных подходов разработки информационно-управляющих систем для БСТС с использованием современных методологий и технологий.

В рамках диссертации были получены следующие ключевые результаты:

1. Разработан универсальный шаблон проектирования беспилотных сельскохозяйственных транспортных систем, состоящий из **4** подсистем и **14** функциональных блоков.

2. Определены ключевые системные ограничения информационно-управляющих блоков беспилотной сельскохозяйственной техники:

- ограниченность ресурсов и строгая приоритезация задач **вычислительной подсистемы** (латентность срабатывания на уровне 0,5-1 сек; количество одновременно выполняемых задач не более 2-х).

- пропускная способность, латентность, джиттер, помехоустойчивость **подсистемы коммуникации и связи** (скорость связи без потери соединения не более 1-2 Мбит\с, латентность на уровне 300-400 мс, джиттер на уровне 20-50 мс).

- частота получения навигационных оценок, точность позиционирования, качество сигнала и количество наблюдаемых спутников **в подсистеме позиционирования и навигации** (частота получения навигационных оценок 1Гц, точность позиционирования – 2-3 метра, обеспечивается достаточное качество приема сигналов спутников исключительно на открытой местности, без заезда в укрытия гаражного\ангарного типа).

- скорость обработки данных, количество и качество различных распознаваемых объектов **в подсистеме машинного зрения** (количество обрабатываемых кадров – до 2 в секунду, количества одновременно анализируемых объектов – от 3 до 5; стабильная работа исключительно в условиях отсутствия засветки и неблагоприятных погодных явлений).

3. Определены методы снятия приведенных системных ограничений:

- вычислительная подсистема: использование операционной системы реального времени совместно с промышленными микроконтроллерами с приоритезацией задач с использованием расширения реального времени обеспечивает латентность срабатывания на уровне 0,05-0,1 сек с количеством одновременно выполняемых задач – до 14

с динамической регулировкой приоритетов (соответственно количеству функциональных блоков информационно-управляющей системы).

- система позиционирования и навигации: использование многоточечной системы инерциальной навигации одновременно с PPP-позиционированием и взаимной калибровкой показаний обеспечивает повышение частоты обновления навигационных оценок до 100 Гц с уменьшением СКО позиционирования до 0,1 метра. Одновременно с этим достигается функционирование системы навигации в полном автономе (в условиях недоступности навигационного созвездия спутников ГНСС) до 10-15 минут с точностью до 1,5% от пройденной траектории в указанном режиме.

- система связи: использование низколатентных профилей радиointерфейсов 5G одновременно с применением протокола помехоустойчивой связи без установления соединения позволяет радикально (в 10 и более раз) снизить количество разрывов (потерь пакетов, сопровождающих повреждения и-или комплексную потерю видеокadra) при скоростях передачи до 10-20 Мбит\с.

- машинное зрение: использование современных аппаратно-акселерированных нейросетей последнего поколения, оптимизированных по размеру видеопамати и разрешению совместно с унификацией условий наблюдения при помощи алгоритмов адаптивной нормализации видеопотока обеспечили увеличение показателя количества кадров обработки до 10 в секунду и количества одновременно анализируемых объектов от 15 до 20, в том числе при неблагоприятных условиях наблюдения (снег, дождь, туман, сумерки и пр.).

4. Разработана и детально описана методика виртуального проектирования БСТС, приведены аспекты создания виртуальных окружений, моделей транспортных средств, систем сенсорики и алгоритмов управления. По результатам проведенных полунатурных испытаний маршрутов движения реального и виртуального БСТС друг от друга наивысшее процентное соотношение максимального отклонения по отношению к общей длине траектории составляет 0,42%, а СКО по отношению к длине траектории: 0,14%.

Данные подходы демонстрируют превосходство разработанной системы по ряду ключевых аспектов по сравнению с существующими решениями. Кроме того, система способна функционировать в условиях низкой освещенности и ночного времени, а также в разнообразных метеорологических условиях. Эти результаты успешно применены в проектах по автоматизации тракторов, таких как Беларусь-112Н, Беларусь-3522.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК:

1. Основные принципы построения архитектур информационных систем беспилотных транспортных средств / Д.Е. Чикрин, П.А. Кокунин, Д.М. Пашин, И.Г. Галиуллин, Б.А. Тимершин // Известия СамНЦ РАН. – 2024. – № 4(26). – С. 131-142. – DOI 10.37313/1990-5378-2024-26-4-131-142 – EDN: DSGPOU.

2. Вопросы достоверного физического и визуального моделирования сложных технических систем беспилотной сельскохозяйственной техники на базе трактора Беларусь-3525 / И.Г. Галиуллин, П.А. Тимершин // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2024. – № 8. – С. 83-87. – DOI 10.37882/2223-2966.2024.8.13.

3. Моделирование и полунатурные испытания информационно-управляющих систем беспилотной сельскохозяйственной техники на базе трактора Беларусь-3525 / И. Г.

Галиуллин, Д.Е. Чикрин, Д.М. Пашин, А.Ф. Фахрутдинов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2024. – № 5. – С. 37-43. – DOI 10.37882/2223-2966.2024.05.07.

4. Программно-аппаратный комплекс сегментации препятствий с архитектурой U-Net для автономной сельскохозяйственной техники / И. Г. Галиуллин, Р. Ф. Сабилов, Д. Е. Чикрин, А. А. Егорчев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 3(233). – С. 46-55. – DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-46-55. – EDN TEXLOR.

5. Галиуллин, И. Г. Система автономного управления движением машинно-тракторного агрегата с использованием отечественной элементной базы / И. Г. Галиуллин // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2022. – № 6(110). – С. 92-98. – DOI 10.35330/1991-6639-2022-6-110-92-98. – EDN NZIISF.

6. Определение требований к вычислительному контуру БТС со стороны сенсорной периферии тракторного оценивания / Д.Е. Чикрин, И.Г. Галиуллин и др. // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева, №4. – 2024. – 7 с.

7. Документирование событий измерительной станции с помощью смарт-контрактов блокчейна / В.М. Балашов, И.Г. Галиуллин и др. // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева, №4. – 2024. – 8 с.

8. Русских М.Д., Сафина Л.Н., Тимершин Б.А., Чикрин Д.Е., Галиуллин И.Г., Кокуни П.А., Густов Е.С. Сравнение работы шахматного манипулятора и его цифрового двойника // Успехи современной радиоэлектроники. 2024. Т. 78. № 10. С. 41–49. – DOI 10.18127/j20700784-202410-05.

9. Вопросы герметизации и терморегулирования электронных систем в беспилотной сельскохозяйственной технике / И. Г. Галиуллин, Д. Е. Чикрин, Д. М. Пашин [и др.] // Вестник НЦБЖД. – 2024. – № 3(61). – С. 23-31. – EDN RYLHOW.

РИД, полученные по результатам исследований:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022665171 Российская Федерация. Программа низкоуровневой обработки данных сенсорики лидарного типа системы "Беспилотный трактор КФУ-МТЗ-112": № 2022661890: заявл. 27.06.2022: опубл. 11.08.2022 / Д. Е. Чикрин, А. А. Егорчев, И. Г. Галиуллин [и др.].

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022665990 Российская Федерация. Программа низкоуровневого управления системы "Беспилотный трактор КФУ-МТЗ-112": № 2022661910: заявл. 27.06.2022: опубл. 24.08.2022 / Д. Е. Чикрин, А. А. Егорчев, И. Г. Галиуллин [и др.].

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667314 Российская Федерация. Программный модуль поиска энергетических максимумов координатных переходов: № 2021666527: заявл. 20.10.2021: опубл. 27.10.2021 / Р. Ф. Сабилов, А. Р. Валиев, В. М. Медведев, И. Г. Галиуллин [и др.].

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667402 Российская Федерация. Программный модуль коррекции движения машинно-тракторного агрегата для движения параллельно обработанному участку поля: № 2021666850: заявл. 20.10.2021: опубл. 28.10.2021 / Р. Ф. Сабилов, А. Р. Валиев, В. М. Медведев, И. Г. Галиуллин [и др.].

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667403 Российская Федерация. Программное обеспечение удаленного управления

машинно-тракторным агрегатом: № 2021666842: заявл. 20.10.2021: опубл. 28.10.2021 / Р. Ф. Сабилов, А. Р. Валиев, В. М. Медведев, И. Г. Галиуллин [и др.].

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667404 Российская Федерация. Программный модуль распознавания борозды обработанного поля посредством оптического лидара: № 2021666837: заявл. 20.10.2021: опубл. 28.10.2021 / Р. Ф. Сабилов, А. Р. Валиев, В. М. Медведев, И. Г. Галиуллин [и др.].

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667448 Российская Федерация. Программный модуль управления механическими узлами машинно-тракторного агрегата: № 2021666526: заявл. 20.10.2021: опубл. 29.10.2021 / Р. Ф. Сабилов, А. Р. Валиев, В. М. Медведев, И. Г. Галиуллин [и др.].

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667510 Российская Федерация. Программный модуль построения маршрута машинно-тракторного агрегата: № 2021666903: заявл. 25.10.2021: опубл. 29.10.2021 / Р. Ф. Сабилов, А. Р. Валиев, В. М. Медведев, И. Г. Галиуллин [и др.].

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667661 Российская Федерация. Программный модуль сегментации объектов препятствий дерево и столб на основе нейронных сетей: № 2021666528: заявл. 20.10.2021: опубл. 01.11.2021 / Р. Ф. Сабилов, А. Р. Валиев, В. М. Медведев, И. Г. Галиуллин [и др.].

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667845 Российская Федерация. Программный модуль распознавания борозды обработанного поля посредством камеры видимого диапазона: № 2021667021: заявл. 26.10.2021: опубл. 03.11.2021 / Р. Ф. Сабилов, А. Р. Валиев, В. М. Медведев, И. Г. Галиуллин [и др.].

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668192 Российская Федерация. Программный модуль объезда единичного препятствия машинно-тракторного агрегата: № 2021666619: заявл. 20.10.2021: опубл. 10.11.2021 / Р. Ф. Сабилов, А. Р. Валиев, В. М. Медведев, И. Г. Галиуллин [и др.].

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668265 Российская Федерация. Программный модуль движения машинно-тракторного агрегата по заданным спутниковым координатам по модели схождения азимутов: № 2021666617: заявл. 20.10.2021: опубл. 11.11.2021 / Р. Ф. Сабилов, А. Р. Валиев, В. М. Медведев, И. Г. Галиуллин [и др.].

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668266 Российская Федерация. Программный модуль деления облака точек поверхности на слои: № 2021666615: заявл. 20.10.2021: опубл. 11.11.2021 / Р. Ф. Сабилов, А. Р. Валиев, В. М. Медведев, И. Г. Галиуллин [и др.].