

На правах рукописи



СУХАРЕВ Роман Юрьевич

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ
КОЛЕСНЫМИ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ**

Специальность 2.5.11 – «Наземные транспортно-технологические
средства и комплексы»

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени доктора технических наук

Омск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

Научный консультант:

КОРЧАГИН Павел Александрович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», проректор по научной работе и цифровой трансформации (г. Омск).

Официальные оппоненты:

ЖУЛАЙ Владимир Алексеевич

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Кафедра строительной техники и инженерной механики имени профессора Н.А. Ульянова» (г. Воронеж);

СЛАДКОВА Любовь Александровна

доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства (г. Москва);

ВАХИДОВ Умар Шахидович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины» (г. Нижний Новгород).

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Защита состоится 30 июня 2023 г. в 14-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета ВАК РФ 99.2.109.02 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения «Омский государственный технический университет», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира, 5, ауд. 2.351. Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: iateterina@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СибАДИ» и на сайте университета по адресу: <https://sibadi.org/about/units/institut-magistrature-i-aspirantury/studies/dissertations/66688/>; в библиотеке ФГАОУ ВО «ОмГТУ» и на сайте университета по адресу: https://www.omgtu.ru/scientific_activities/dissertatsionnye_sovety/obyavleniya_o_zashchite_dissertatsiy_i_dokumenty_k_nim/sukharev-r-yu.php

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира, 5, ауд. 1.107. Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: iateterina@mail.ru.

Автореферат разослан «07» апреля 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук



Тетерина
Ирина Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Строительство автомобильных дорог – это сложный, многоэтапный процесс. При строительстве применяется большой парк колесных дорожно-строительных машин (ДСМ). Стоимость строительства дорог в России связана с применением ручного труда и достаточно высока. Одним из путей ее снижения является повышение эффективности ДСМ.

Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года предполагает развитие скоростных и высокоскоростных путей сообщения – автомагистралей 1 категории. К строительству дорог данной категории применяются самые высокие требования по точности. Выполнение данных требований сопряжено с большими трудностями в виду ограниченной точности самой ДСМ, отсутствия бортовых систем контроля и ограниченных возможностей человека-оператора (ЧО), который не в состоянии «на глаз» определить требуемые точностные параметры возводимого сооружения. Одновременное слежение за положением РО, курсом движения и скоростью машины приводят к снижению качества выполняемых работ, увеличению числа исправлений.

Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года в разделе «Транспортные и космические системы» ставит актуальную задачу – снижение затрат, повышение эффективности строительства и содержания объектов инфраструктуры, рост производительности труда.

Для решения поставленных актуальных задач целесообразно применять современные системы управления (СУ) ДСМ, которые берут на себя заботу о соблюдении требований, предъявляемых к возводимому сооружению.

На сегодняшний день на рынке представлено некоторое количество СУ иностранного производства, функционирующих на различных принципах, выполненных на схожей элементной базе. Однако данные СУ осуществляют управление только РО ДСМ, в то время как курсом движения и скоростью продолжает управлять ЧО.

Развитие микропроцессорной и компьютерной техники, приборов и средств контроля и измерения в последнее время дает большое поле для совершенствования существующих СУ и создания принципиально новых систем автономного управления ДСМ, исключая участие человека в рабочем процессе ДСМ.

Применение подобных систем автономного управления ДСМ позволит снизить долю ручного труда на всех этапах строительства и ремонта, от геодезических изысканий до приемо-сдаточных работ, снизить количество исправлений и доделок, снизить себестоимость производства работ и осуществлять проектирование и строительство дорог с использованием BIM-технологий, что приводит к появлению «цифрового двойника» возводимого объекта, который можно использовать на протяжении всего жизненного цикла.

Однако в настоящее время отсутствуют необходимые научные основы для создания новых систем автономного управления отечественного производства. Таким образом, актуальным направлением исследований является разработка методологии автономного управления ДСМ для создания перспективных систем управления, которые позволят осуществлять рабочий процесс ДСМ без участия ЧО.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в развитие вопросов эффективного управления ДСМ внесли разработки отечественных ученых Т.В. Алексеевой, В.Ф. Амельченко, В.И. Баловнева, А.М. Васьковского, В.С. Дегтярева, В.П. Денисова, Ю.М. Княжева, Б.Д. Кононыхина, П.А. Корчагина, Э.Н. Кузина, Е.Ю. Малиновского, В.А. Мещерякова, В.Н. Тарасова, Н.А. Ульянова, А.М. Холодова, В.С. Щербакова и др. Вопросами оптимального управления сельскохозяйственными машинами занимались такие ученые как Калоев А.В., Поддубный В.И. и др. Вопросами управления мобильными роботами и автомобилями занимались зарубежные ученые О. Amidi, R.C. Coulter, O. Ringhdal, M.J. Barton, J.M. Snider, Y. Wu, Z. Xie, Y. Lu, K. Fue, W. Porter, E. Barnes, C. Li, G. Rains и др.

Цель работы: решение научной проблемы повышения эффективности работы колесных ДСМ путем разработки научных основ и методов автономного управления.

Объект исследования: рабочий процесс формирования земляного сооружения колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления.

Предмет исследования: закономерности, устанавливающие связь между конструктивными и эксплуатационными параметрами колесной ДСМ, параметрами системы автономного управления и критерием эффективности.

Научная гипотеза состоит в том, что разработка научных основ и методов автономного управления колесными ДСМ позволит создать принципиально новый класс систем автономного управления и повысить эффективность работы колесных ДСМ.

Задачи исследований. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Предложить концепцию автономного управления колесными ДСМ на основе классификации ДСМ, анализа рабочего процесса и идентификации функций ЧО.

2. Провести классификацию существующих СУ ДСМ и определить перспективы создания систем нового класса.

3. Предложить методику оценки эффективности работы колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления.

4. Разработать математическую модель сложной динамической системы рабочего процесса колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления, позволяющую моделировать требуемые траектории движения ДСМ при формировании земляного полотна с различным расположением РО.

5. Разработать методологию автономного управления и построения траек-

торий движения с учетом кинематических ограничений колесных ДСМ.

6. Установить зависимости между конструктивными, эксплуатационными параметрами ДСМ, параметрами системы автономного управления и критерием эффективности при формировании земляного полотна колесной ДСМ.

7. Сформулировать практические рекомендации и технические решения для создания перспективных систем автономного управления колесными ДСМ на основе обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Методика исследований носит комплексный характер, содержит как теоретические, так и экспериментальные исследования. Задачами теоретических исследований являлось выявление основных закономерностей, связывающих принятый критерий эффективности и параметры системы управления ДСМ. Задачами экспериментальных исследований являлось подтверждение адекватности математической модели рабочего процесса ДСМ; определение численных значений параметров, необходимых для расчета коэффициентов математических моделей. При экспериментальных исследованиях использовался метод как активного, так и пассивного эксперимента.

Научная новизна:

1. Предложена концепция автономного управления колесными ДСМ, идентифицированы функции, которые должна выполнять перспективная система автономного управления, разработана блок-схема рабочего процесса ДСМ с перспективной системой автономного управления.

2. Предложена классификация существующих систем управления ДСМ на основе идентификации функций управления, в которую добавлен класс перспективных систем автономного управления.

3. Разработана математическая модель сложной динамической системы рабочего процесса ДСМ, включающая в себя подсистемы: микрорельеф, базовая машина, РО – обрабатываемая среда, гидропривод РО, ГРУ, ходовое оборудование, силовая установка и система автономного управления, позволяющая моделировать требуемые траектории движения ДСМ при формировании земляного полотна с различным расположением РО относительно базы машины.

4. Разработан метод построения траектории движения, учитывающий кинематические ограничения колесных ДСМ.

5. Научно обоснован термин «вектор состояния ДСМ», представляющий собой вектор координат ДСМ и ее частей, необходимых и достаточных для информационного обеспечения методологии автономного управления колесными ДСМ.

6. Проведена модификация метода «чистое преследование» путем введения нового параметра – скорости. Получена новая функциональная зависимость оптимальных значений параметра «дальность видимости» от конструктивных и эксплуатационных параметров колесной ДСМ ($L_0 = a_0 \cdot V + a_1$), что позволило повысить точность метода при управлении колесной ДСМ.

7. Проведена адаптация метода «Стэнли» для управления колесной ДСМ. Получена новая функциональная зависимость оптимальных значений коэффициента усиления метода «Стэнли» от конструктивных и эксплуатационных параметров колесной ДСМ ($k = -349,9 + 582,3 \cdot K_{\sigma} + 58,98 \cdot L$).

8. Разработан новый копирный метод управления колесной ДСМ, точность которого в среднем на 23% лучше метода «чистое преследование», и в среднем на 54% лучше метода «Стэнли». Получены функциональные зависимости оптимальных значений параметров разработанного копирного метода управления от конструктивных и эксплуатационных параметров колесной ДСМ ($k_v = V^5(1,7856 + 1,085 \cdot K_{\sigma} - 0,1308 \cdot L) + (1,247 - 0,7772 \cdot K_{\sigma} + 0,1154 \cdot L)$, $L_0 = 1,77 \cdot V + (3,55 - 8,2 \cdot K_{\sigma} + 0,71 \cdot L)$).

Теоретическая и практическая значимость работы состоит:

- в предложенной классификации существующих систем управления ДСМ на основе идентификации функций управления, в которую введен новый класс систем автономного управления;

- в разработанном методе построения траектории ДСМ, учитывающем кинематические ограничения колесных ДСМ, координаты путевых точек и азимуты направления дальнейшего движения ДСМ и созданной на его базе программе для ЭВМ «Модуль построения траектории движения дорожно-строительной машины» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022612587);

- в разработанном методе моделирования трехмерного микрорельефа для теоретических исследований ДСМ и созданной на его базе программе для ЭВМ «Модуль генерации трехмерного микрорельефа для теоретических исследований дорожно-строительных машин» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022612332);

- в разработанном копирном методе управления ДСМ, учитывающем конструктивные и эксплуатационные параметры ДСМ;

- в модифицированном методе «чистое преследование», в который введен дополнительный параметр – скорость, что позволило значительно улучшить значения критерия эффективности при увеличении скорости машины;

- в адаптированном для управления ДСМ методе Стэнли;

- в практических рекомендациях и технических решениях по созданию перспективных систем автономного управления колесными ДСМ, включающих в себя: разработанную двухуровневую структурную схему, инженерную методику по созданию перспективных систем автономного управления ДСМ и вариант комплекта аппаратуры для технической реализации (акт внедрения в АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» от 12.05.2022).

Реализация работы. Результаты работы приняты к внедрению в АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» для разработки перспективных систем автономного управления ДСМ. Теоретические результаты используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «СибАДИ».

На защиту выносятся:

- концепция автономного управления колесными ДСМ и предложенная классификация СУ;
- методика оценки эффективности рабочего процесса колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления;
- математическая модель сложной динамической системы рабочего процесса колесной ДСМ, состоящая из подсистем: микрорельеф – ходовое оборудование, базовая машина, РО – обрабатываемая среда, гидропривод РО, ГРУ, силовая установка, СУ, позволяющая моделировать требуемые траектории движения колесной ДСМ при формировании земляного полотна с различным расположением РО;
- блок-схемы рабочего процесса ДСМ с современными СУ и ДСМ с перспективной системой автономного управления;
- метод моделирования трехмерного микрорельефа для теоретических исследований рабочего процесса ДСМ;
- метод построения траектории движения, учитывающий конструктивные ограничения колесных ДСМ;
- предложенное понятие «вектор состояния ДСМ» и варианты комплекта измерительной аппаратуры для его реализации;
- модернизированный метод управления «чистое преследование», результаты его теоретических исследований и найденные функциональные зависимости оптимальных параметров метода «чистое преследование» от конструктивных и эксплуатационных параметров ДСМ;
- адаптированный для управления колесной ДСМ метод «Стэнли, результаты его теоретических исследований и найденные функциональные зависимости оптимальных параметров метода Стэнли от конструктивных и эксплуатационных параметров ДСМ;
- новый копирный метод управления, результаты его теоретических исследований и найденные функциональные зависимости оптимальных параметров метода управления от конструктивных и эксплуатационных параметров ДСМ;
- результаты экспериментальных исследований;
- практические рекомендации и технические решения для создания перспективных систем автономного управления колесными ДСМ, включающие в себя: разработанную двухуровневую структурную схему, инженерную методику создания перспективных систем автономного управления дорожно-строительными машинами и вариант технической реализации.

Степень достоверности научных положений обеспечивается корректностью принятых допущений, адекватностью математических моделей, корректным использованием методов имитационного моделирования и достаточным объемом экспериментальных данных.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и получили одобрение на: Международной научно-практической конференции «Раз-

витие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки» (г. Омск, СибАДИ, 2014 г.), Международной научно-практической конференции «Архитектура, строительство, транспорт» (г. Омск, СибАДИ, 2015 г.), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Фундаментальные и прикладные науки - основа современной инновационной системы» (г. Омск, СибАДИ, 2015 г.), 9-й всероссийской научно-практической конференции «Управление качеством образования, продукции и окружающей среды» (г. Бийск, АлтГТУ, 2015 г.), Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2021» (г. Владивосток, ДВФУ, 2021 г.), V Национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство» (г. Омск, СибАДИ, 2022 г.), VII Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» (г. Омск, СибАДИ, 2022 г.).

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертационной работы соответствует области исследования паспорта научной специальности 2.5.11 «Наземные транспортно-технологические средства и комплексы» (п. 5 «Математическое моделирование рабочих процессов транспортно-технологических средств, в том числе в их узлах, механизмах, системах и технологическом оборудовании при взаимодействии с опорной поверхностью и с рабочими средами (объектами)»; п. 6 «Оптимизация конструкций и синтез законов управления движением наземных транспортно-технологических средств и их комплексов, а также их отдельных функциональных узлов, механизмов и систем, направленные на улучшение экономичности, надежности, производительности, экологичности и эргономичности, технологической производительности, обеспечение энергоэффективности и безопасности»).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 25 печатных работ, в том числе 12 статей в изданиях из списка ВАК, 1 статья в журнале, входящем в Scopus, 4 монографии. Получены 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, основных результатов и выводов, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет в целом 294 страницы основного текста, в том числе 51 таблица, 190 рисунков, список литературы из 252 наименований и приложений на 24 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы исследования, сформулирована цель исследования, приведена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе проведен обзор предшествующих исследований на основании работ Т.В. Алексеевой, В.Ф. Амельченко, В.И. Баловнева, А.М. Васьков-

ского, В.С. Дегтярева, В.П. Денисова, А.В. Калоева, Ю.М. Княжева, Б.Д. Кононыхина, П.А. Корчагина, Э.Н. Кузина, Е.Ю. Малиновского, В.А. Мещерякова, В.И. Поддубного, В.Н. Тарасова, Н.А. Ульянова, А.М. Холодова, В.С. Щербакова и др.

Также был проведен анализ работ зарубежных исследователей O. Amidi, R.C. Coulter, O. Ringhdal, M.J. Barton, J.M. Snider, Y. Wu, Z. Xie, Y. Lu, K. Fue, W. Porter, E. Barnes, C. Li, G. Rains и др.

Проведен анализ ДСМ по признаку функций управления, сформулирована их классификация, выявлены общие функции, которые должна выполнять перспективная система автономного управления (таблица 1). Предложена концепция автономного управления колесными ДСМ.

Таблица 1

Функции управления ДСМ

| Функция человека-оператора \ Машина | Бульдозер | Фронтальный погрузчик | Экскаватор траншейный | Автогрейдер | Скрепер | Дорожная фреза | Асфальтоукладчик | Каток |
|--|-----------|-----------------------|-----------------------|-------------|---------|----------------|------------------|-------|
| Учет выполненных работ | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Управление загрузкой ДВС и трансмиссии | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Диагностика ДСМ | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Управление режимом резания/уплотнения | + | + | + | + | + | + | +/- | + |
| Управление положением РО | + | + | + | + | + | + | + | - |
| Ориентация ДСМ на площадке | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Определение траектории движения | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Управление курсом движения ДСМ | + | + | + | + | + | + | + | + |

Таблица 2

Классификация систем управления ДСМ

| Функции систем \ Класс систем | Системы управления 1D | Системы управления 2D | Системы управления 3D | Системы автономного управления 4D |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Управление высотной координатой РО | + | + | + | + |
| Управление углом поперечного уклона РО | - | + | + | + |
| Контроль координат ДСМ на площадке | - | - | + | + |
| Управление курсом и скоростью движения ДСМ | - | - | - | + |
| Создание «цифрового двойника» сооружения | - | - | - | + |

Под автономным управлением ДСМ следует понимать выполнение системой управления всех функций ЧО (таблица 1) на основе методологии автономного управления. Применение подобных систем в совокупности с ВМ-

технологиями, которые необходимы для создания 3D-проекта сооружения и цифровой карты местности, позволит на основе информации с измерительной аппаратуры создавать «цифрового двойника» возводимого объекта на каждом этапе работ и использовать его в качестве исходной информации для следующих этапов и на протяжении всего жизненного цикла.

На основании обзора существующих СУ ДСМ была предложена их классификация с включением нового класса перспективных систем автономного управления (таблица 2). В качестве признака классификации были использованы функции, реализуемые СУ.

На основании анализа существующих критериев эффективности предложена методика оценки эффективности работы колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления. В основу методики помимо точностных требования нормативных документов положен критерий эффективности процесса управления движением ДСМ, характеризующий точность следования заданной траектории. Количественно такой параметр можно оценить с помощью интегрального показателя, т.е. площади между заданной траекторией и траекторией движения центральной точки РО

$$E_T = \int_0^{\infty} |\Delta y(x)| dx, \quad (1)$$

где $\Delta y = y(\infty) - y(x)$ – отклонение траектории движения центральной точки РО от значения $y(\infty)$, которое соответствует заданной траектории.

Также рассмотрены показатели точности работы ДСМ, определенные нормативными документами, обоснован критерий эффективности для оценки качества работы СУ – перерегулирование.

Проведен анализ существующих математических моделей микрорельефа и теорий копания грунта. Приведен анализ принципов функционирования ГНСС и принципов работы СУ ДСМ с использованием их информационных сигналов.

На основании проведенного в главе анализа состояния вопроса, сформулированы цель и задачи исследований диссертационной работы.

Во второй главе изложена общая методика исследований и приведена структура работы.

Для решения поставленных задач использовался комплексный метод, включающий как теоретические, так и экспериментальные исследования. Обоснованы методы теоретических и экспериментальных исследований, а также методика статистической обработки результатов экспериментов и оценки их точности. На основе методологии системного анализа были выявлены основные этапы решения поставленных задач и определена структура работы.

В третьей главе была разработана математическая модель сложной динамической системы рабочего процесса колесной ДСМ, оснащенной системой автономного управления, основными подсистемами которой являются: базовая машина на примере автогрейдера и фронтального погрузчика, трехмерный микрорельеф, РО – обрабатываемая среда, гидропривод РО, ГРУ, силовая уста-

новка, XO , SU .

Для описания базовой машины были разработаны пространственные расчетные схемы автогрейдера (рисунок 1) и фронтального погрузчика (рисунок 2). Приняты основные допущения, введены системы координат, обозначены степени свободы и независимые переменные для описания динамики элементов расчетной схемы.

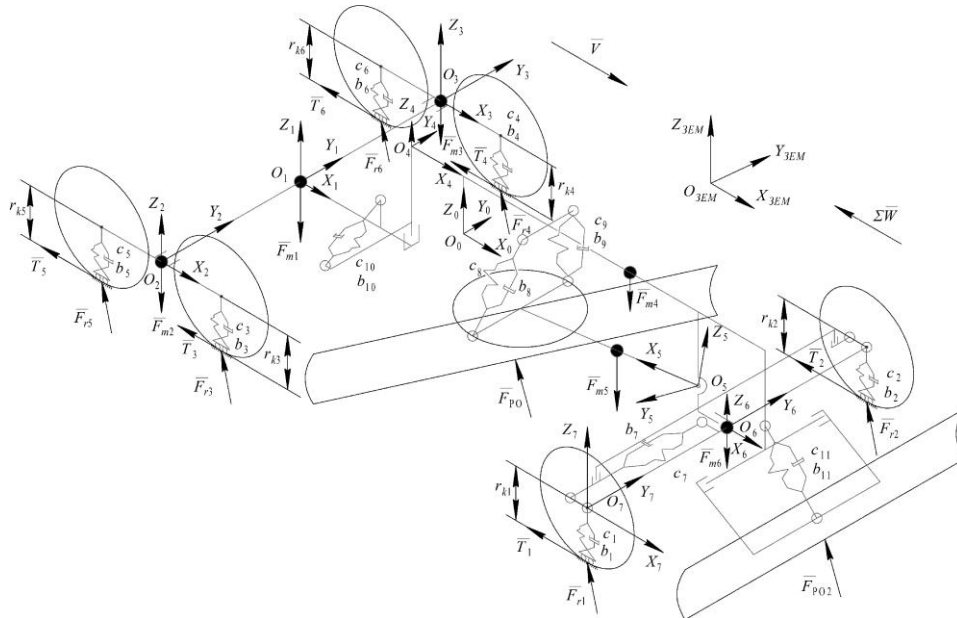


Рисунок 1 – Пространственная расчетная схема автогрейдера

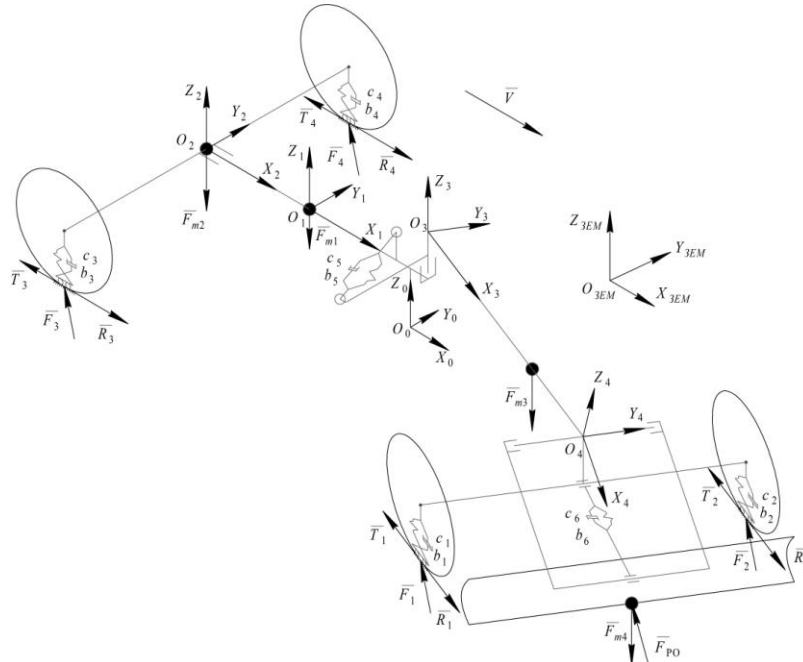


Рисунок 2 – Пространственная расчетная фронтального погрузчика

По расчетным схемам автогрейдера и фронтального погрузчика были составлены их математические модели. Для этого был использован метод дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода:

$$\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^{14} \text{tr}[U_{ij} H_i U_{iv}^T] \ddot{q}_j + \sum_{u=1}^{10} \sum_{j=1}^{14} \text{tr}[M_{uj} B_u M_{uv}^T] \dot{q}_j +$$

$$+ \sum_{u=1}^{10} \sum_{j=1}^{14} \text{tr}[M_{uj} N_u M_{uv}^T] q_j + \sum_{i=1}^7 m_i g G^T U_{iv} \bar{R}_i = \sum_{r=1}^7 \bar{F}_r U_{iv} \bar{R}_{ir}, \quad (2)$$

где U_{ij} – матрицы переноса; q_j – обобщенные координаты; H_i – матрицы инерционности; U_{iv} – матрицы переноса; M_{uj} – матрицы переноса для тел Фохта; N_u – матрицы упругости; M_{uv} – матрицы переноса для тел Фохта; m_i – масса i -го звена; G – вектор направления сил тяжести звеньев в инерциальной системе координат; R_i – вектор координат i -го звена; F_r – сила, приложенная к звену расчетной схемы; R_{ir} – вектор координат точки приложения силы к звену i в локальной системе координат этого звена.

Для описания кинематики поворота были составлены плоские расчетные схемы поворота ДСМ с различным типом рулевого управления: с передними управляемыми колесами, с шарнирно-сочлененной рамой (ШСР) и с передними управляемыми колесами и ШСР (рисунок 3).

Радиусы поворота ДСМ с ШСР и передними поворотными колесами определяются по формулам

$$R_3 = \frac{L_{2p} \cdot \cos(\varphi_P + \varphi_K) + L_{1p} \cdot \cos \alpha_K}{\sin(\varphi_P + \varphi_K)}. \quad (3)$$

$$R_{II} = \frac{L_{2p} + L_{1p} \cdot \cos \alpha_P}{\sin(\varphi_P + \varphi_K)}. \quad (4)$$

Курсовой угол вычисляется по формуле

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{V \cdot \sin(\varphi_P + \varphi_K)}{L_{2p} \cdot \cos(\varphi_P + \varphi_K) + L_{1p} \cdot \cos \varphi_K}. \quad (5)$$

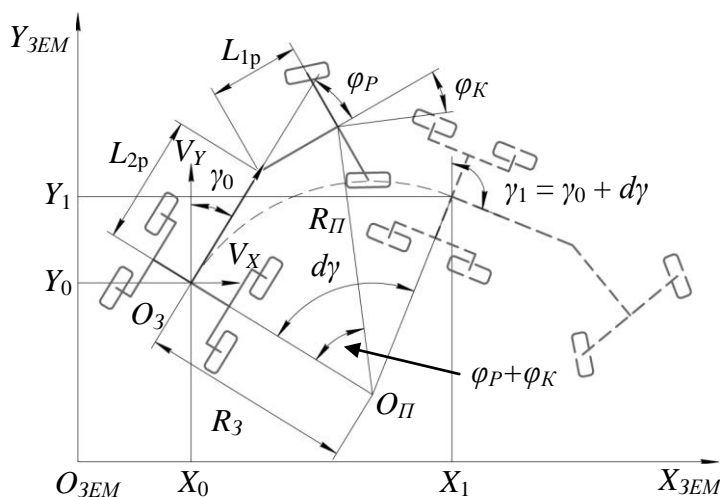


Рисунок 3 – Плоская расчетная схема поворота дорожно-строительной машины с шарнирно-сочлененной рамой и передними поворотными колесами

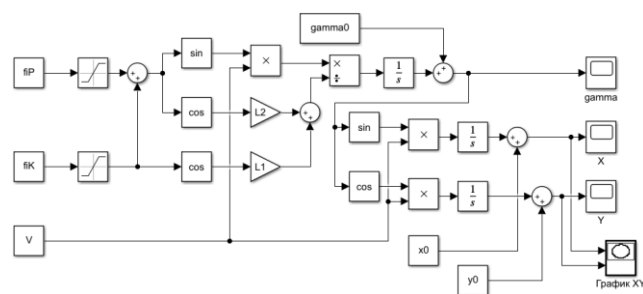


Рисунок 4 – Структурная схема математической модели поворота дорожно-строительной машины с шарнирно-сочлененной рамой и передними поворотными колесами

Проекции вектора скорости центральной точки заднего моста для всех представленных типов машин по осям $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}$ и $O_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}$:

$$\frac{dx}{dt} = V \sin \gamma; \frac{dy}{dt} = V \cos \gamma. \quad (6)$$

Формулы (3), (4) являются универсальными для всех типов машин с любым типом рулевого управления. Для перехода к машине с ШСР достаточно принять угол поворота колес φ_K равным нулю, а для перехода к машине с передними управляемыми колесами к нулю необходимо приравнять φ_P и вместо L_{1p} и L_{2p} подставить их сумму L .

Совокупность формул (4) – (6) представлена в виде структурной схемы математической модели поворота ДСМ с ШСР и передними поворотными колесами (рисунок 4).

Для математического описания динамики процесса поворота колесной ДСМ были составлены плоская расчетная схема поворота автогрейдера с передними поворотными колесами и ШСР (рисунок 5), плоская расчетная схема сил, действующих на автогрейдер в вертикальной плоскости и расчетная схема качения колес по деформируемому основанию (рисунок 6).

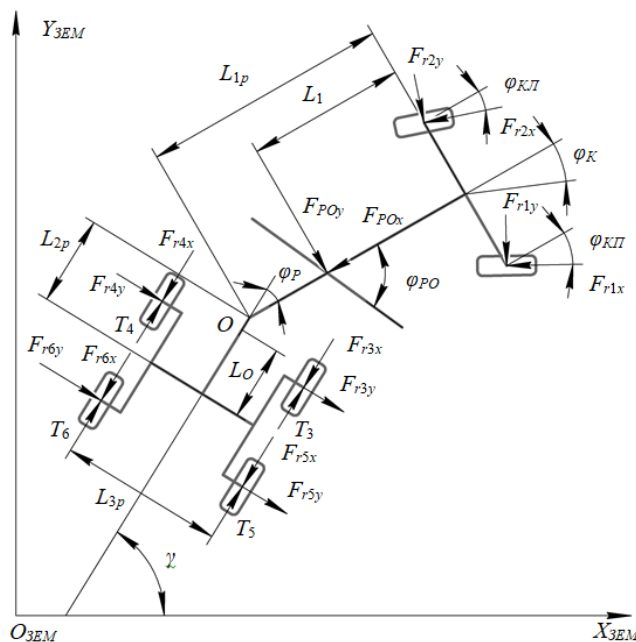


Рисунок 5 – Плоская расчетная схема динамики процесса поворота автогрейдера с передними поворотными колесами и шарнирно-сочлененной рамой

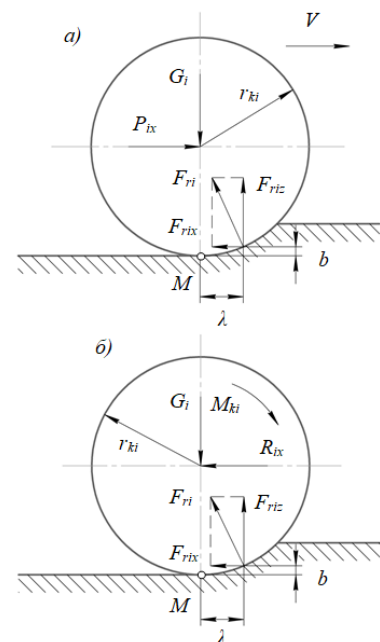


Рисунок 6 – Расчетная схема качения ведомого (а) и ведущего (б) колес по деформируемому основанию

Движение машины, представленной на рисунке 5 может быть описано системой уравнений:

$$\begin{cases}
m\ddot{x} = \left(\sum_{i=3}^6 T_i \right) \cos \gamma - \left(\sum_{i=3}^6 F_{rix} \right) \cos \gamma + \left(\sum_{i=3}^6 F_{riy} \right) \sin \gamma - \left(\sum_{i=1}^2 F_{rix} \right) \cos(\gamma + \varphi_P + \varphi_K) - \\
- \left(\sum_{i=1}^2 F_{riy} \right) \sin(\gamma + \varphi_P + \varphi_K) - F_{POx} \sin(\gamma + \varphi_P) - F_{POy} \cos(\gamma + \varphi_P); \\
m\ddot{y} = \left(\sum_{i=3}^6 T_i \right) \sin \gamma - \left(\sum_{i=3}^6 F_{rix} \right) \sin \gamma + \left(\sum_{i=3}^6 F_{riy} \right) \cos \gamma - \left(\sum_{i=1}^2 F_{rix} \right) \sin(\gamma + \varphi_P + \varphi_K) - \\
- \left(\sum_{i=1}^2 F_{riy} \right) \cos(\gamma + \varphi_P + \varphi_K) - F_{POx} \cos(\gamma + \varphi_P) - F_{POy} \sin(\gamma + \varphi_P); \\
J\ddot{\varphi} = (T_4 + T_6 - T_3 - T_5 + F_{r3x} + F_{r5x} - F_{r4x} - F_{r6x}) \frac{L_{3p}}{2} - \\
- (F_{r3y} + F_{r4y}) \left(L_O - \frac{L_6}{2} \right) - (F_{r5y} + F_{r6y}) \left(L_O + \frac{L_6}{2} \right) + \\
+ F_{POx} (L_{2p} - L_O) \sin \varphi_P + F_{POy} (L_{1p} - L_1 + (L_{2p} - L_O) \cos \varphi_P) - \\
- F_{r1x} \left(L_{1p} \sin \varphi_K + (L_{2p} - L_O) \sin(\varphi_K + \varphi_P) - \frac{L_{3p}}{2} \cos \varphi_K \right) - \\
- F_{r2x} \left(L_{1p} \sin \varphi_K + (L_{2p} - L_O) \sin(\varphi_K + \varphi_P) + \frac{L_{3p}}{2} \cos \varphi_K \right) + \\
+ F_{r1y} \left(L_{1p} \cos \varphi_K + (L_{2p} - L_O) \cos(\varphi_K + \varphi_P) - \frac{L_{3p}}{2} \sin \varphi_K \right) + \\
+ F_{r2y} \left(L_{1p} \cos \varphi_K + (L_{2p} - L_O) \cos(\varphi_K + \varphi_P) + \frac{L_{3p}}{2} \sin \varphi_K \right),
\end{cases} \quad (7)$$

где m – масса машины; x – перемещение центра масс машины (точка O) вдоль оси $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}$; y – перемещение центра масс машины (точка O) вдоль оси $O_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}$; T_i – сила тяги на ведущих колесах машины; F_{rix} – продольная сила реакции на колесах машины; F_{riy} – поперечная сила реакции на колесах машины; φ – угол азимута машины; φ_P – угол складывания полурам машины; φ_K – средний угол поворота передних колес машины; F_{POx} – продольная сила реакции грунта на РО; F_{POy} – поперечная сила реакции грунта на РО; J – момент инерции машины; L_{1p} – длина передней полурамы машины; L_{2p} – длина задней полурамы машины; L_{3p} – ширина машины; L_6 – длина балансира; L_O – расстояние от оси балансира до центра масс машины (точка O).

Для описания математической модели подсистемы управления РО были составлены уравнения геометрических связей перемещения РО. Расчетные схемы положения РО и влияния угла захвата приведены на рис. 7-8.

Управление положением РО производится с помощью двух гидроцилиндров и поворотного круга, изменяющего угол захвата РО. Заданная высотная отметка и заданный угол поперечного уклона в каждый момент времени сравниваются с текущим положением РО, контролируемым СУ. На выходе элементов сравнения формируются сигналы ΔZ и $\Delta \gamma$, т.е. приращение вертикальной коор-

динаты и приращение угла поперечного уклона, на которые необходимо переместить РО. Геометрическая связь между перемещением штоков гидроцилиндров и изменением положения РО с учетом влияния угла захвата РО на фактический угол поперечного уклона представлена уравнениями:

$$\Delta S_{П} = \Delta Z + \frac{L_{ГЦ}}{2} \operatorname{tg} \frac{\operatorname{tg} \Delta \gamma}{\sin \varphi}; \Delta S_{Л} = \Delta Z - \frac{L_{ГЦ}}{2} \operatorname{tg} \frac{\operatorname{tg} \Delta \gamma}{\sin \varphi}. \quad (8)$$

где $L_{ГЦ}$ – длина гидроцилиндра, ΔZ – приращение вертикальной координаты РО, $\Delta \gamma$ – приращение угла поперечного наклона РО, φ – угол захвата РО.

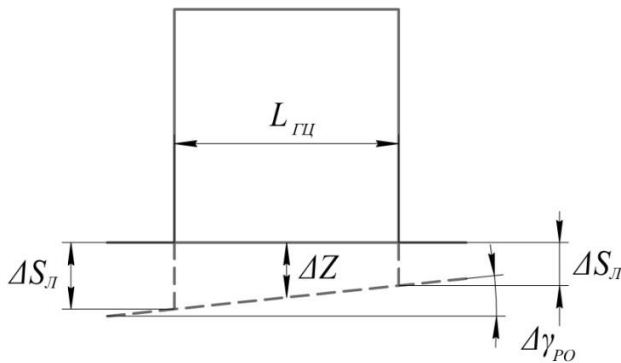


Рисунок 7 – Расчетная схема положения рабочего органа

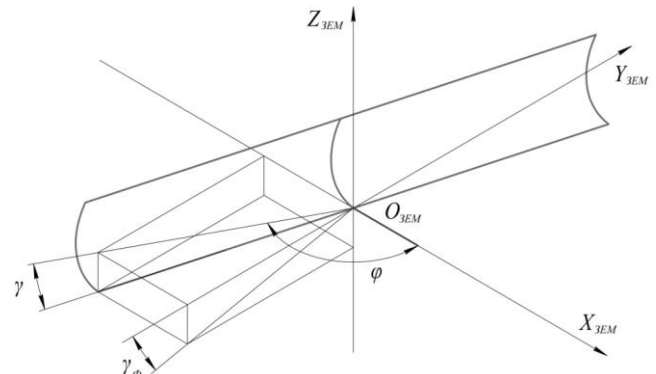


Рисунок 8 – Расчетная схема влияния угла захвата

Эти сигналы подаются через усилители и пороговые элементы на управляющие обмотки электрогидрораспределителей и тем самым стабилизируются значения $Z_{РО}$ и $\gamma_{РО}$.

Структурные схемы математических моделей подсистем гидропривода РО, складывания полурам и ГРУ представлены на рисунках 9-10.

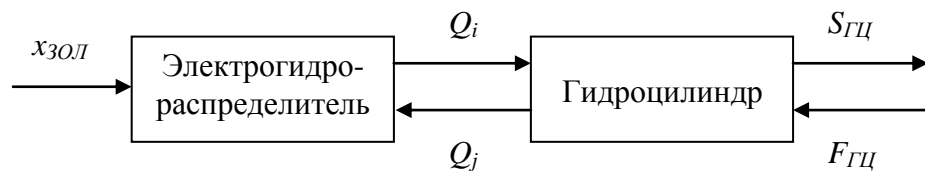


Рисунок 9 – Структурная схема гидропривода РО и складывания полурам

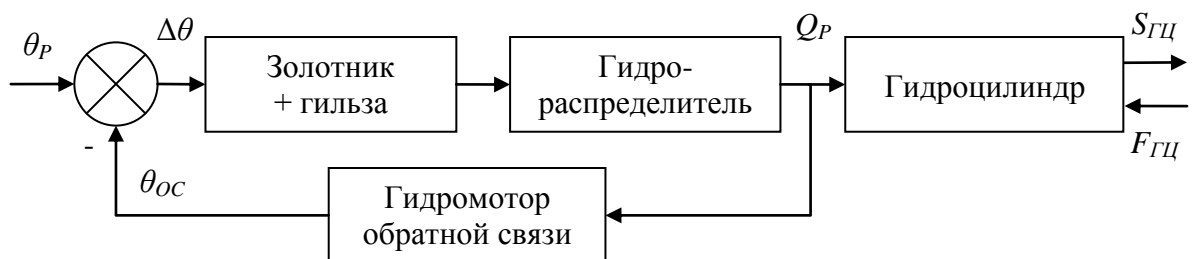


Рисунок 10 – Структурная схема гидравлического рулевого управления

Динамика гидроэлементов достаточно хорошо изучена и описана в предшествующих исследованиях. Математические модели были представлены с

помощью дифференциальных уравнений и передаточных функций, описаны только те элементы, которые непосредственно влияют на рабочий процесс ДСМ (электрогидрораспределитель, гидроцилиндр, гидромотор обратной связи и др.).

В большинстве предшествующих исследований ДСМ, где рассматривался вопрос взаимодействия ходового оборудования и микрорельефа, применялся ряд допущений из-за сложности и трудоемкости вычисления двумерной корреляционной функции, и предлагалось описывать микрорельеф двумя корреляционными функциями микропрофиля по левой и правой колее. Данный способ подходит только для случая прямолинейного движения машины, но при усложнении задачи и условии непрямолинейного движения, подобные вычисления становятся некорректными.



Рисунок 11 – Блок-схема работы программного модуля для моделирования трехмерного микрорельефа

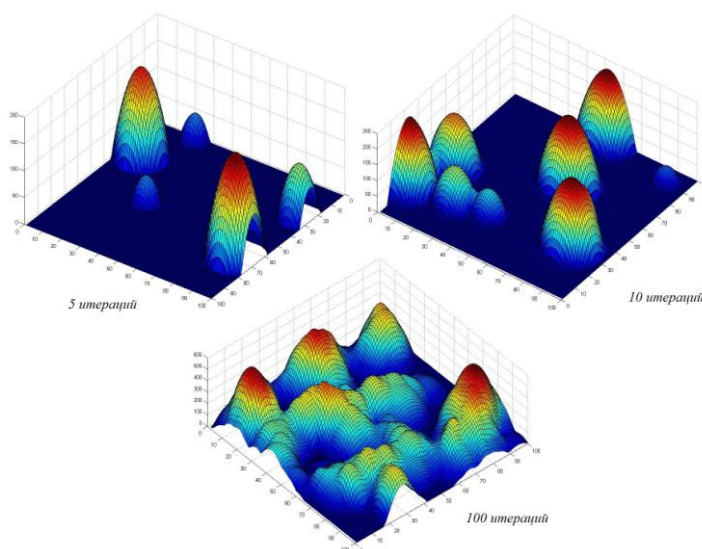


Рисунок 12 – Внешний вид микрорельефа после различного числа итераций

В связи с этим был предложен метод моделирования трехмерного микрорельефа, основанный на холмовом алгоритме и цифровом фильтре для расчета высот неровностей с заданной спектральной плотностью. Метод был реализован в виде программного модуля, зарегистрированного в установленном порядке (получено свидетельство на программу для ЭВМ). Блок-схема работы программного модуля и результаты расчетов приведены на рисунках 11-12.

Для описания подсистемы «РО – обрабатываемая среда» сила реакции на РО в соответствии с работами Федорова Д.И. и Бондаровича Б.А. представлена как сумма двух составляющих: низкочастотной (тренда) и высокочастотной (флюктуации).

Математическая модель подсистемы силовой установки была представлена в виде передаточных функций комплекса «нагрузка-двигатель-регулятор», приведенных в предшествующих исследованиях.

В четвертой главе разработана методология автономного управления колесными ДСМ, которая включает в себя методы управления движением колесной ДСМ и метод построения траекторий движения с учетом кинематических ограничений колесных ДСМ.

Проведенный анализ рабочего процесса ДСМ позволил составить блок-схемы рабочего процесса ДСМ с серийной СУ (рисунок 13) и ДСМ с перспективной системой автономного управления (рисунок 14).

Обрабатываемая среда представлена подсистемами: реакция среды и микрорельеф. ДСМ (машина) представлена подсистемами РО, рама, ходовое оборудование (ХО), гидропривод РО, гидравлическое рулевое управление (ГРУ), силовая установка. Управление (рисунок 13) представлено подсистемами человек-оператор, 3D-проект сооружения, датчики, устройство управления РО.

Подсистемы соединены между собой векторными связями, по которым проходит информация.

Реальные геометрические параметры \bar{P}_1 возводимого сооружения, формируемые после прохода ДСМ, являются выходными координатами сложной динамической системы.

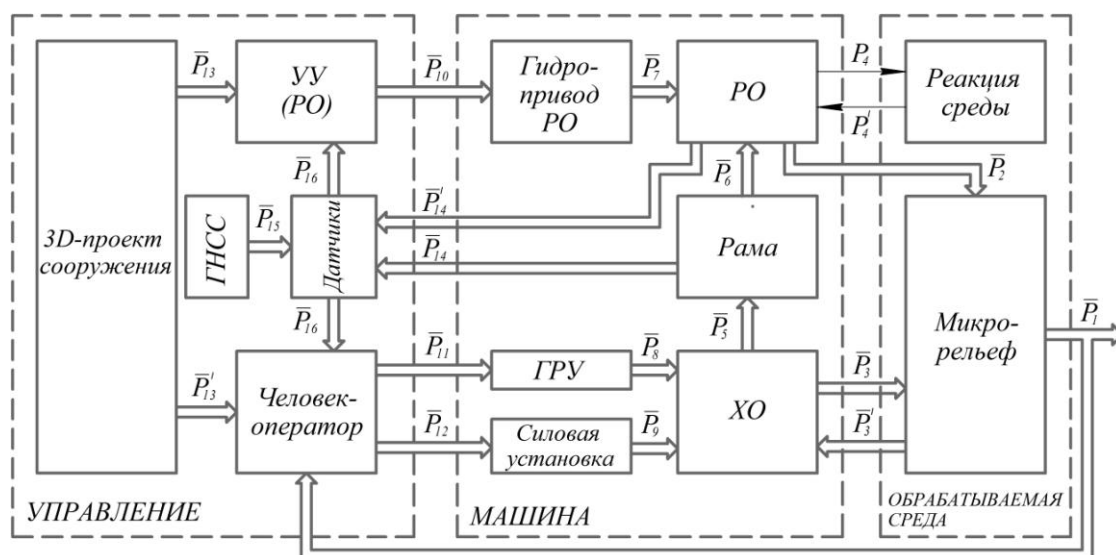


Рисунок 13 – Блок-схема рабочего процесса дорожно-строительной машины с серийной системой управления

ГРУ, силовая установка и микрорельеф, по которому движется ДСМ, оказывают воздействия на ХО (векторы параметров \bar{P}_8 , \bar{P}_9 , \bar{P}_3). ХО воспринимает возмущающее воздействие от микрорельефа \bar{P}_3' и управляющие воздействия от ГРУ \bar{P}_8 и силовой установки \bar{P}_9 , изменяет положение рамы машины в инерциальной системе координат (вектор \bar{P}_5). Перемещения рамы (вектор \bar{P}_6) и управляющие воздействия со стороны гидропривода РО (вектор \bar{P}_7) приводят к изменению координат РО, которые формирует возводимое сооружение из необработанного микрорельефа (вектор \bar{P}_2). Со стороны среды на РО действует

сила реакции (P_4'), которая зависит от глубины копания РО (P_4), призмы волочения, категории грунта и др.

В качестве источников информационных параметров серийной СУ (рисунок 13) выступают различные датчики, которые устанавливаются либо на раму ДСМ \bar{P}_{14} , либо на РО \bar{P}_{14}' , и система ГНСС \bar{P}_{15} (GPS, ГЛОНАСС и др.), которые позволяют определить текущее положение РО \bar{P}_{16} . Для функционирования данной системы необходим цифровой 3D-проект сооружения, который позволяет сравнить текущее положение РО (вектор \bar{P}_{16}) с проектными отметками (вектор \bar{P}_{13}).

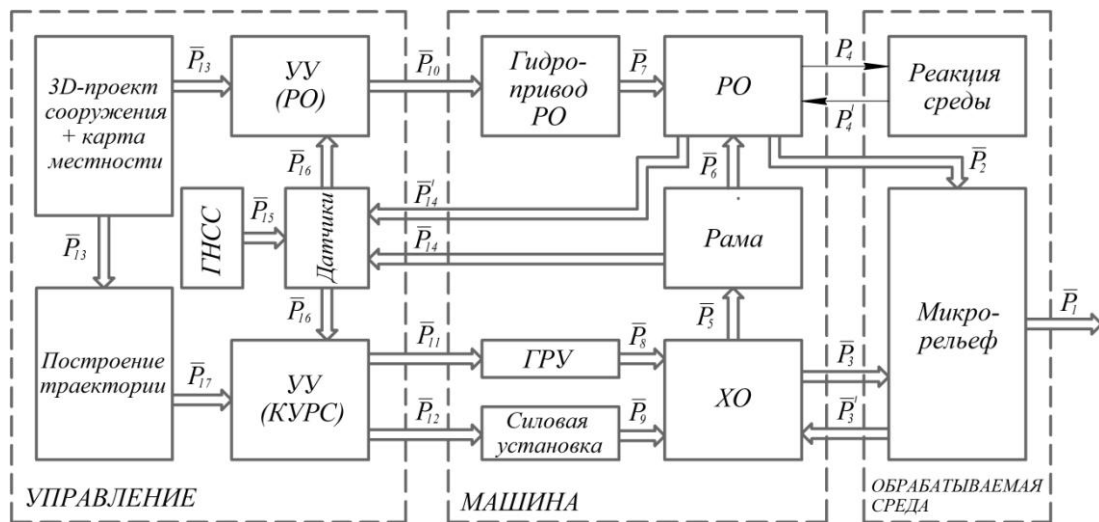


Рисунок 14 – Блок-схема рабочего процесса дорожно-строительной машины с перспективной системой автономного управления

Человек-оператор в данной схеме наблюдает положение ДСМ на площадке и сохраняет за собой управление силовой установкой \bar{P}_{12} и ГРУ \bar{P}_{11} .

Перспективным направлением является полное исключение человека-оператора из контуров управления ДСМ и создание полностью автономных ДСМ. Помимо управления РО на систему автономного управления возлагаются функции: построения оптимальной траектории (вектор \bar{P}_{17}) на основе 3D-проекта сооружения и электронной карты местности (вектор \bar{P}_{13}).

УУ курсом движения ДСМ на основе информации о заданном курсе (вектор \bar{P}_{17}) и текущем векторе состояния машины (вектор \bar{P}_{16}) вырабатывает управляющие воздействия на ГРУ (вектор \bar{P}_{11}) и силовую установку (вектор \bar{P}_{12}).

Траектория движения колесной ДСМ сильно отличается от траектории гусеничной машины в силу кинематических ограничений. Для решения этой проблемы был разработан метод построения траектории движения, учитывающий кинематические ограничения колесных ДСМ (получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ). Траекторию движения колесной ДСМ по пло-

щадке можно разбить на рабочий ход – прямые отрезки, ограниченные точками захода на захватку и выхода из нее, и развороты – дуги, соединяющие точки выхода и захода на захватку. Причем заходить на захватку ДСМ должна после выравнивания курса.

Таким образом, математическое описание любой траектории можно провести с помощью массива путевых точек, которые ДСМ должна проходить в строго определенной последовательности. Помимо координат, путевая точка должна содержать в себе информацию об угле азимута, т.е. направление дальнейшего движения ДСМ, на который должна встать ДСМ после достижения данной точки (рисунок 15). Причем точки чередуются: точка захода на захватку, т.е. начало рабочего движения и точка выхода с захватки, начало холостого хода. Траектория рабочего хода представляет собой, как правило, движение по прямой, либо по кривой очень большого радиуса. Т.е. азимуты входа и выхода, как правило, совпадают либо отличаются незначительно. Траектория холостого хода, как правило, предполагает разворот машины на угол около 180° и выставление на обратный азимут.

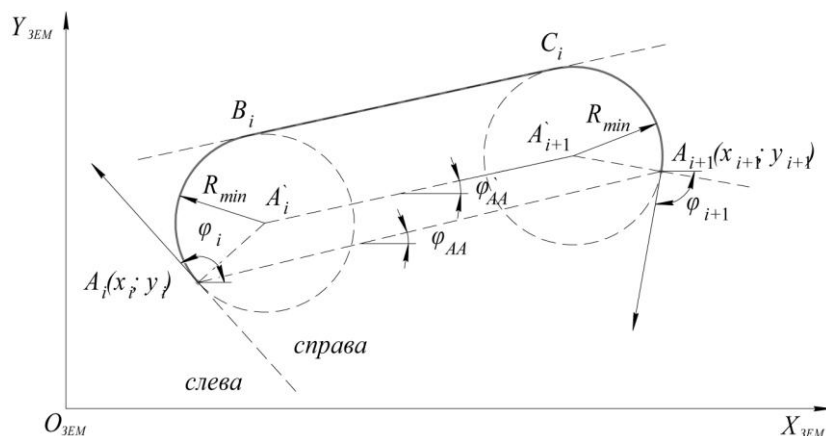


Рисунок 15 – Расчетная схема для построения траектории движения колесной дорожно-строительной машины

Расположение путевых точек на местности зависит от формы и размеров рабочего участка и зависит от технических параметров конкретной ДСМ (для автогрейдера это ширина РО и угол захвата).

Расчетная схема для построения траектории представлена на рисунке 15.

Исходные данные метода построения траектории:

- а) координаты текущей точки – координаты точки $A_i(x_i, y_i, \varphi_i)$;
- б) координаты целевой точки – координаты точки $A_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, \varphi_{i+1})$;
- в) минимальный радиус поворота машины R_{min} ;

Первый шаг для построения траектории – определить, влево или вправо должна повернуть ДСМ на первом участке, т.е. необходимо знать, справа или слева от линии азимута φ_i находится точка A_{i+1} .

Для этого достаточно вычислить угол азимута отрезка A_iA_{i+1} по формуле (9) и сравнить его с углом φ_i .

$$\varphi_{AA} = 90 \cdot \left(\frac{Y_{i+1} - Y_i}{|Y_{i+1} - Y_i|} \right) \cdot \left(1 - \frac{X_{i+1} - X_i}{|X_{i+1} - X_i|} \right) + \arctan \left(\frac{X_{i+1} - X_i}{Y_{i+1} - Y_i} \right). \quad (9)$$

Если $\varphi_{AA} \geq \varphi_i$, то поворот налево, а если меньше – направо.

Второй шаг – определить, слева или справа ДСМ приходит в точку A_{i+1} .

Для этого необходимо сравнить угол азимута φ_{AA} с углом азимута φ_{i+1} . Если $\varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}$, то ДСМ приходит справа, а если меньше – слева.

В результате возникает 4 варианта взаимного расположения точек (рисунок 16). Формулы координат центров поворота представлены в таблице 3.

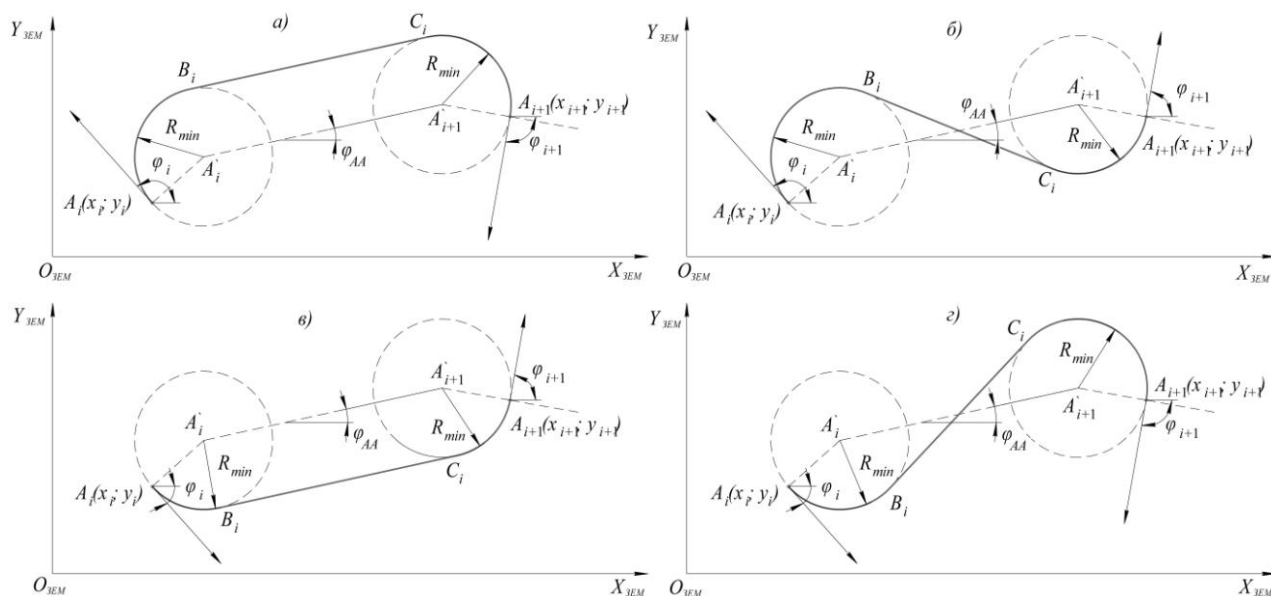


Рисунок 16 – Расчетные схемы при различных соотношениях углов:

- а) $\varphi_i > \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}$ – направо и направо; б) $\varphi_i > \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}$ – направо и налево;
в) $\varphi_i \leq \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}$ – налево и налево; г) $\varphi_i \leq \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}$ – налево и направо.

В точках перехода из одного вида движения в другой необходимо проставить промежуточные путевые точки. Формулы координаты точек B_i и C_i представлены в таблице 4. Для вычисления координат промежуточных точек B_i и C_i необходимо вычислить угол прямой, образованной точками A_i' , A_{i+1}' :

$$\varphi'_{AA} = 90 \cdot \left(\frac{Y'_{i+1} - Y'_i}{|Y'_{i+1} - Y'_i|} \right) \cdot \left(1 - \frac{X'_{i+1} - X'_i}{|X'_{i+1} - X'_i|} \right) + \arctan \left(\frac{X'_{i+1} - X'_i}{Y'_{i+1} - Y'_i} \right). \quad (10)$$

Таблица 3

Координаты центров поворота A_i' , A_{i+1}'

| Координаты A_i' | Координаты A_{i+1}' |
|--|--|
| $X'_i = \begin{cases} X_i + R_{\min} \sin \varphi_i, \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ X_i - R_{\min} \sin \varphi_i, \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases}$ | $X'_{i+1} = \begin{cases} X_{i+1} - R_{\min} \sin \varphi_i, \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ X_{i+1} + R_{\min} \sin \varphi_i, \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases}$ |
| $Y'_i = \begin{cases} Y_i - R_{\min} \cos \varphi_i, \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ Y_i + R_{\min} \cos \varphi_i, \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases}$ | $Y'_{i+1} = \begin{cases} Y_{i+1} + R_{\min} \cos \varphi_i, \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ Y_{i+1} - R_{\min} \cos \varphi_i, \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases}$ |

Таблица 4

Координаты промежуточных точек B_i и C_i

| Точка | Для случаев а) и в) | Для случаев б) и г) |
|-------|---|---|
| B_i | $X_B = \begin{cases} X'_i + R_{\min} \sin \varphi'_{AA}, \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ X'_i - R_{\min} \sin \varphi'_{AA}, \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases}$ | $X_B = \begin{cases} X'_i + R_{\min} \cos(\varphi'_{AA} + \theta), \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ X'_i + R_{\min} \cos(\varphi'_{AA} - \theta), \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases}$ |
| | $Y_B = \begin{cases} Y'_i + R_{\min} \cos \varphi'_{AA}, \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ Y'_i - R_{\min} \cos \varphi'_{AA}, \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases}$ | $Y_B = \begin{cases} Y'_i + R_{\min} \sin(\varphi'_{AA} + \theta), \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ Y'_i + R_{\min} \sin(\varphi'_{AA} - \theta), \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases}$ |
| C_i | $X_C = \begin{cases} X'_{i+1} + R_{\min} \sin \varphi'_{AA}, \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ X'_{i+1} - R_{\min} \sin \varphi'_{AA}, \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases}$ | $X_C = \begin{cases} X'_{i+1} - R_{\min} \cos(\varphi'_{AA} - \theta), \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ X'_{i+1} - R_{\min} \cos(\varphi'_{AA} + \theta), \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases}$ |
| | $Y_C = \begin{cases} Y'_{i+1} + R_{\min} \cos \varphi'_{AA}, \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ Y'_{i+1} - R_{\min} \cos \varphi'_{AA}, \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases}$ | $Y_C = \begin{cases} Y'_{i+1} - R_{\min} \sin(\varphi'_{AA} - \theta), \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ Y'_{i+1} - R_{\min} \sin(\varphi'_{AA} + \theta), \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases}$ |

Таблица 5

Формулы для вычисления траектории

| Участки | Углы азимута начала и конца участка | Координаты точек |
|--|--|--|
| 1 (поворот) $A_i \rightarrow B_i$ | $\varphi'_i = \begin{cases} \varphi_i + 90, \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ \varphi_i - 90, \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases}$ | $X_{1j} = R_{\min} \cos \varphi_j + X'_i$ |
| | $\varphi''_i = \begin{cases} \varphi_{BC} + 90, \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i; \\ \varphi_{BC} - 90, \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_i. \end{cases}$ | $Y_{1j} = R_{\min} \sin \varphi_j + Y'_i$ |
| 2 (прямая) $B_i \rightarrow C_i$ | - | $Y_{2j} = k \cdot X_{2j} + b;$ $k = \frac{Y_C - Y_B}{X_C - X_B}; b = \frac{X_C \cdot Y_B - Y_C \cdot X_B}{X_C - X_B}$ |
| 3 (поворот) $C_i \rightarrow A_{i+1}$ | $\varphi'_{i+1} = \begin{cases} \varphi''_i, \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i \text{ и } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ \varphi''_i + 180, \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_i \text{ и } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ \varphi''_i - 180, \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_i \text{ и } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases}$ | $X_{3j} = R_{\min} \cos \varphi_j + X'_{i+1}$ |
| | $\varphi''_{i+1} = \begin{cases} \varphi_{i+1} + 90, \text{ при } \varphi_{AA} \geq \varphi_{i+1}; \\ \varphi_{i+1} - 90, \text{ при } \varphi_{AA} < \varphi_{i+1}. \end{cases}$ | $Y_{3j} = R_{\min} \sin \varphi_j + Y'_{i+1}$ |

Угол внутренней касательной θ вычисляется по формуле

$$\theta = \arccos \frac{2R_{\min}}{A'_i A'_{i+1}}, \quad (11)$$

где $A'_i A'_{i+1} = (X'_{i+1} - X'_i) / \cos \varphi'_{AA}$.

Угол азимута отрезка, образованного точками B_i и C_i

$$\varphi_{BC} = 90 \cdot \left(\frac{Y_C - Y_B}{|Y_C - Y_B|} \right) \cdot \left(1 - \frac{X_C - X_B}{|X_C - X_B|} \right) + \arctan \left(\frac{X_C - X_B}{Y_C - Y_B} \right). \quad (12)$$

Результатам вычислений будут координаты массива точек, составляющих траекторию движения от точки A_i до точки A_{i+1} .

Для информационного обеспечения систем автономного управления в работе было предложено использовать термин «вектор состояния ДСМ» – это

вектор параметров, описывающих текущее положение ДСМ и РО, необходимых и достаточных для реализации методов автономного управления ДСМ. Вектор состояния включает в себя 12 переменных, которые могут быть получены на основе первичной измерительной информации от ГНСС и бортовой аппаратуры ДСМ:

$$\bar{R} = [x_1, y_1, z_1, \gamma_1, \vartheta_1, \varphi_1, \varphi_K, \varphi_P, z_{PO}, \varphi_{PO}, \gamma_{PO}, V]. \quad (13)$$

Описание переменных и варианты компоновки системы автономного управления представлены в таблице 6.

Таблица 6

Переменные, входящие в вектор состояния машины

| Пер. | Значение | Датчик первичной информации | |
|----------------|--|---|------------------------------|
| x_1 | перемещение машины (точки O_0) вдоль оси $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}$ | Приемник ГНСС | |
| y_1 | перемещение машины (точки O_0) вдоль оси $O_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}$ | | |
| z_1 | перемещение машины (точки O_0) вдоль оси $O_{ЗЕМ}Z_{ЗЕМ}$ | | |
| V | скорость машины | | |
| γ_1 | поворот подмоторной рамы машины вокруг оси O_0X_0 | 3-осный акселерометр-гироскоп | |
| ϑ_1 | поворот подмоторной рамы машины вокруг оси O_0Y_0 | | |
| φ_1 | поворот подмоторной рамы машины вокруг оси O_0Z_0 | | |
| φ_K | поворот передних колес вокруг оси O_7Z_7 | Датчик угла поворота | |
| φ_P | складывание полурам машины | Датчик угла поворота | |
| z_{PO} | вертикальная координата центральной точки кромки РО в системе координат $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}Z_{ЗЕМ}$ | Приемник ГНСС + 3-осный акселерометр-гироскоп | 2 приемника ГНСС по краям РО |
| γ_{PO} | угол поперечного уклона РО в системе координат $O_{ЗЕМ}X_{ЗЕМ}Y_{ЗЕМ}Z_{ЗЕМ}$ | | |
| φ_{PO} | угол захвата РО | Датчик угла поворота | |

Для управления курсом движения колесной ДСМ были рассмотрены известные методы управления по непрерывной траектории: метод «чистое преследование» и метод Стэнли. Данные методы широко применяются для управления движением автомобилей и мобильных роботов, однако отсутствуют исследования по их применению для управления ДСМ. Соответственно, необходимо было адаптировать эти методы для управления колесной ДСМ. Вместе с этим была выдвинута гипотеза о том, что применение данных методов не позволит решить задачу управления движением ДСМ с достаточной точностью. В связи с этим был разработан новый копирный метод управления движением ДСМ и проведены теоретические исследования для подтверждения выдвинутой гипотезы.

Метод «чистое преследование» (Pure Pursuit) и его разновидности являются одними из наиболее распространенных подходов к проблеме управления курсом движения мобильных роботов. Метод состоит из геометрического расчета радиуса дуги окружности, которая соединяет местоположение задней оси с

целевой точкой на заданной траектории впереди машины. Целевая точка определяется исходя из дальности видимости L_0 от центральной точки задней оси до заданной траектории, что является параметром настройки метода. Расчетная и структурная схемы метода представлены на рисунках 17-18.

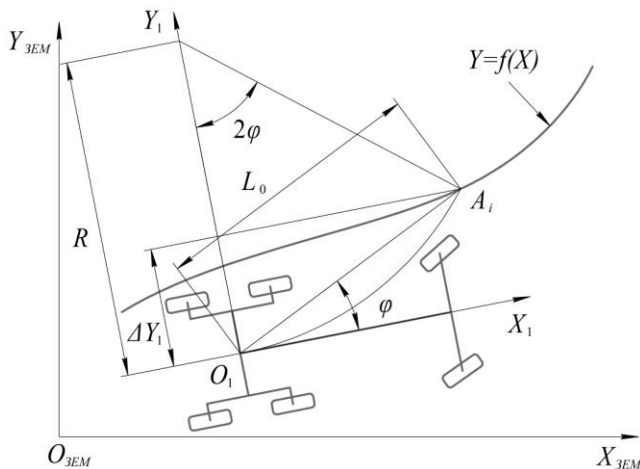


Рисунок 17 – Расчетная схема метода «чистое преследование»

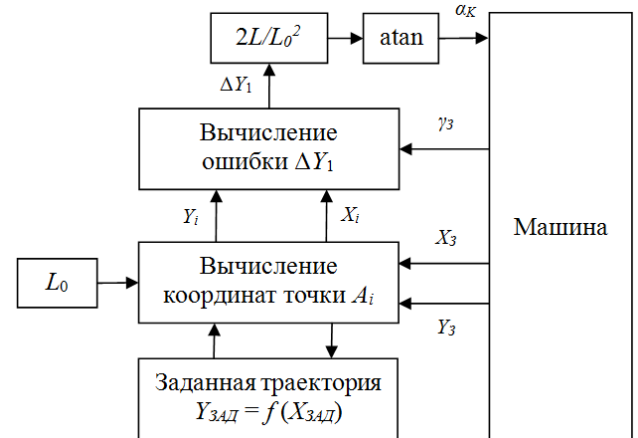


Рисунок 18 – Структурная схема метода «чистое преследование»

Угол поворота ДСМ может быть определен с использованием только местоположения целевой точки и угла φ между вектором курса машины и вектором прогнозирования. Из рисунка 17 можно записать

$$R = \frac{L_0}{2 \sin \varphi} = \frac{L_0^2}{2 \Delta Y_1}, \quad (14)$$

где L_0 – дальность видимости, R – радиус поворота ДСМ, φ – угол между вектором курса машины и вектором прогнозирования, ΔY – ошибка поперечного смещения ДСМ.

Необходимый угол поворота ДСМ можно вычислить, используя соответствующие уравнения для конкретного типа рулевого управления. Например, для ДСМ с передними поворотными колесами

$$\varphi_K = \arctan\left(\frac{2\Delta Y_1 L}{L_0^2}\right). \quad (15)$$

Метод Стэнли – это метод отслеживания пути, использованный в автомобиле Стэнли (Stanley) Стэнфордского университета на соревновании автономных транспортных средств DARPA Grand Challenge. Метод Стэнли представляет собой нелинейную функцию обратной связи поперечной ошибки ΔY_3 , измеренной от центра передней оси до ближайшей точки пути $A_i (X_i, Y_i)$, для которой может быть показана экспоненциальная сходимость.

На рисунках 19-20 показаны расчетная и структурная схемы метода. Взаимное расположение точки управления с управляемыми передними колесами позволяет получить закон управления, где первый член просто удерживает колеса выровненными по заданной траектории, устанавливая курсовой угол φ_K , равным углу касательной $\varphi_{K,зад}$ к траектории в точке $A_i (X_i, Y_i)$.

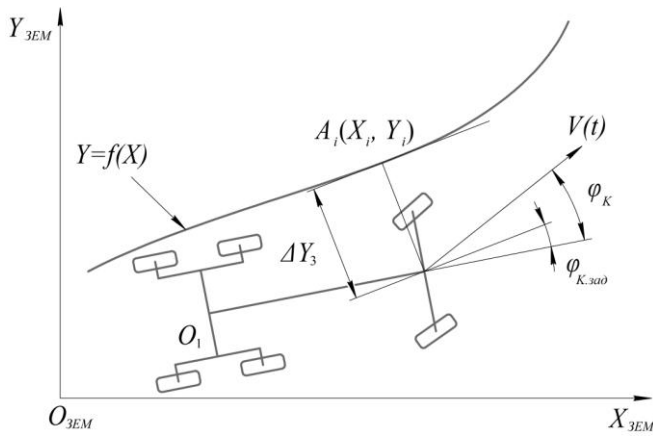


Рисунок 19 – Расчетная схема метода Стэнли

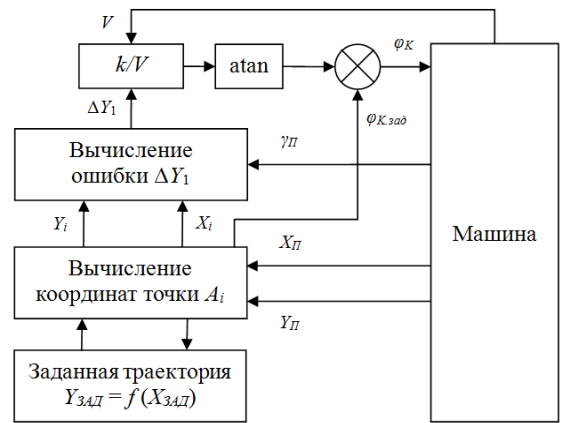


Рисунок 20 – Структурная схема метода Стэнли

Когда ΔY_3 не равно нулю, второй член регулирует φ_K таким образом, чтобы предполагаемая траектория пересекала касательную к траектории. Закон рулевого управления при данном методе имеет вид

$$\varphi_K = \varphi_{K.zad} + \arctan\left(\frac{k \cdot \Delta Y_3(t)}{V(t)}\right), \quad (16)$$

где k – коэффициент пропорциональности; $V(t)$ – скорость движения машины.

Копирный метод представляет собой метод управления по отклонению точки копирования. Точка копирования – это виртуальная точка на продольной оси машины, которую система управления стремится совместить с заданной траекторией. В качестве копирной точки можно использовать центр масс машины, центр переднего моста, центр РО или точку, находящуюся вне машины.

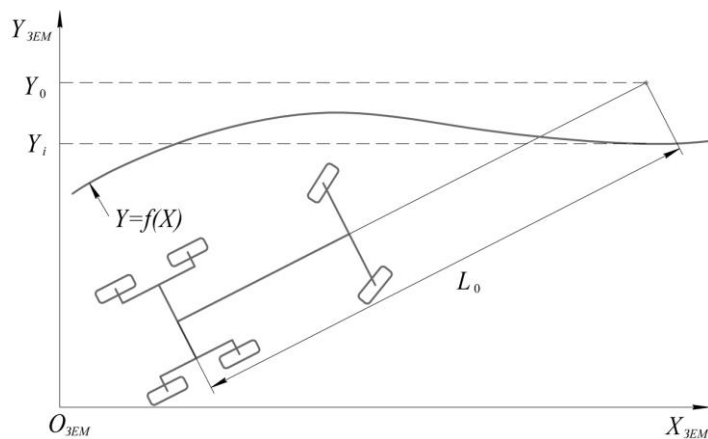


Рисунок 21 – Расчетная схема копирного метода

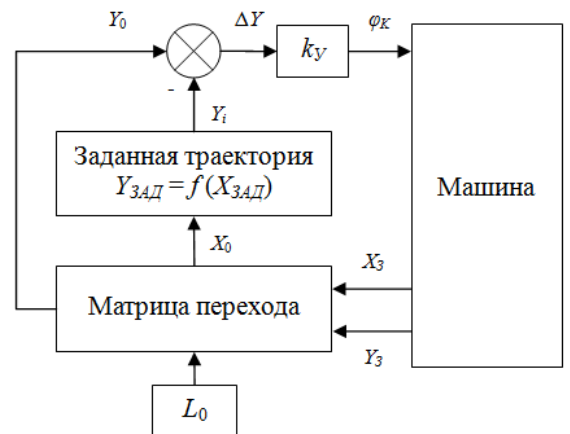


Рисунок 22 – Структурная схема копирного метода

Задача управления сводится к совмещению положения копирной точки машины с заданной траекторией. Информационным параметром в данном случае является линейное отклонение копирной точки машины ΔY от заданной траектории. Расчетная и структурная схемы метода представлены на рисунках 21-22.

Метод управления основывается на измерении отклонения копирной точки от заданной траектории:

$$\Delta Y = Y_0 - Y_i. \quad (17)$$

Целевая функция управления копирного метода имеет вид:

$$\Delta Y \rightarrow 0. \quad (18)$$

Пятая глава посвящена теоретическим исследованиям процесса управления движением ДСМ.

Проведенные исследования математических моделей поворота позволили установить зависимость между углом поворота передних управляемых колес и углом складывания полурам для движения передней и задней оси ДСМ с передними управляемыми колесами и ШСР по одной колее.

$$\varphi_K = (2 \cdot K_{ШСР} - 1) \varphi_P. \quad (19)$$

где φ_K – угол поворота передних колес, φ_P – угол складывания полурам, $K_{ШСР}$ – коэффициент ШСР ДСМ.

Проведенные теоретические исследования метода «чистое преследование» (пример траекторий движения центральной точки РО приведен на рисунке 23) позволили установить зависимости критерия эффективности от конструктивных параметров ДСМ (L , K_δ), скорости передвижения V и параметра настройки – дальности видимости L_0 (примеры представлены на рисунках 24-25).

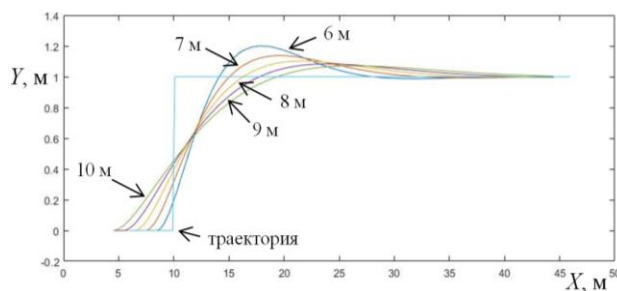


Рисунок 23 – Траектории движения центральной точки РО при различных значениях дальности видимости L_0 ($L = 9$ м, $K_\delta = 0,5$, $V = 0,5$ м/с)

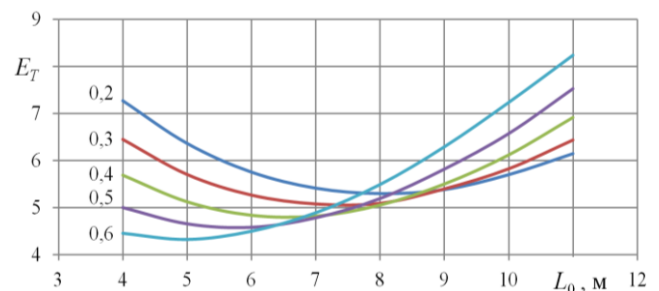


Рисунок 24 – Влияние дальности видимости L_0 на интегральный критерий E_T при разных значениях коэффициента базы K_δ ($L = 9$ м, $V = 0,5$ м/с)

Полученные зависимости были аппроксимированы и по уравнениям регрессии были найдены оптимальные значения дальности видимости L_0 для различных значений конструктивных параметров ДСМ (L , K_δ) и скорости передвижения V (рисунок 26).

В результате предложен модифицированный метод «чистое преследование», который был адаптирован для управления ДСМ. Найденная функциональная зависимость оптимального значения дальности видимости от скорости, длины базы и коэффициента базы представлена формулой:

$$L_0 = a_0 \cdot V + a_1, \quad (20)$$

где $a_0 = 1,6 + 0,04 \cdot L$, $a_1 = 3,2 - 5 \cdot K_\delta + 0,5 \cdot L$.

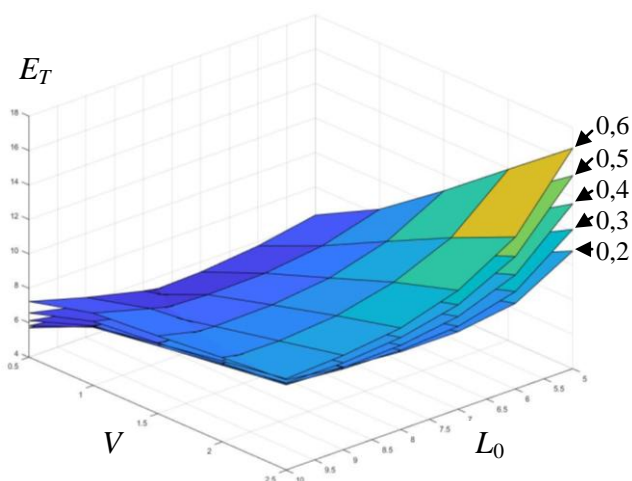


Рисунок 25 – Зависимости интегрального критерия E_T от дальности видимости L_0 и скорости V при различных значениях коэффициента базы ($L = 9$ м)

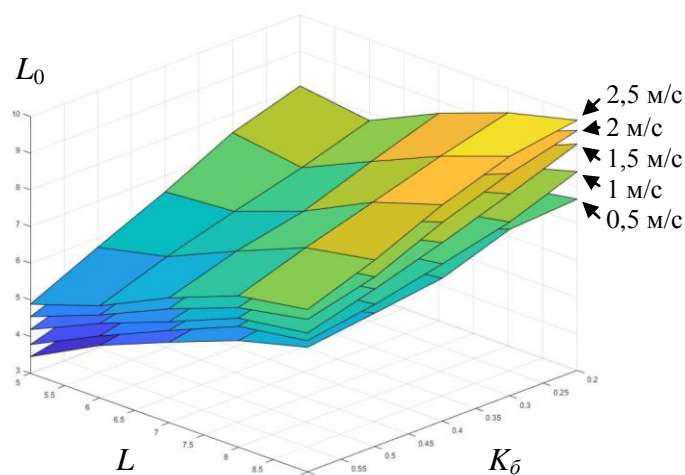


Рисунок 26 – Зависимости оптимальных значений дальности видимости L_0 при различных значениях скорости, длины базы и коэффициента базы

Проведенные теоретические исследования метода Стэнли (пример траекторий движения центральной точки РО приведен на рисунке 27) позволили найти зависимости критерия эффективности от конструктивных параметров ДСМ, скорости передвижения и параметра настройки – коэффициента усиления (примеры представлены на рисунках 28-29).

Полученные зависимости были аппроксимированы и по уравнениям регрессии были найдены оптимальные значения коэффициента усиления для различных значений конструктивных параметров ДСМ (рисунок 30).

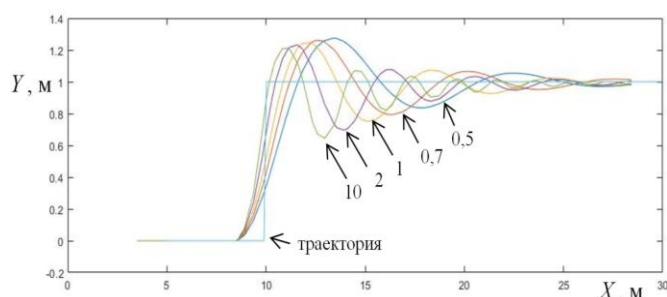


Рисунок 27 – Траектории движения центральной точки РО при различных значениях коэффициента усиления k ($L = 5$ м, $K_b = 0,3$, $V = 0,5$ м/с)

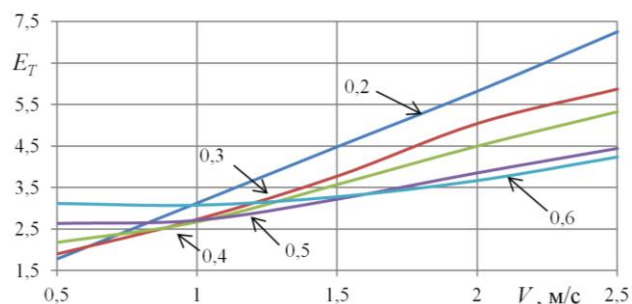


Рисунок 28 – Влияние скорости V на интегральный критерий E_T при разных значениях коэффициента базы K_b ($L = 5$ м, $k = 10$)

В результате проведенных исследований метод Стэнли был адаптирован для управления ДСМ, выявленная функциональная зависимость оптимального значения коэффициента усиления от длины базы и коэффициента базы представлена формулой:

$$k = -349,9 + 582,3 \cdot K_b + 58,98 \cdot L. \quad (21)$$

Проведенные теоретические исследования разработанного копирного метода управления (пример траекторий движения центральной точки РО приве-

ден на рисунке 31) позволили получить зависимости критерия эффективности и перерегулирования СУ от конструктивных параметров ДСМ, скорости передвижения ДСМ и параметров метода управления – вынос точки копирования и коэффициент усиления (примеры представлены на рисунках 32-34).

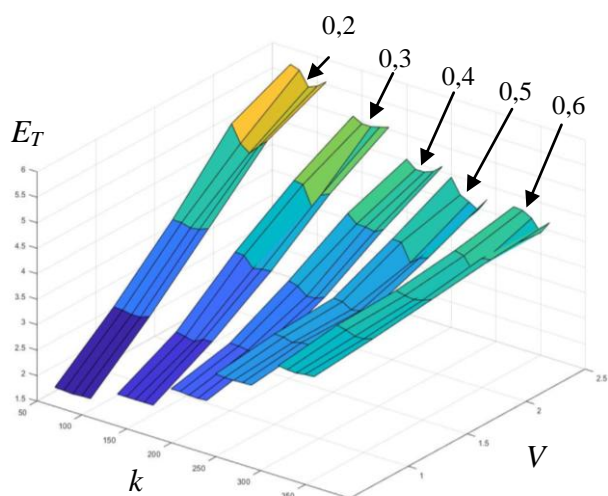


Рисунок 29 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления k и скорости V при различных значениях коэффициента базы ($L = 6$ м)

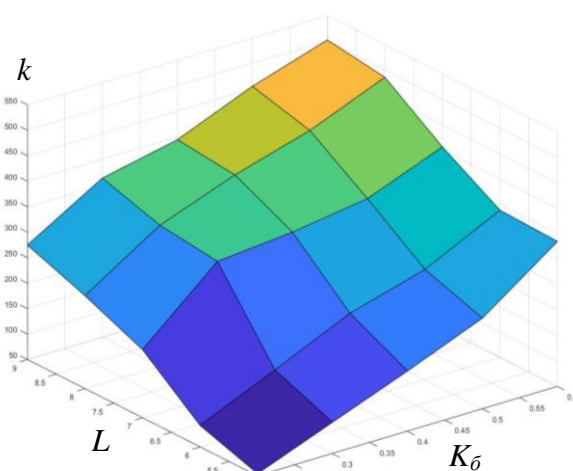


Рисунок 30 – Зависимость оптимального значения коэффициента усиления k при различных значениях длины базы и коэффициента базы

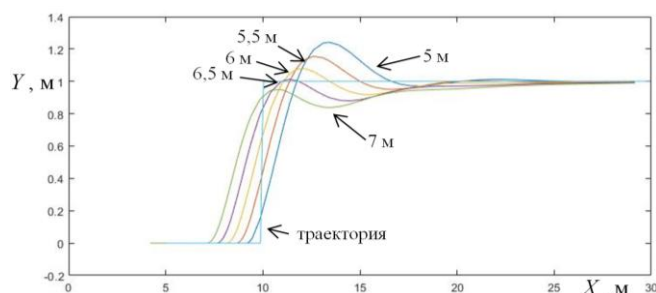


Рисунок 31 – Траектории движения центральной точки РО при различных значениях коэффициента усиления k ($L = 5$ м, $K_0 = 0,3$, $V = 0,5$ м/с)

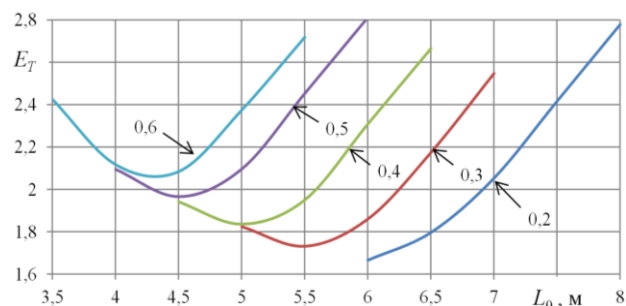


Рисунок 32 – Влияние скорости V на интегральный критерий E_T при разных значениях коэффициента базы K_0 ($L = 5$ м, $k = 10$)

Полученные зависимости были аппроксимированы и по уравнениям регрессии были найдены оптимальные значения параметров метода управления для всех значений конструктивных параметров ДСМ и каждого значения скорости передвижения (рисунки 35-36).

Найденные оптимальные значения были аппроксимированы и в результате получены итоговые функциональные зависимости оптимальных параметров разработанного копирного метода управления (вынос точки копирования, коэффициент усиления) от конструктивных параметров ДСМ и скорости передвижения:

$$k_v = a \cdot V^5 + b, \quad (22)$$

где $a = 1,7856 + 1,085 \cdot K_0 - 0,1308 \cdot L$, $b = 1,247 - 0,7772 \cdot K_0 + 0,1154 \cdot L$.

$$L_0 = c \cdot V + d, \quad (23)$$

где $c = 1,77$, $d = 3,55 - 8,2 \cdot K_b + 0,71 \cdot L$.

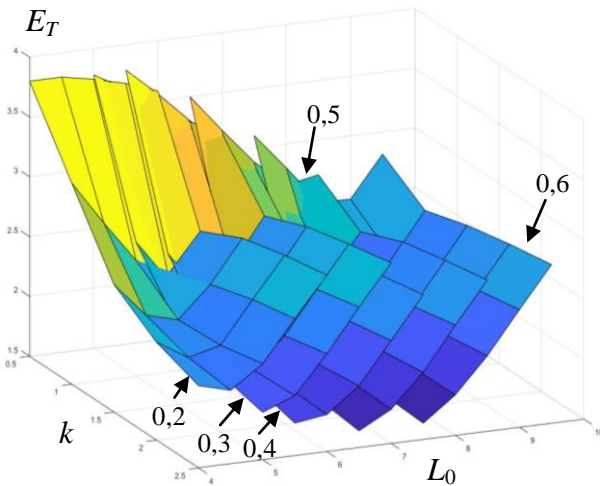


Рисунок 33 – Зависимости интегрального критерия E_T от коэффициента усиления и выноса точки копирования при различных значениях коэффициента базы ($V = 0,5$ м/с, $L = 8$ м)

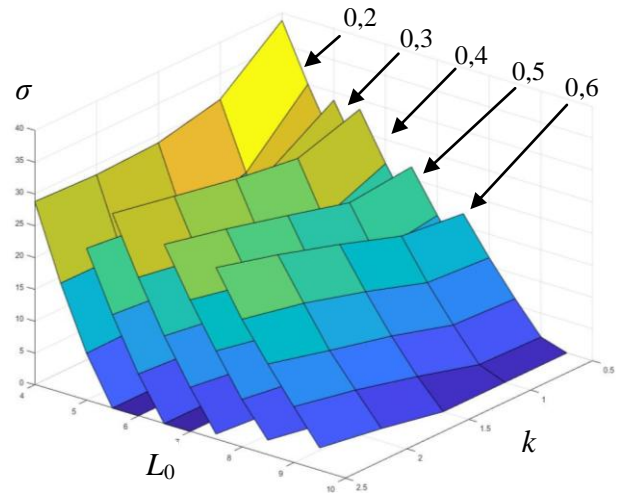


Рисунок 34 – Зависимости перерегулирования от коэффициента усиления и выноса точки копирования при различных значениях коэффициента базы ($V = 0,5$ м/с, $L = 8$ м)

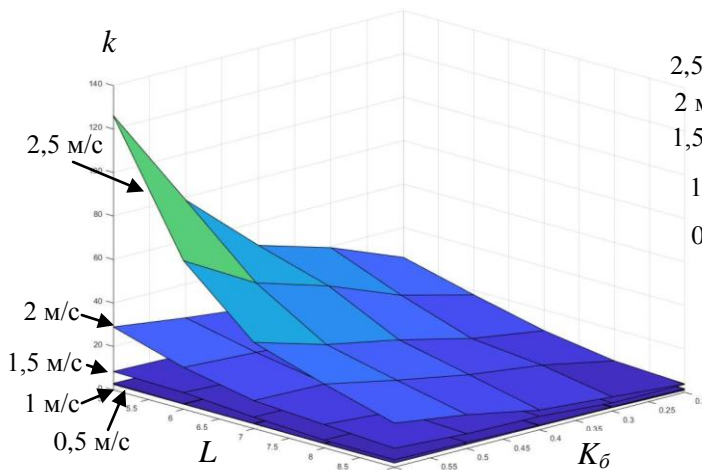


Рисунок 35 – Зависимости оптимального значения коэффициента усиления при различных значениях длины базы и коэффициента базы

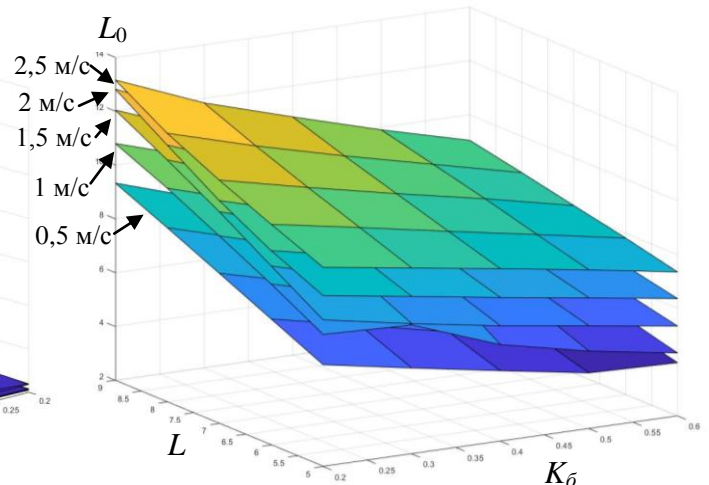
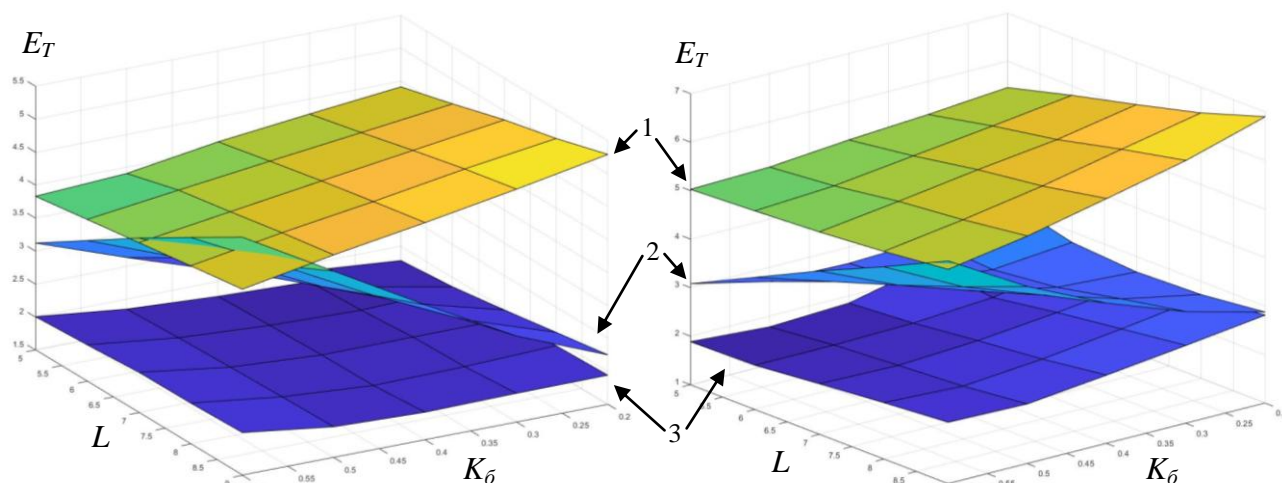


Рисунок 36 – Зависимости оптимального значения выноса точки копирования при различных значениях длины базы и коэффициента базы

Сравнение исследованных методов по критерию эффективности для различных значений конструктивных параметров ДСМ и скорости передвижения подтвердило эффективность разработанного копирного метода управления относительно известных методов (примеры зависимостей на рисунках 37-38).

Значения критерия эффективности копирного метода оказались в диапазоне $E_T = 1,717...5,314$ при значениях скорости машины $V = 0,5...2,5$ м/с, что лучше значений метода «чистое преследование» ($E_T = 1,781...7,247$) в среднем на 23%, и лучше значений метода «Стэнли» ($E_T = 3,851...9,82$) в среднем на 54%.

В шестой главе приведены результаты экспериментальных исследований автогрейдера ГС-14.02 (рисунки 39-43). На первом этапе был проведен активный эксперимент, в качестве входного воздействия был принят поворот передних колес на угол 10° , 20° и 30° .



1 – метод Стэнли; 2 – метод «чистое преследование»; 3 – копирный метод.

Рисунок 37 – Зависимости интегрального критерия E_T различных методов управления от длины базы L и коэффициента базы $K_б$ ($V = 0,5$ м/с)

Рисунок 38 – Зависимости интегрального критерия E_T различных методов управления от длины базы L и коэффициента базы $K_б$ ($V = 1$ м/с)

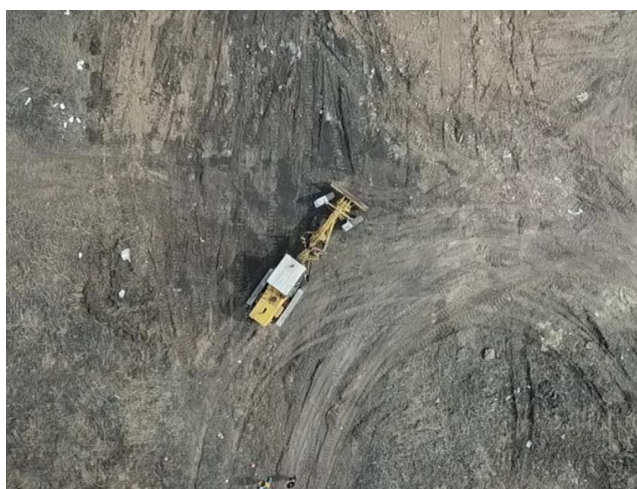


Рисунок 39 – Кадр из съемки эксперимента при повороте автогрейдера



Рисунок 40 – Бортовая измерительная аппаратура

На полигоне была установлена масштабная линейка с шагом 5 м при помощи дорожных конусов. Видеосъемка велась с высоты 40 м с помощью квадрокоптера с установленной видеокамеры высокого разрешения (рисунок 39). Значения углов поворота отдельных элементов автогрейдера измерялись при помощи 3-осных акселерометров-гироскопов (рисунок 40). Далее был произведен покадровый просмотр и построены графики движения центральной точки кромки РО (рисунок 41).

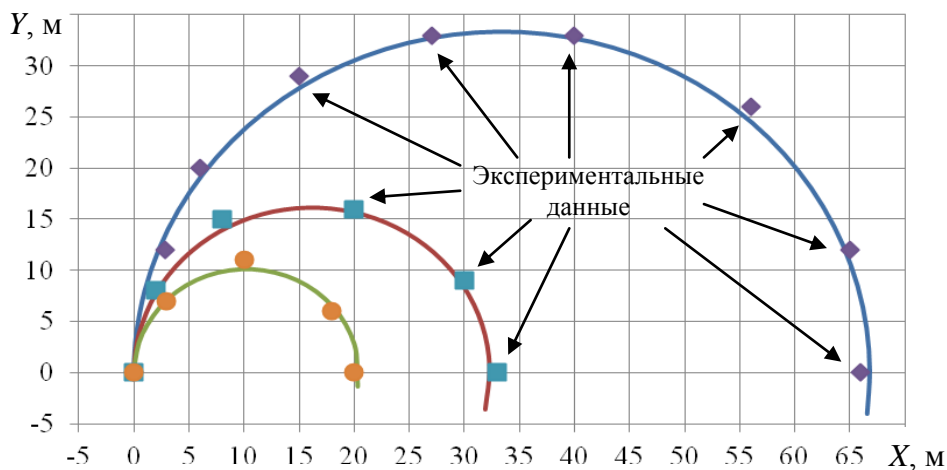


Рисунок 41 – Расчетная траектория движения автогрейдера ГС-14.02 с наложенными экспериментальными данными ($x_0 = 0$; $y_0 = 0$; $\gamma_0 = 0^\circ$, $\varphi_K = 10, 20, 30^\circ$)

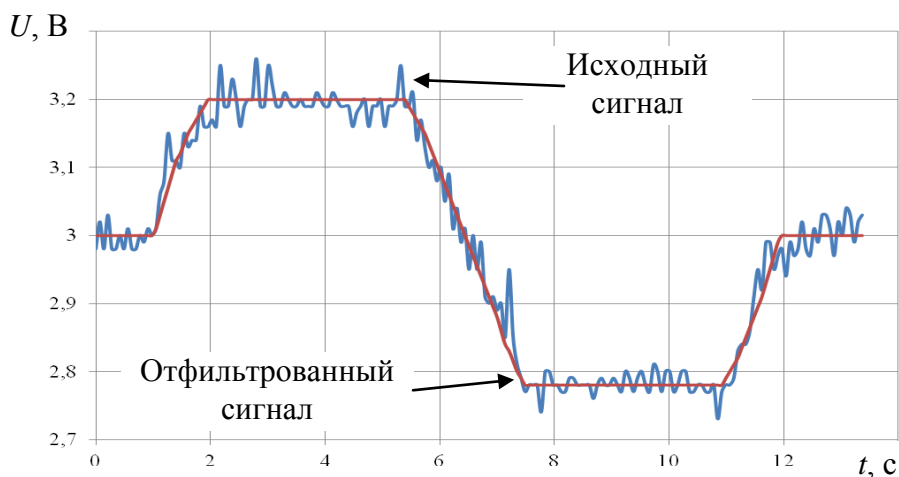


Рисунок 42 – Переходная характеристика выходного сигнала датчика угла поворота передних колес при выполнении маневра «переставка»

На втором этапе экспериментальных исследований оператор автогрейдера выполнял маневр «переставка» с изменением траектории движения на 1 м левее. Переходная характеристика выходного сигнала датчика угла поворота передних колес представлена на рисунке 42. Полученный сигнал был использован в качестве входного воздействия на математическую модель для получения теоретической траектории движения автогрейдера. На полученную зависимость были наложены точки траектории движения автогрейдера, полученные экспериментально (рисунок 43).

В результате проведения экспериментальных исследований была подтверждена адекватность математической модели, расхождения экспериментальных и теоретических значений не превышают: при проведении активного эксперимента – 5 %; при проведении пассивного эксперимента – 7 %.

На основании проведенных исследований были предложены практические рекомендации и технические решения для создания перспективных систем ав-

тономного управления колесными ДСМ, включающие в себя: разработанную двухуровневую структурную схему перспективной системы автономного управления ДСМ (рисунок 44), инженерную методику создания перспективных систем автономного управления ДСМ (рисунок 45), вариант комплекта аппаратуры для технической реализации.

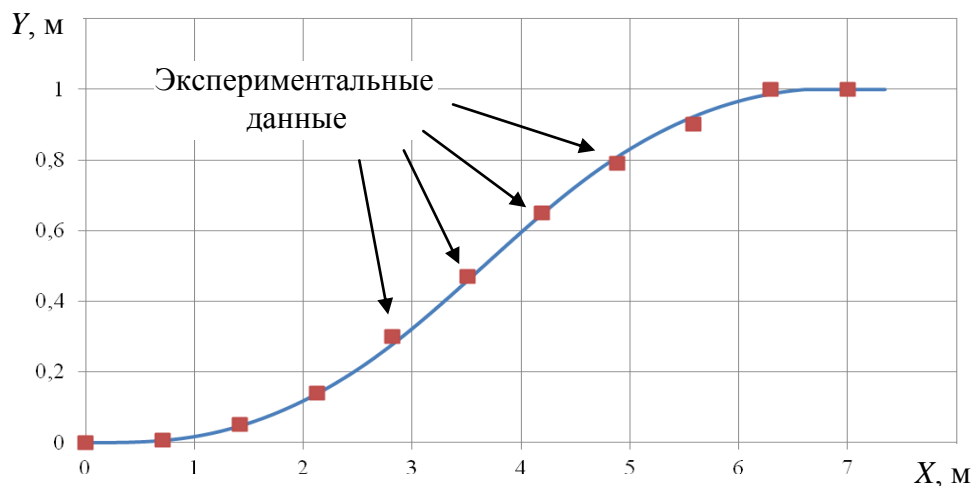


Рисунок 43 – Траектория движения автогрейдера ГС-14.02 при выполнении маневра «переставка»

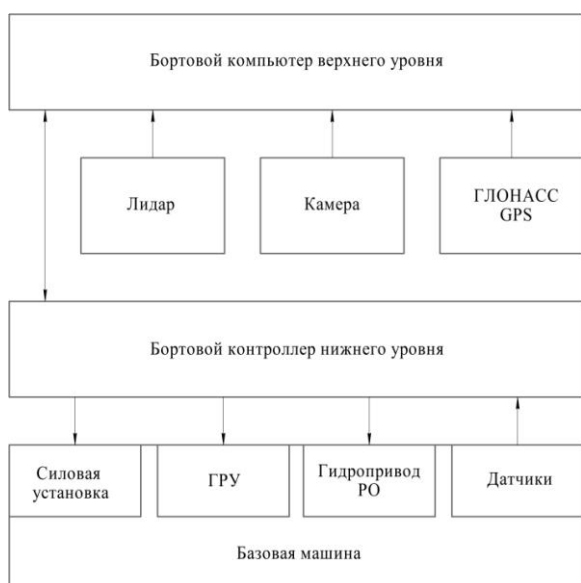


Рисунок 44 – Структурная схема системы автономного управления дорожно-строительной машины



Рисунок 45 – Алгоритм инженерной методики создания системы автономного управления дорожно-строительной машины

Предложенная структурная схема и комплект аппаратуры для технической реализации системы автономного управления были успешно апробированы в ходе выполнения совместного проекта ФГБОУ ВО «СибАДИ» и Университета Иннополис в 2021 году по созданию автономной малогабаритной коммунальной машины (рисунок 46-47).

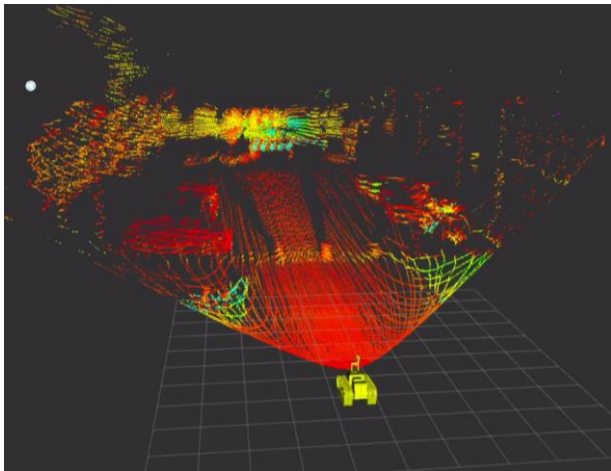


Рисунок 46 – Фрагмент данных с лидара во время испытаний



Рисунок 47 – Фрагмент данных с камеры глубины во время испытаний

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана новая концепция автономного управления колесными дорожно-строительными машинами на основе классификации дорожно-строительных машин, проведенного анализа рабочего процесса и идентификации функций человека-оператора. Разработаны блок-схемы машины с серийной системой управления и машины с перспективной системой автономного управления, которая управляет не только рабочим органом, но и движением машины.

2. Предложена классификация существующих систем управления дорожно-строительными машинами на основе идентификации функций управления, включающая в себя 4 класса, в которую был добавлен новый класс перспективных систем автономного управления, реализующий дополнительную функцию управления движением дорожно-строительной машины.

3. Обоснована методика оценки эффективности рабочего процесса дорожно-строительной машины, оснащенной системой автономного управления. Предложен интегральный критерий эффективности, позволяющий оценить точность движения дорожно-строительной машины по заданной траектории при использовании различных методов управления.

4. Разработана математическая модель сложной динамической системы рабочего процесса дорожно-строительной машины, состоящая из подсистем: базовая машина; микрорельеф; рабочий орган – обрабатываемая среда; ходовое оборудование; гидропривод рабочего органа; гидравлическое рулевое управление, силовая установка, система автономного управления, позволяющую моделировать требуемые траектории движения колесной дорожно-строительной машины при формировании земляного полотна с различным расположением рабочего органа. Адекватность математической модели экспериментально подтверждена, расхождения экспериментальных и теоретических значений не превышают: при проведении активного эксперимента – 5 %; при проведении пассивного эксперимента – 7 %.

5. Разработан метод моделирования трехмерного микрорельефа для теоре-

тических исследований криволинейного движения дорожно-строительных машин. На основе метода создана программа для ЭВМ «Модуль генерации трехмерного микрорельефа для теоретических исследований дорожно-строительных машин» зарегистрированная в установленном порядке (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022612332).

6. Разработан метод построения траектории движения, учитывающий кинематические ограничения колесных дорожно-строительных машин, координаты путевых точек и азимуты направления дальнейшего движения. На основе метода создана программа для ЭВМ «Модуль построения траектории движения дорожно-строительной машины» зарегистрированная в установленном порядке (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022612587).

7. Предложено новое понятие: «вектор состояния дорожно-строительной машины» – это вектор параметров, описывающих текущее положение ДСМ и РО, необходимых и достаточных для реализации методов автономного управления ДСМ. Обоснованы варианты комплектов источников первичной измерительной информации для формирования «вектора состояния».

8. Проведенные теоретические исследования метода «чистое преследование» (Pure Pursuit) позволили получить функциональную зависимость оптимального значения параметра «дальность видимости» от длины базы и коэффициента базы дорожно-строительной машины ($L_0 = (1,6 + 0,04 \cdot L) \cdot V + (3,2 - 5 \cdot K_\sigma + 0,5 \cdot L)$). Таким образом, метод «чистое преследование» был модернизирован путем внедрения новой переменной – скорости, что позволило повысить точность работы при увеличении скорости машины. Значения критерия эффективности метода «чистое преследование» оказались в диапазоне $E_T = 1,781 \dots 7,247$ при значениях скорости машины $V = 0,5 \dots 2,5$ м/с

9. Проведенные теоретические исследования метода «Стэнли» (Stanley) позволили получить функциональную зависимость оптимального значения коэффициента усиления от длины базы и коэффициента базы дорожно-строительной машины ($k = -349,9 + 582,3 \cdot K_\sigma + 58,98 \cdot L$). Таким образом, метод «Стэнли» был адаптирован для управления колесной дорожно-строительной машиной. Значения критерия эффективности метода «Стэнли» оказались в диапазоне $E_T = 3,851 \dots 9,82$ при значениях скорости машины $V = 0,5 \dots 2,5$ м/с.

10. Разработан новый копирный метод управления, для которого на основании проведенных теоретических исследований были получены функциональные зависимости оптимальных значений параметров метода управления ($k_v = V^5(1,7856 + 1,085 \cdot K_\sigma - 0,1308 \cdot L) + (1,247 - 0,7772 \cdot K_\sigma + 0,1154 \cdot L)$, $L_0 = 1,77 \cdot V + (3,55 - 8,2 \cdot K_\sigma + 0,71 \cdot L)$) от основных параметров дорожно-строительной машины (длина базы, коэффициент базы, скорость). Значения критерия эффективности копирного метода оказались в диапазоне $E_T = 1,717 \dots 5,314$ при значениях скорости машины $V = 0,5 \dots 2,5$ м/с, что лучше значений метода «чистое преследование» ($E_T = 1,781 \dots 7,247$) в среднем на 23%, и лучше значений метода «Стэнли» ($E_T = 3,851 \dots 9,82$) в среднем на 54%.

11. Предложены практические рекомендации и технические решения для создания перспективных систем автономного управления колесными ДСМ, включающие в себя: разработанную двухуровневую структурную схему, инженерную методику создания перспективных систем автономного управления дорожно-строительными машинами, комплект аппаратуры для технической реализации. Полученные практические рекомендации были внедрены в АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» (акт внедрения от 12.05.2022). Создание такой системы управления позволит исключить человека-оператора из контуров управления, реализовать принципиально новый научно-обоснованный подход к управлению дорожно-строительными машинами. Результаты исследований могут быть распространены на различные модели колесных дорожно-строительных машин с различными типами рулевого управления и различным расположением рабочего органа при создании систем автономного управления.

В качестве направлений дальнейших исследований предполагается адаптация разработанного копирного метода для управления другими типами дорожно-строительных машин, его модернизация путем внедрения более совершенных законов регулирования и разработка концепции управления комплектом дорожно-строительных машин на одной площадке.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

В рецензируемых научных изданиях, из перечня ВАК Минобрнауки РФ

1. Сухарев Р.Ю. Принципы управления беспилотной дорожно-строительной машиной / Р.Ю. Сухарев, П.А. Корчагин // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 9. – С. 27-32.

2. Сухарев Р.Ю. Особенности кинематики поворота автогрейдера с шарнирно-сочленённой рамой / Р.Ю. Сухарев, П.А. Корчагин // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 7. – С. 3-8.

3. Сухарев Р.Ю. Адаптация метода Стэнли (Stanley) для управления беспилотной дорожно-строительной машиной / Р.Ю. Сухарев, П.А. Корчагин // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 6. – С. 7-14.

4. Сухарев Р.Ю. Применение метода «чистое преследование» (Pure Pursuit) для управления беспилотным автогрейдером / Р.Ю. Сухарев // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т.20. – № 2(84). – С. 156-169. DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-2-156-169.

5. Сухарев Р.Ю. Методы управления курсом движения беспилотного автогрейдера / Р.Ю. Сухарев // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19. – № 1(83). – С. 48-60. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-1-48-60.

6. Сухарев Р.Ю. Математические модели процессов поворота колесных дорожно-строительных машин / Р.Ю. Сухарев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2021. – № 3. – С. 259-269. – DOI 10.22281/2413-9920-2021-07-03-259-269.

7. Сухарев Р.Ю. Перспективы создания систем автономного управления дорожно-строительных машин / Р.Ю. Сухарев // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 2. – С. 3-10.

8. Щербаков В.С. Влияние положения рабочего органа в базе землеройно-транспортной машины на процесс заглабления / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Р.Ю. Сухарев // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2017. – № 4(47). – С. 73-80.

9. Корытов М.С. Способ определения координат дорожных и строительных машин на поверхности земли на основе расстояний до трех спутников / М.С. Корытов, В.С. Щербаков, Р.Ю. Сухарев // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – № 5(51). – С. 18-24.

10. Сухарев Р.Ю. Алгоритм автоматической системы управления рабочим процессом гидравлического одноковшового экскаватора / Р. Ю. Сухарев, А. В. Старостин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2015. – № 6(46). – С. 106-111.

11. Сухарева С.В. Обоснование интегральных критериев качества земляных работ, выполненных цепными траншейными экскаваторами / С.В. Сухарева, Р.Ю. Сухарев // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2015. – № 5(45). – С. 52-55.

12. Сухарев Р.Ю. Моделирование трехмерного микрорельефа для теоретических исследований дорожных и строительных машин / Р.Ю. Сухарев // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2014. – № 6(40). – С. 108-111.

В изданиях, включенных в базы цитирования Web of Science и Scopus

1. Sukharev, R. Y. Trajectory plotting algorithm for a self-driving road grader / R. Y. Sukharev // Journal of Physics: Conference Series, Vladivostok, 07–08 октября 2021 года. – Vladivostok, 2021. – P. 012181. – DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012181.

Монографии

1. Сухарев, Р. Ю. Совершенствование гидравлического рулевого механизма автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой : Электр. ресурс / Р. Ю. Сухарев, В. С. Щербаков, Ю. Е. Ионова. – Омск: СибАДИ, 2020. – 163 с. – ISBN 978-5-00113-158-8.

2. Щербаков, В. С. Развитие теории оптимального управления дорожными и строительными машинами на основе систем спутниковой навигации : Электр. ресурс: монография / В. С. Щербаков, Р. Ю. Сухарев, М. С. Корытов. – Омск: СибАДИ, 2017. – 155 с. – ISBN 978-5-93204-929-7.

3. Щербаков, В. С. Совершенствование рулевого управления автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой : Электр. ресурс / В. С. Щербаков, А. А. Портнова, Р. Ю. Сухарев. – Омск: СибАДИ, 2016. – 157 с. – ISBN 978-5-93204-971-6.

4. Щербаков В.С. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора : монография / В.С. Щербаков, Р.Ю. Сухарев. – Омск: СибАДИ, 2011. – 149 с. – ISBN 978-5-93204-598-5.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Модуль генерации трехмерного микрорельефа для теоретических исследований дорожно-строительных машин. № 2022612332 : заявл. 07.02.2022 : опубл. 10.02.2022 / Р.Ю. Сухарев ; заявитель ФГБОУ ВО «СибАДИ».

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Модуль построения траектории движения дорожно-строительной машины. № 2022612587 : заявл. 17.02.2022 : опубл. 28.02.2022 / Р.Ю. Сухарев ; заявитель ФГБОУ ВО «СибАДИ».

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Модуль определения координат дорожно-строительной машины на поверхности земли на основе расстояний до трех спутников. № 2022618207 : заявл. 22.04.2022 : опубл. 05.05.2022 / Р.Ю. Сухарев, М.С. Корытов, В.С. Щербаков ; заявитель ФГБОУ ВО «СибАДИ».

Публикации в других изданиях

1. Сухарев Р.Ю. Анализ систем управления дорожно-строительных машин и направления дальнейшего развития / Р.Ю. Сухарев // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : Сборник материалов V Национальной научно-практической конференции. – Омск: СибАДИ, 2022. – С. 98-104.

2. Сухарев Р.Ю. Интегральные критерии оценки качества земляных работ, выполняемых цепными траншейными экскаваторами / Р.Ю. Сухарев, С.В. Сухарева // Управление качеством образования, продукции и окружающей среды : Материалы 9-й Всероссийской научно-практической конференции, Бийск, 13–14 ноября 2015 года. – Бийск: АлтГТУ, 2015. – С. 135-138.

3. Беркович М.В. Использование базовых станций ГЛОНАСС для увеличения точности позиционирования строительной техники / М.В. Беркович, Р.Ю. Сухарев // Фундаментальные и прикладные науки - основа современной инновационной системы : Материалы международной научно-практ. конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Омск: СибАДИ, 2015. – С. 348-353.

4. Сухарев Р.Ю. Системы управления гидравлического одноковшового экскаватора / Р. Ю. Сухарев, А. В. Старостин // Фундаментальные и прикладные науки - основа современной инновационной системы : Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Омск: СибАДИ, 2015. – С. 361-364.

5. Сухарева С.В. Система управления цепного траншейного экскаватора на основе нечеткой логики / С.В. Сухарева, Р.Ю. Сухарев // Архитектура, строительство, транспорт : материалы Международной научно-практ. конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО "СибАДИ"). – Омск: СибАДИ, 2015. – С. 774-778.