

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОЛУНАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ НА БАЗЕ ТРАКТОРА БЕЛАРУС-3525¹

MODELING AND SEMI-NATURAL TESTING OF INFORMATION-CONTROL SYSTEMS FOR UNMANNED AGRICULTURAL MACHINERY BASED ON THE BELARUS-3525 TRACTOR

**I. Galilulin
D. Chikrin
D. Pashin
A. Fahrutdinov**

Summary. In modern agriculture, automation plays a crucial role in enhancing the efficiency and accuracy of agricultural operations. One significant achievement in this field is the development of heavy-duty unmanned tractors equipped with information-control systems. This article focuses on the modeling and semi-natural testing of such systems using unmanned agricultural machinery based on the «Belarus-3525» tractor as a case study.

The introduction of unmanned tractors provides new opportunities for automating soil cultivation, sowing, and harvesting operations. They are equipped with advanced information-control systems that enable interaction with the environment and task execution with minimal human involvement. However, before implementation in real-world conditions, thorough modeling and testing of control systems on virtual and semi-natural test sites are necessary.

The article discusses the process of modeling information-control systems for unmanned agricultural machinery based on the «Belarus-3525» tractor and their semi-natural testing. Special attention is paid to creating a virtual environment capable of simulating various tractor operation scenarios, testing control systems and algorithms, and conducting tests in different conditions, including extreme and inaccessible for physical testing. The obtained results will allow for a more comprehensive assessment of the performance of unmanned tractors and their information-control systems, as well as optimization of their functioning in real operating conditions.

Keywords: autonomous tractor, modeling, virtual simulation, Gazebo, control mode testing.

Галиуллин Искандер Гаязович

соискатель,

Казанский (Приволжский) федеральный университет

isgaliullin@gmail.com

Чикрин Дмитрий Евгеньевич

д.т.н., Казанский (Приволжский)

федеральный университет

dmitry.kfu@ya.ru

Пашин Дмитрий Михайлович

д.т.н., Казанский (Приволжский)

федеральный университет

dmitry.m.pashin@gmail.com

Фахрутдинов Адель Фердинандович

аспирант, ассистент, Казанский (Приволжский)

федеральный университет

timvaz@yandex.ru

Аннотация. В современном сельском хозяйстве автоматизация играет ключевую роль в повышении эффективности и точности выполнения сельскохозяйственных операций. Одним из существенных достижений в этой области является разработка беспилотных тракторов тяжелого класса, оборудованных информационно-управляющими системами. Данная статья посвящена моделированию и полунатурным испытаниям таких систем на примере беспилотной сельскохозяйственной техники на базе трактора «Беларус-3525». Введение беспилотных тракторов предоставляет новые возможности в автоматизации операций по обработке почвы, посеву и уборке урожая. Они оснащены современными информационно-управляющими системами, которые обеспечивают взаимодействие с окружающей средой и выполнение задач с минимальным человеческим участием. Однако перед внедрением в реальные условия необходимо провести тщательное моделирование и испытания систем управления на виртуальных и полунатурных полигонах.

В статье рассматривается процесс моделирования информационно-управляющих систем беспилотной сельскохозяйственной техники на базе трактора «Беларус-3525» и их полунатурные испытания. Особое внимание уделяется созданию виртуальной среды, позволяющей моделировать различные сценарии работы трактора, тестировать управляющие системы и алгоритмы, а также проводить испытания в различных условиях, включая экстремальные и недоступные для физических испытаний. Полученные результаты позволят более полно и всесторонне оценить работу беспилотного трактора и его информационно-управляющих систем, а также оптимизировать их функционирование в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: беспилотный трактор, моделирование, виртуальная симуляция, Gazebo, испытания режимов управления.

¹ Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Введение

В современном мире технологический прогресс приводит к внедрению автоматизированных и беспилотных систем в различные области промышленности. Одной из таких областей является сельское хозяйство [1], где применение беспилотных тракторов тяжелого класса может значительно повысить эффективность и производительность работы.

Традиционные методы ведения сельского хозяйства требуют значительных ресурсов в виде времени, труда и финансовых затрат. Внедрение беспилотных тракторов позволяет автоматизировать рутинные задачи, такие как пахота, посевы и уборка урожая, и освободить человеческий ресурс для выполнения более сложных и креативных задач.

В данной работе проведены исследования по моделированию системы беспилотного трактора тяжелого класса. Проведение испытаний режимов управления на виртуальном полигоне имеет важное значение — это позволяет оценить эффективность и надежность системы, а также снизить риски и затраты, связанные с физическими испытаниями на реальном полигоне.

Целью данного исследования является разработка и моделирование системы беспилотного трактора тяжелого класса в виртуальной среде Gazebo и проведение полунатурных испытаний режимов управления.

Основные задачи исследования включают:

1. Изучение пакета Gazebo и его применение в моделировании тракторов.
2. Выбор и адаптация моделей трактора и окружающей среды в виртуальной симуляции.
3. Создание управляющей системы и алгоритмов для беспилотного трактора в виртуальной среде.
4. Интеграция датчиков и актуаторов в виртуальной среде для достижения реалистичных условий испытаний.
5. Проведение испытаний режимов управления.
6. Анализ результатов испытаний и оценка эффективности и точности моделирования системы.
7. Исследование перспектив применения виртуальной симуляции для разработки беспилотных тракторов тяжелого класса.

Путем выполнения этих задач и достижения поставленной цели исследования будет получен ценный вклад в развитие автономных систем в сельском хозяйстве и предоставлены рекомендации для дальнейших исследований и разработок в этой области.

Основные результаты

Одним из популярных инструментов для виртуальной симуляции является пакет Gazebo[2]. Gazebo предо-

ставляет среду для моделирования и симуляции различных робототехнических систем [3], включая тракторы. Он предоставляет возможность создания виртуальной модели трактора, адаптации окружающей среды, интеграции датчиков и актуаторов, разработки управляющих систем и алгоритмов. Gazebo обладает широким набором инструментов для анализа результатов и визуализации работы системы [4]. Благодаря своей гибкости и расширяемости, Gazebo становится популярным инструментом в разработке и испытаниях беспилотных тракторов тяжелого класса.

Первым шагом в моделировании системы беспилотного трактора в Gazebo является выбор и адаптация моделей самого трактора и окружающей среды [5]. Необходимо выбрать подходящую модель трактора, которая соответствует его физическим характеристикам и особенностям. Для окружающей среды необходимо создать модель, которая отражает реалистичные условия работы трактора, включая различные типы почвы, ландшафтные особенности и препятствия.

Для беспилотного трактора необходимо разработать эффективную управляющую систему и алгоритмы, которые будут отвечать за принятие решений и выполнение задач. В Gazebo можно создать виртуальную модель управляющей системы, которая будет взаимодействовать с моделью трактора и окружающей средой [6]. Разработка алгоритмов включает в себя управление движением трактора, выполнение операций обработки почвы или уборки урожая, а также управление датчиками и актуаторами.

Для достоверного моделирования беспилотного трактора необходимо интегрировать датчики и актуаторы в виртуальной среде Gazebo[7]. Датчики, такие как камеры, лидары или глобальная позиционная система (GPS), должны быть адаптированы и встроены в модель трактора. Актуаторы, такие как двигатели и механизмы управления рабочими органами, должны быть связаны с моделью трактора таким образом, чтобы их действия были отражены в виртуальной среде [8]. Это позволит симулировать работу датчиков и актуаторов и проверить их эффективность в контролируемой среде моделирования.

Моделирование системы беспилотного трактора в Gazebo представляет собой сложный процесс, требующий тщательной работы по выбору моделей, разработке управляющей системы и интеграции датчиков и актуаторов [9]. Однако, благодаря возможностям Gazebo, можно достичь достоверного и эффективного моделирования [10] системы беспилотного трактора перед физической реализацией. Для построения симуляции и реализации управления было принято решение строить систему на базе взаимодействия Gazebo с операционной систе-

мой роботов ROS. ROS представляет собой совокупность библиотек, который в первую очередь позволяют выполнять моделирование как робототехнических систем, так и любой другой техники. Данная экосистема позволяет легко разрабатывать проекты симуляции для Gazebo, а также реализовывать механизмы управления моделями симуляции. Модель трактора была разработана с использованием файла описания модели SDF (Simulation Description Format), который построен на основе формата XML. Файл SDF позволяет полноценно описать модели робототехнических систем для симуляции, визуализации и контроля.

Разработанная модель трактора имеет следующую структуру:

— Звенья (Link):

- Каркас;
- Левое переднее колесо;
- Правое переднее колесо;
- Левое заднее колесо;
- Правое заднее колесо;
- Лидар;
- Камера;
- GPS датчик фронтальный;
- GPS датчик тыльный;
- Крепеж фронтальной рейки;
- Фронтальная рейка;
- Крепеж задней рейки;
- Задняя рейка;
- Фронтальный сонар 1;
- Фронтальный сонар 2;
- Фронтальный сонар 3;
- Фронтальный сонар 4;
- Тыльный сонар 1;
- Тыльный сонар 2;
- Тыльный сонар 3;
- Тыльный сонар 4.

— Соединения (Joint):

- Соединитель фиксированного типа между каркасом и камерой;
- Соединитель фиксированного типа между фронтальной рейкой и лидаром;
- Соединитель фиксированного типа между фронтальной рейкой и фронтальным сонаром 1;
- Соединитель фиксированного типа между фронтальной рейкой и фронтальным сонаром 2;
- Соединитель фиксированного типа между фронтальной рейкой и фронтальным сонаром 3;
- Соединитель фиксированного типа между фронтальной рейкой и фронтальным сонаром 4;
- Соединитель фиксированного типа между тыльной рейкой и тыльным сонаром 1;
- Соединитель фиксированного типа между тыльной рейкой и тыльным сонаром 2;
- Соединитель фиксированного типа между тыльной рейкой и тыльным сонаром 3;

- Соединитель фиксированного типа между тыльной рейкой и тыльным сонаром 4;
- Соединитель фиксированного типа между крепежом фронтальной рейки и каркасом;
- Соединитель фиксированного типа между крепежом тыльной рейки и каркасом;
- Соединитель фиксированного типа между фронтальной рейкой и крепежом фронтальной рейки;
- Соединитель фиксированного типа между тыльной рейкой и крепежом тыльной рейки;
- Соединитель фиксированного типа между фронтальным датчиком GPS и каркасом;
- Соединитель фиксированного типа между тыльным датчиком GPS и каркасом;
- Соединитель универсального типа между каркасом и левым передним колесом;
- Соединитель универсального типа между каркасом и правым передним колесом;
- Соединитель вращательного типа между каркасом и левым задним колесом;
- Соединитель вращательного типа между каркасом и правым задним колесом.

— Плагины (Plugin):

- Ackermann Drive — предназначен для построения колесных моделей с использованием принципа Аккермана в рулевом управлении;
- Joint State Publisher — предназначен для информирования о состоянии соединений в модели;
- ROS ray sensor — плагин, предназначенный для реализации лидаров и сонаров;
- ROS camera — плагин, предназначенный для работы с камерами, устанавливаемые на модель
- ROS GPS sensor — плагин, предназначенный для работы с датчиками GPS.

После создания SDF модели описания трактора был создан проект симуляции ROS — Gazebo. Программная часть проекта симуляции реализована на языке программирования Python 3.8. Проект симуляции имеет следующую структуру:

- Файл запуска («launch» файл) — данный файл выполняет задачу запуска проекта симуляции в Gazebo используя путь к файлу мира и путь к пакету симуляции (проекту симуляции), а также выполняет запуск скрипта инициализации («setup» файл) всех элементов (узлов — «Node») в мире симуляции по аргументам, передаваемых при создании узлов. Файлы запуска имеют формат «.py»;
- Модели симуляции — содержит в себе описание используемых моделей, в том числе описанный ранее SDF модель трактора и его визуальную 3D модель в формате «.dae», а также текстуры модели;
- Файл мира — описывает мир, в котором будет выполняться симуляция. В данном файле описа-

ны поверхности, на которых будут размещаться модели, создаваемые при симуляции. Также файл содержит описание физики окружающего мира, качество и направление освещения, описание поведения теней, а так описание статических и динамических размещаемых объектов мира. Файл мира имеет формат «.world»;

- Файл инициализации («setup» файл) — выполняет непосредственное создание в мире симуляции узлов, необходимых для работы симуляции. Таким узлом в данной работе является разработанная модель трактора. Для модели задаются начальные позиционные координаты в системе координат XYZ, а также начальные углы крена, тангажа и рыскания.

Трактор тяжелого класса, полученный в результате собранной модели в Gazebo показан на на Рисунке 1.



Рис. 1. Моделирование системы беспилотного трактора тяжелого класса

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 2.

Для разработки алгоритмов управления виртуального трактора был использован язык программирования Python 3.10 с использованием компонентов PyQt для обеспечения взаимодействия между частями программы. Алгоритм состоит из компонентов — блок управления, блок обратной связи виртуального трактора (Рисунок 3).

Критерии оценивания результатов виртуального моделирования и сравнение с результатами натуральных испытаний

Для определения качества выполнения сценариев используются следующие критерии:

- Максимальное отклонение от точек маршрутного задания;
- СКО от точки маршрутного задания;

Формула вычисления максимальных отклонений:

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

где N — количество геолокационных точек;

x_{vi}, y_{vi} — координаты i -ой точки местоположения БСТС на виртуальном полигоне;

x_{ri}, y_{ri} — координаты i -ой точки местоположения реального БСТС;

Формула вычисления СКО:

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

где N — количество геолокационных точек;

x_{vi}, y_{vi} — координаты i -ой точки местоположения ТС на виртуальном полигоне;

x_{ri}, y_{ri} — координаты i -ой точки местоположения реального ТС.

Цель проведения испытаний заключается в верификации алгоритма управления упрощенного автопилота трактора тяжелого класса в процессе движения по маршруту на открытой территории с препятствиями. На Рисунке 4 приведены примеры маршрутов, в Таблице 1 представлены результаты испытаний в виде максимальных отклонений (\max_{dev}) и средних квадратических отклонений (СКО) маршрутов движения реального и виртуального трактора друг от друга.

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 %.

Выводы

В ходе исследования было проведено моделирование системы беспилотного трактора тяжелого класса в пакете Gazebo. В результате сделаны следующие выводы:

- Моделирование системы беспилотного трактора в виртуальной среде Gazebo позволяет эффективно и точно анализировать и испытывать режимы управления без необходимости физической реализации.
- Использование адаптированных моделей трактора и окружающей среды в Gazebo позволяет достоверно воспроизвести условия работы трактора и оценить его производительность.
- Разработанная управляющая система и алгоритмы позволяют беспилотному трактору выполнять задачи с высокой эффективностью и точностью.

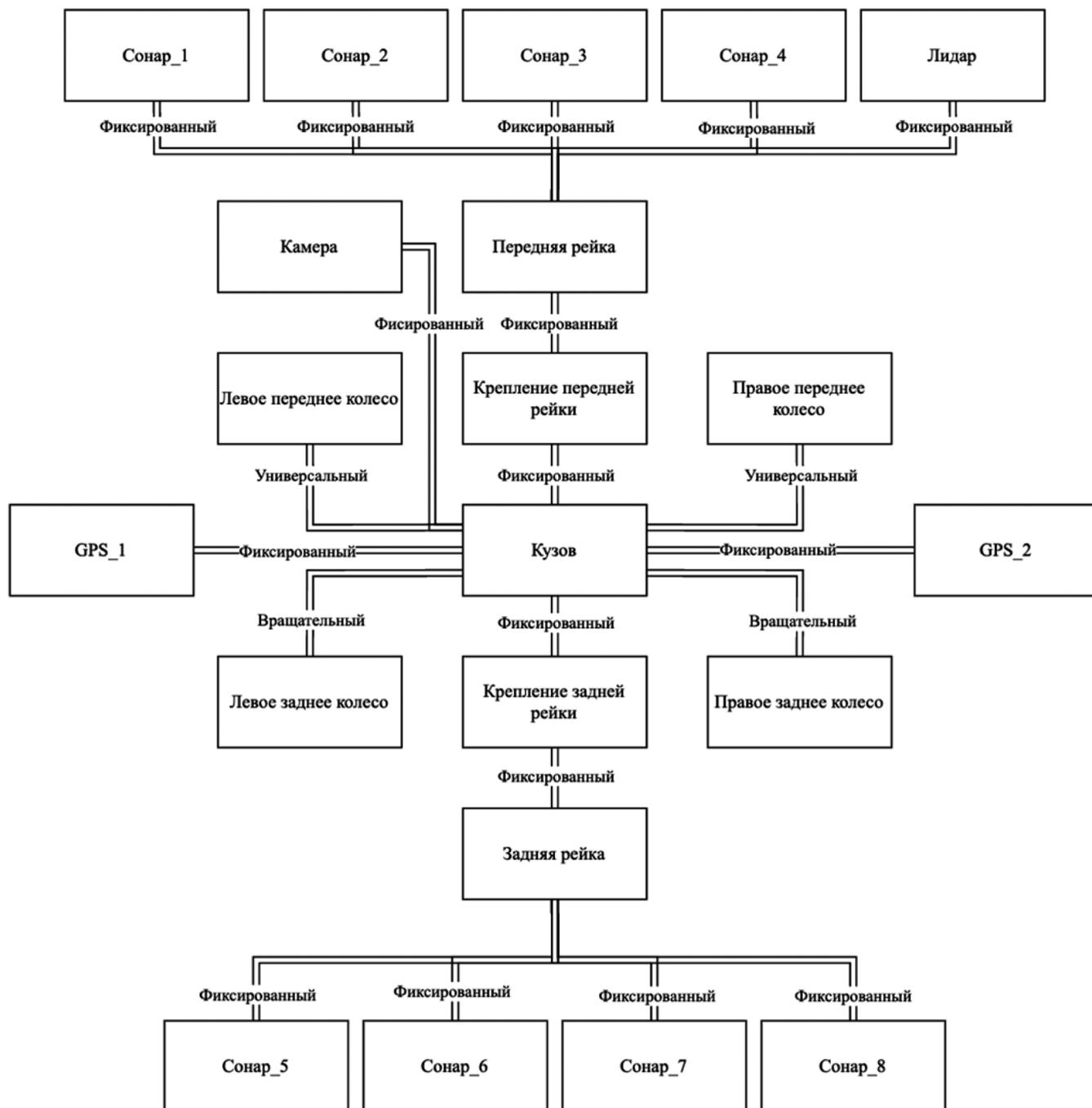


Рис. 2. Структурная схема виртуального трактора тяжелого класса с установленной сенсорикой с указанием типа соединений между звеньями

На основании проведенного исследования предлагаются следующие рекомендации для дальнейших исследований и разработок:

- Исследовать возможности расширения модели трактора и окружающей среды для более реалистичного моделирования различных условий работы и ландшафтных особенностей.
- Расширить функциональность управляющей системы и алгоритмов, включая управление в различных режимах и адаптацию к переменным условиям.

- Исследовать возможности интеграции более широкого спектра датчиков и актуаторов для более полного моделирования работы беспилотного трактора.
- Продолжить исследования в области оптимизации и автоматизации процессов моделирования и испытаний в виртуальной среде Gazebo.
- Рекомендации выше помогут продолжить развитие и улучшение моделирования системы беспилотного трактора в Gazebo, а также применить его для более широкого спектра задач и сценариев.

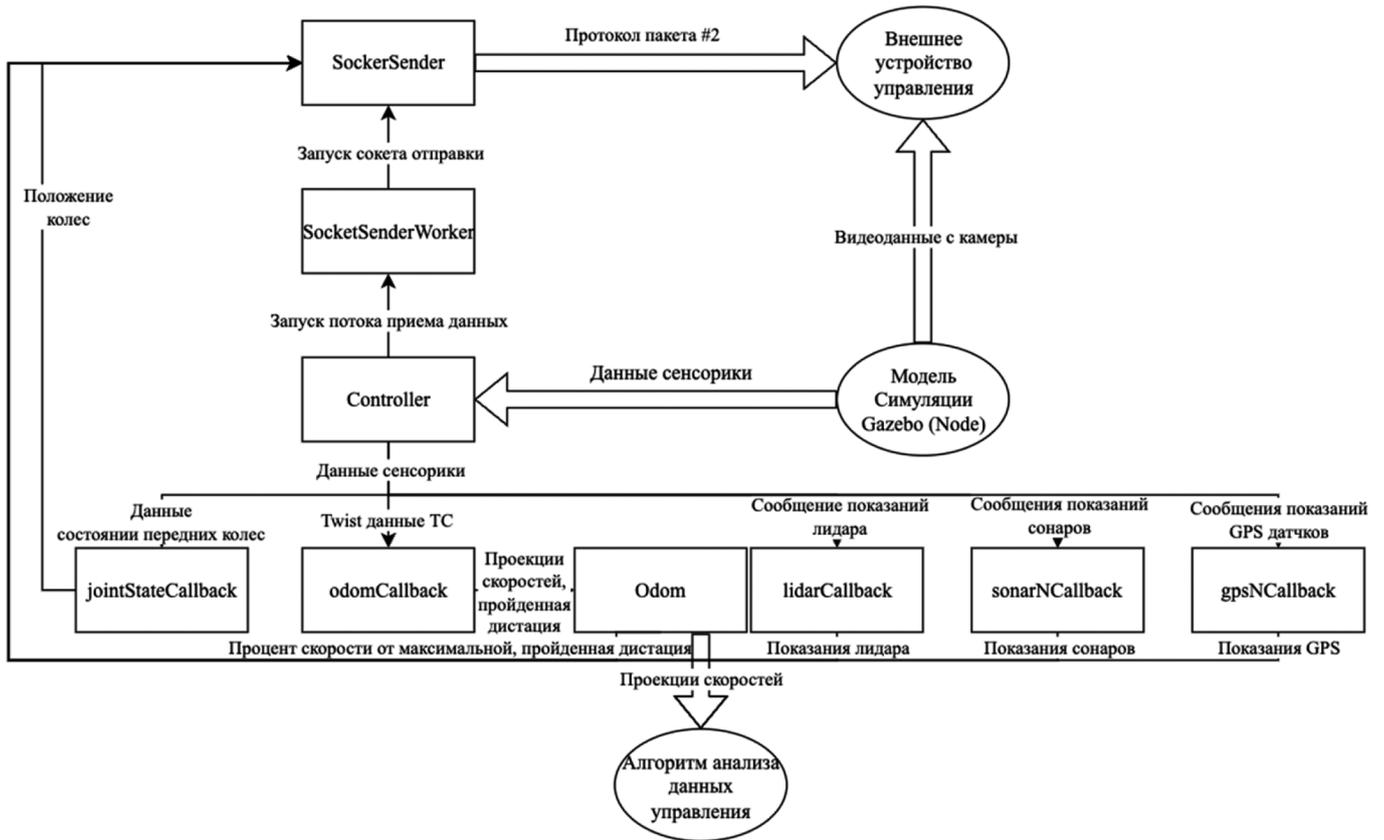


Рис. 3. Структурная схема блока обратной связи беспилотного трактора.

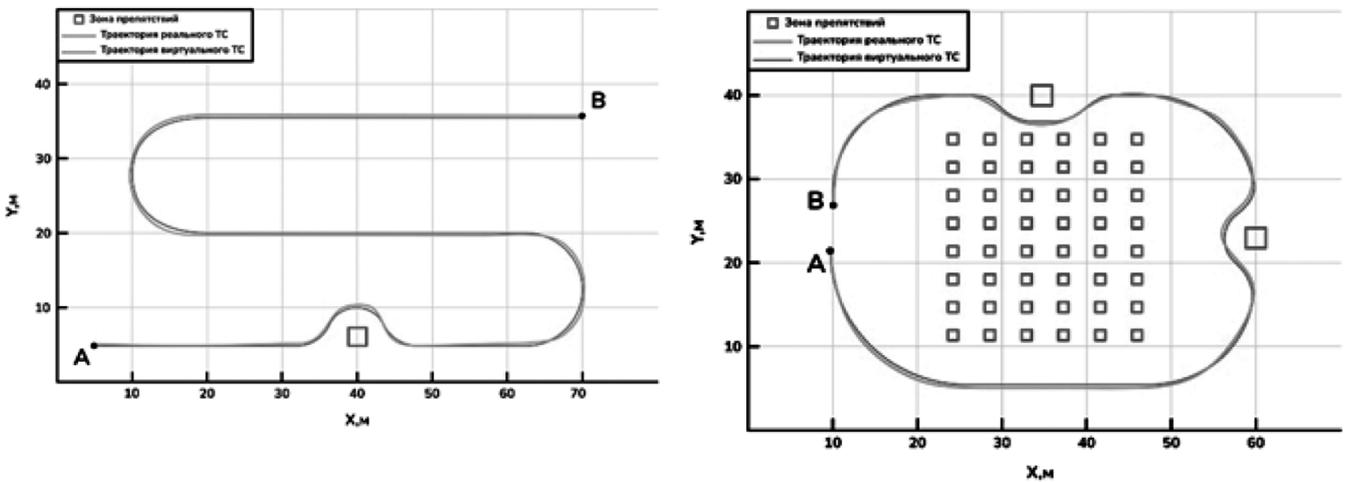


Рис. 4. Примеры маршрутов испытаний.

Таблица 1.

Результаты испытаний движения реального и виртуального трактора

№	Длина маршрута (м)	Максимальное отклонение (м)	СКО (м)
1	182,4	0.381	0.112
2	198,1	0.329	0.107
3	154,3	0.324	0.106
4	167,6	0.345	0.109
5	64,1	0.269	0.093

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Gazebo Simulator [сайт]. Режим доступа: <http://gazebo.org/>, свободный (дата обращения: 15.06.2023).
3. Чикрин, Д.Е. Методологические основы проектирования инфокоммуникационных систем автомобильных транспортных средств высокой степени автоматизации: дис. . . . д-ра техн. наук, 05.13.01. — Казань, 2021. — 399с.
4. Егорчев А.А. Верифицируемые системы виртуального моделирования беспилотных транспортных средств: дис. . . . канд. техн. наук, 05.13.01. — Казань, 2021. — 340с.
5. Egorchev A. Chickrin D. Methodology and model of unmanned vehicles virtual simulation. // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2020. Vol. 12. Iss. 6. 1316 pp. doi: 10.5373/JARDCS/V12I2/S20201324.
6. Свалова И.Е. Виртуальное физическое моделирование технических средств и климатических явлений в задачах симуляции сложных технических систем: магистерская дисс. — Казанский (Приволжский) федеральный ун-т, Казань, 2018. — С. 19–35. — URL: https://kpfu.ru/student_diplom/10.160.178.20_6430347_F_VKR_Svalova_I_E.pdf (дата обращения: 16.06.2023).
7. Егорчев А.А., Чикрин Д.Е., Бриский Д.В. Решение задач виртуального моделирования показаний системы сенсорики в системах беспилотного транспорта. // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и технические науки. 2020. №7. С. 74–81.
8. Чикрин Д.Е., Егорчев А.А., Свалова И.Е., Державин Д.В. Виртуальное физическое и визуальное моделирование работы механических элементов технических систем // Перспективы науки. 2018. №3(102). С. 25–32.
9. Multi-robot coalition formation for precision agriculture scenario based on gazebo simulator / N. Teslya, A. Smirnov, A. Ionov, A. Kudrov // Smart Innovation, Systems and Technologies. — 2021. — Vol. 187. — P. 329–341. — DOI 10.1007/978-981-15-5580-0_27. — EDN RDIADH.
10. Simulation Components in Gazebo / I. Peake, J. La Delfa, R. Bejarano, J. O. Blech // Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology: 22, Valencia, 10–12 марта 2021 года. — Valencia, 2021. — P. 1169–1175. — DOI 10.1109/ICIT46573.2021.9453594. — EDN DJJZSN.

© Галиуллин Искандер Гаязович (isgaliullin@gmail.com); Чикрин Дмитрий Евгеньевич (dmitry.kfu@ya.ru);
Пашин Дмитрий Михайлович (dmitry.m.pashin@gmail.com); Фахрутдинов Адель Фердинандович (timvaz@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»