

Министерство науки и высшего образования РФ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

**ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

664074 Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 83
телефон: +7(3952)405-000, факс: +7(3952)405-100

E-mail: info@istu.edu

ОКПО 02068249, ОГРН 1023801756120

ИНН/КПП 3812014066/381201001

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «ИРИТУ»

А.М. Кононов

« 22 » 05 2023 года



№ _____

на № _____ от _____

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» на диссертацию Сухарева Романа Юрьевича «Научные основы автономного управления колесными дорожно-строительными машинами», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

На отзыв представлена диссертация объемом 295 страниц основного текста, автореферат объемом 36 страниц, копии печатных работ, патента и свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

1. Актуальность темы исследования

Строительство дорог – это достаточно трудоемкий и дорогостоящий процесс. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года планирует существенное развитие скоростных автомагистралей в нашей стране с высокими точностными и прочностными параметрами. Решение поставленных задач невозможно без применения высокоэффективных дорожно-строительных машин (ДСМ), оснащенных автоматизированными системами управления (СУ).

В этой связи проблема, решаемая в докторской диссертации Сухарева Романа Юрьевича, чрезвычайно важна и своевременна. Особая острота решаемой проблемы возникает в условиях санкций, направленных против нашей страны.

Привлечение ВМ-технологий, спутниковых навигационных систем, микропроцессорной техники позволили автору научно обосновать двухуровневую

005626

ФГБОУ ВО «СибАДИ»

ОГРН 1025500523950

Вх. № 22-2182

от 13 06 20 23 г.

структуру перспективной системы автономного управления ДСМ, признанную изобретением.

Полученные в результате исследований новые научные знания в значительной степени восполнили отсутствие научных основ для создания перспективных систем автономного управления ДСМ.

Изложенное позволяет утверждать, что тема докторской диссертации Р.Ю. Сухарева – актуальна.

По теме диссертации опубликовано 25 научных работ, в том числе: 12 работ в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ, 1 работа в научном издании, входящем в базу Scopus, получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, получен патент на изобретение, опубликованы 4 монографии.

2. Общие сведения о диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов по работе, списка литературы из 252 наименований, общим объемом 295 страниц основного текста и приложений на 25 страницах.

Введение содержит обоснование актуальности диссертационной работы. Убедительно доказано, что без прорывных технологий, цифровизации, компьютеризации и автоматизации ДСМ невозможно решение грандиозных задач, намеченных Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. В связи с этим цель работы: решение научной проблемы повышения эффективности работы колесных ДСМ путем разработки научных основ и методов автономного управления – актуальна.

Раскрыта степень разработанности темы исследования, сформулированы объект и предмет исследования, выдвинута научная гипотеза, представлены задачи исследования, обоснована методика исследования, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Достоверность исследований обеспечена корректностью принятых допущений, адекватностью математических моделей, профессиональным использованием методов имитационного моделирования и достаточным объемом экспериментальных данных.

Материалы диссертации прошли достаточно широкую апробацию и опубликованы в научных изданиях. Получен патент на изобретение и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Первая глава посвящена достаточно глубокому анализу состояния вопроса, проанализированы отечественные и зарубежные исследования, связанные с совершенствованием ДСМ и их СУ. Особый интерес представляет анализ ДСМ по признаку функций управления, в результате выявлены общие функции, которые

должны реализовывать перспективные системы автономного управления. Сформулирована концепция автономного управления ДСМ.

Использование ВМ-технологий для создания 3D-проекта сооружения, цифровой карты местности и информации спутниковых навигационных систем позволяют смоделировать «цифрового двойника» формируемого земляного сооружения. В классификацию введен новый класс систем автономного управления.

Одним из отличительных признаков систем автономного управления является «точность следования заданной траектории», количественно оцениваемая интегральным критерием.

На основании анализа состояния вопроса установлено, что, не смотря на многочисленные исследования в области ДСМ и их СУ, в настоящее время отсутствуют теоретические основы, необходимые для создания систем автономного управления. Были сформулированы научные задачи исследования, решение которых позволит достичь поставленную в диссертационной работе цель.

Вторая глава базируется на методологии системного анализа и посвящена разработке методологии исследования. Дано обоснование комплексной методики исследования, содержащей как теоретические, так и экспериментальные исследования.

Теоретические разделы содержат как аналитические, так и имитационные исследования на ЭВМ математических моделей, предложенных автором, и направлены на выявление новых, ранее не известных функциональных зависимостей, связывающих конструктивные и технологические параметры с критерием эффективности. Экспериментальные исследования позволили получить численные значения параметров, входящих в математические модели, подтвердить их адекватность и доказать эффективность предложенных разработок.

Третья глава, в соответствии с принятой методологией системного анализа, рассматривает рабочий процесс ДСМ как сложную динамическую систему, состоящую из подсистем: базовая машина, рабочий орган – разрабатываемый грунт, гидропривод рабочего органа, гидравлическое рулевое управление, силовая установка, микрорельеф – ходовое оборудование, система управления.

Новизной отличаются пространственные расчетные схемы базовых машин, разработанные с учетом принятых допущений и особенностей кинематики автогрейдера и фронтального погрузчика. Уравнения движения составлены методом дифференциальных уравнений Лагранжа 2 рода и представлены в векторно-матричной форме в однородных координатах.

Уравнения кинематики и динамики поворота машин представлены не только в аналитическом виде, но и в виде структурных схем, что позволило в дальнейшем

интегрировать их в обобщенную структурную схему рабочего процесса ДСМ и исследовать на ЭВМ.

Подсистема рабочий орган – разрабатываемый грунт представлена известными уравнениями теории копания Федорова – Бондаровича в виде суммы тренда и флюктуации.

Положение рабочего органа автогрейдера характеризуется вертикальной и угловой координатами, при этом поперечный угол формируемого земляного полотна учитывает угол захвата рабочего органа.

Подсистема гидропривода рабочего органа содержит математическое описание электрогидрозолотников и гидроцилиндров.

Математическая модель гидравлического рулевого управления описывает цилиндрический гидрораспределитель, гидромотор отрицательную обратную связь, гидроцилиндр поворота.

Научной новизной обладает метод моделирования трехмерного микрорельефа, основанный на холмовом алгоритме и цифровом фильтре для расчета вертикальных координат неровностей в соответствии с заданной спектральной плотностью микрорельефа. Метод зарегистрирован в виде программы для ЭВМ.

Силовая установка представлена традиционной математической моделью в виде передаточных функций, описывающих процессы «нагрузка – двигатель – регулятор».

Математические модели отдельных подсистем методом композиции объединены в единую математическую модель рабочего процесса ДСМ.

Четвертая глава посвящена разработке методологии автономного управления колесной ДСМ, которая содержит методы управления движением колесных ДСМ и метод построения траектории их движения с учетом кинематических особенностей колесных ДСМ.

Впервые представлены блок-схемы рабочего процесса колесной ДСМ с серийной и перспективной системами автономного управления, достаточно подробно отражающие основные подсистемы сложной динамической системы и их функциональные связи.

В качестве информационных параметров самых совершенных СУ являются сигналы датчиков, установленных на ДСМ и сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС, GPS и др.). Существующие СУ облегчают работу человека-оператора по управлению положением рабочего органа ДСМ, но человек-оператор по-прежнему управляет гидроприводом рулевого управления и силовой установкой, формируя траекторию движения ДСМ.

Предлагаемая перспективная система автономного управления, на которую получен патент на изобретение, исключает человека-оператора из контуров управления ДСМ. На систему автономного управления возлагаются функции:

построение оптимальной траектории движения ДСМ на основе 3D-проекта земляного сооружения и электронной карты местности.

Для реализации этого проекта автором был разработан метод построения траектории движения колесной ДСМ с помощью массива путевых точек. В результате исследования получены новые знания, необходимые для создания системы автономного управления.

Введен новый термин «вектор состояния ДСМ». Это вектор информационных параметров, необходимых и достаточных для осуществления метода автономного управления.

Для подтверждения эффективности предложенного автором «копирного метода» управления ДСМ был проведен сравнительный анализ предложенного метода с известными методами: методом Стэнли и методом «чистое преследование». В процессе исследования были разработаны расчетные и структурные схемы методов, дано их математическое описание.

Пятая глава посвящена теоретическим исследованиям процесса управления движением ДСМ.

Установлена ранее неизвестная математическая зависимость между углом поворота передних управляемых колес автогрейдера и углом складывания полурам для обеспечения движения передней и задней оси по одной колее.

Для метода «чистое преследование» найдены оптимальные зависимости «дальности видимости» для различных конструктивных параметров ДСМ, предложено модифицировать этот метод, введя в качестве информационного параметра скорость движения ДСМ.

Для метода Стэнли выявлены зависимости критерия эффективности от конструктивных параметров ДСМ, скорости движения и коэффициента усиления. По уравнениям регрессии найдены оптимальные значения коэффициента усиления для различных значений конструктивных параметров ДСМ. В результате метод Стэнли был адаптирован для управления ДСМ.

Но основная научная новизна и практическая значимость этой главы состоит в достаточно глубоком исследовании предложенного автором копирного метода управления ДСМ.

Установлены ранее неизвестные зависимости критерия эффективности и перерегулирования от основных конструктивных параметров ДСМ, скорости движения и настроечных параметров предложенного метода: выноса точки копирования и коэффициента усиления.

Выявленные функциональные зависимости были аппроксимированы уравнениями регрессии и найдены их оптимальные значения.

Доказано, что предложенный копирный метод превосходит по принятому критерию эффективности метод «чистое преследование» в среднем на 23%, а метод Стэнли в среднем на 54%.

Шестая глава приводит результаты экспериментальных исследований автогрейдера ГС-14.02 методами как активного, так и пассивного эксперимента. Уточнены значения численных параметров, входящих в математические модели, подтверждена адекватность математических моделей, расхождение экспериментальных и теоретических данных не превысило 7%.

Предложены практические рекомендации и технические решения для создания перспективных систем автономного управления колесных ДСМ, включающие: двухуровневую систему автономного управления, новизна которой подтверждена патентом на изобретение (RU 2794670 C1), инженерную методику создания перспективных систем автономного управления, внедренную для практической реализации в АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения», обоснованный вариант комплекта аппаратуры для технической реализации системы. Научные и практические рекомендации были успешно апробированы в процессе выполнения совместного научного проекта ФГБОУ ВО «СибАДИ» и Университета Иннополис в 2021 году.

Общие результаты и выводы по работе показывают решение поставленных в работе задач.

В приложениях приведены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, акты внедрения полученных результатов, листинги программ.

3. Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

К наиболее значимым результатам диссертации, представляющим научную новизну, следует отнести:

- концепцию автономного управления, базирующуюся на идентификации функций человека-оператора, проведенной классификации дорожно-строительных машин с точки зрения функций управления и блок-схеме рабочего процесса колесной дорожно-строительной машины, оснащенной перспективной системой автономного управления;
- методологию автономного управления, включающую в себя метод построения траектории движения машины, копирный метод управления движением машины, метод определения координат машины, новое понятие – «вектор состояния» машины;
- полученные новые функциональные зависимости оптимальных значений параметров методов «чистое преследование», Стэнли и копирного метода от конструктивных и эксплуатационных параметров машины при различном расположении рабочего органа относительно базы.

4. Значимость полученных автором диссертации результатов

Для реализации предложенной методологии автономного управления автором разработаны:

- метод построения траектории, учитывающий кинематические ограничения колесных дорожно-строительных машин, который был зарегистрирован в виде программы для ЭВМ;

- копирный метод управления движением колесной дорожно-строительной машины, который в сравнении с известными методами оказался в среднем на 23% эффективнее метода «чистое преследование» и на 54% эффективнее метода Стэнли;

- метод моделирования трехмерного микрорельефа, необходимый для теоретических исследований математических моделей дорожно-строительных машин, который был зарегистрирован в виде программы для ЭВМ.

Для практической реализации результатов и положений диссертации автором предложена двухуровневая система автономного управления, на которую получен патент на изобретение и инженерная методика по ее созданию.

Использование приведенных теоретических и практических результатов работы позволит создать класс принципиально новых систем автономного управления дорожно-строительными машинами и повысить эффективность их работы.

Практическая ценность результатов исследования подтверждена актом внедрения в АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» и актом внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

5. Обоснованность и достоверность научных результатов

Полученные автором результаты не противоречат проведенным ранее исследованиям. Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментально. Принятые в работе допущения и ограничения корректны и отражены в полном объеме. Грамотно применяются положения методологии системного анализа, теории вероятности, регрессионного анализа, теоретической механики, математической статистики.

6. Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Результаты диссертационного исследования рекомендуются к внедрению предприятиями и организациями, занимающимися разработкой и производством систем управления для дорожно-строительной и иных видов техники. Применение систем автономного управления рекомендуется предприятиям, разрабатывающим, выпускающим и эксплуатирующим дорожно-строительные машины, что позволит значительно повысить их эффективность.

7. Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Содержание диссертации соответствует области исследований 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»).

8. Замечания по диссертации

1. Не ясно, почему критерий «перерегулирование» использован только при исследовании копирного метода?

2. В разделе «Научная новизна» приведены формулы без расшифровки входящих в них параметров.

3. На расчетных схемах автогрейдера (рис. 1 автореферата, рис. 3.2.1 диссертации) указаны радиусы колес, а на расчетных схемах фронтального погрузчика (рис. 2 автореферата, рис. 3.3.1 диссертации) радиусы не указаны. Имеется ли различие в построении математических моделей?

4. На стр. 253 рис. 6.2.1 представлена двухуровневая структурная схема системы автономного управления, однако далее по тексту не даны пояснения, какие датчики первичной измерительной информации необходимо включить в состав системы.

5. На стр. 252 рис. 6.1.5 представлена переходная характеристика выходного сигнала датчика угла поворота передних колес, на которой исходный сигнал обладает достаточно серьезной колебательностью. Не раскрыта причина появления колебаний. Не является ли это признаком колебания передних колес автогрейдера в связи с неисправностью?

6. В параграфе 5.6 приведены результаты теоретических исследований математической модели фронтального погрузчика, однако на рис. 5.6.1 приведен общий вид автогрейдера.

9. Заключение

В целом докторская диссертация Р.Ю. Сухарева является законченной научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно на достаточно высоком научном уровне.

В работе предложена концепция автономного управления дорожно-строительными машинами и ее методологическое обеспечение, разработаны метод моделирования трехмерного микрорельефа, метод построения траектории движения, копирный метод управления движением машины. Предложены и внедрены практические рекомендации по реализации результатов исследований.

Полученные автором результаты достоверны и не противоречат предшествующим исследованиям, выводы по работе обоснованы и говорят о достижении поставленной в работе цели.

Полученные автором новые научные знания и положения позволяют квалифицировать результаты исследования как решение крупной научно-технической проблемы автономного управления дорожно-строительной техникой, имеющей важное хозяйственное значение.

Автореферат включает в себя основные положения диссертации.

Диссертационная работа отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям пп. 9-14 постановления Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.13 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Сухарев Роман Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по научной специальности 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы.

Диссертация, автореферат и отзыв были рассмотрены на заседании кафедры «Строительные, дорожные машины и гидравлические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», протокол № 10 от «19» мая 2023 г.

Заведующий кафедрой «Строительные, дорожные машины и гидравлические системы», к.т.н. по специальности 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины, доцент



Кокоуров
Дмитрий Владимирович

Профессор кафедры «Строительные, дорожные машины и гидравлические системы», д.т.н. по специальности 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины, профессор

Зедгенизов
Виктор Георгиевич

С отзывом ознакомлен

13.06.23 [Signature] Сухарев Р.Ю.