

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию «Научные основы автономного управления колесными дорожно-строительными машинами» Сухарева Романа Юрьевича, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.11 «Наземные транспортно-технологические средства и комплексы»

На отзыв представлена диссертационная работа объемом 295 страниц основного текста, автореферат объемом 36 страниц, копии опубликованных работ, патента на изобретение, свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

### Актуальность темы работы

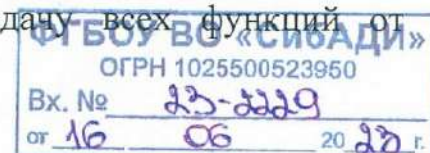
Беспилотные технологии в последнее время активно развиваются и внедряются во многие отрасли, особенно в автомобильный транспорт и сельскохозяйственные машины. Однако в области управления дорожно-строительными машинами подобных исследований пока не проводилось. Повышение эффективности работы дорожно-строительных машин имеет важное хозяйственное значение. Определенные Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года объемы строительства дорог предполагают использование современной высокоэффективной техники, оснащенной передовыми системами управления.

Таким образом, актуальность темы рассматриваемой диссертации, посвященной автономному управлению дорожно-строительной техникой не вызывает сомнений.

### Структура и содержание работы

**Во введении** раскрыта актуальность темы исследования, приведена информация о предшествующих исследованиях по данной тематике, выдвинута научная гипотеза, сформулирована цель работы, обозначены объект и предмет исследования, поставлены задачи работы. Сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведена информация о публикациях соискателя и структуре работы.

**Первая глава** работы посвящена анализу состояния вопроса. Проведен обзор предшествующих исследований. На основе анализа дорожно-строительных машин, с точки зрения функций управления, составлена классификация, что позволило выявить общие функции управления для разных типов машин. Предложена классификация существующих систем управления, в которую введен новый класс систем автономного управления. Сформулирована концепция автономного управления, которая предполагает передачу всех функций от



человека-оператора к системе автономного управления. Также в первой главе предложена методика оценки эффективности работы колесных дорожно-строительных машин, оснащенных системами автономного управления. Проведен анализ математических моделей микрорельефа, теорий копания грунта и принципов функционирования глобальных навигационных спутниковых систем.

**Во второй главе** рассмотрена общая методология исследований, которая предполагает комплексный подход, включающий теоретические и экспериментальные исследования. На основе методологии системного анализа обоснована структура работы.

**В третьей главе** приведено описание математической модели сложной динамической системы рабочего процесса колесной дорожно-строительной машины, основными подсистемами которой являются: базовая машина, рабочий орган – грунт, гидропривод рабочего органа, гидравлическое рулевое управление, силовая установка, микрорельеф – ходовое оборудование, система управления.

В качестве базовых машин были выбраны автогрейдер и фронтальный погрузчик. Для их математического описания были разработаны пространственные расчетные схемы, приняты допущения и составлены математические модели с помощью метода дифференциальных уравнений Лагранжа 2 рода. Математические модели отдельных подсистем были представлены в виде дифференциальных уравнений и передаточных функций с учетом принятых допущений.

**Четвертая глава** раскрывает методологию автономного управления. В результате проведенного анализа автором предложены 3 блок-схемы рабочего процесса колесной дорожно-строительной машины: без системы автоматизации, с серийной системой управления и с перспективной системой автономного управления.

Для построения траектории движения предложен метод, учитывающий особенности колесных дорожно-строительных машин. Данный метод построения траектории был зарегистрирован в виде программного продукта для ЭВМ.

Для управления движением машины автор рассмотрел два известных решения: метод «чистое преследование» и метод Стэнли и предложил новый координатный метод управления. Для перечисленных методов приведены расчетные схемы, математическое описание и структурные схемы.

**Пятая глава** содержит результаты теоретических исследований рассмотренных в четвертой главе методов управления. Для каждого метода были получены зависимости интегрального критерия эффективности от конструктивных и эксплуатационных параметров машины и параметров настройки метода управления.

Полученные зависимости были аппроксимированы, что позволило найти оптимальные значения варьируемых параметров и выявить функциональные зависимости оптимальных значений параметров метода от конструктивных и эксплуатационных параметров машины.

Проведенные исследования позволили оценить эффективность предложенного копирного метода по сравнению с другими известными методами управления.

Для подтверждения правомерности использования предложенного копирного метода для других машин, кроме автогрейдера, были проведены исследования и на математической модели фронтального погрузчика.

**Шестая глава** включает в себя результаты экспериментальных исследований, подтверждающие адекватность математических моделей, разработанных в диссертации, при этом расхождение теоретических и экспериментальных данных не превысило 7%.

В качестве практических рекомендаций и технических решений автором предложены: двухуровневая структурная схема перспективной системы автономного управления, инженерная методика для ее создания и вариант комплекта аппаратуры для технической реализации.

Практическая значимость предложенных решений подтверждается патентом на изобретение № 2794670 «Система автономного управления дорожно-строительной машины», актом внедрения результатов в АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения» и актом внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО «СибАДИ».

**Общие выводы по работе** соответствуют поставленным задачам, раскрывают основные результаты исследования и намечают направления дальнейших исследований.

**В приложениях** приведены листинги программ, акты внедрения, копии регистрационных документов, подтверждающих практическую значимость результатов исследования.

### **Обоснованность и достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов работы обеспечивается корректностью принятых допущений. Полученные в ходе проведения исследования результаты не противоречат проведенным ранее исследованиям. Результаты экспериментальных исследований позволили подтвердить адекватность математических моделей и теоретических положений, предложенных в диссертации.

## **Научная новизна результатов исследований, вводов и рекомендаций, сделанных в диссертации**

Основные научные результаты, отражающие научную новизну:

- предложенная концепция автономного управления, основанная на идентификации функций управления дорожно-строительных машин и разработанной блок-схеме рабочего процесса;
- разработанная математическая модель рабочего процесса дорожно-строительной машины, представленная в виде сложной динамической системы, включающей ряд подсистем;
- разработанный метод построения траектории движения колесной дорожно-строительной машины, учитывающий ее кинематические особенности;
- предложенный новый научный термин «вектор состояния дорожно-строительной машины», включающий в себя набор параметров машины, необходимый для автономного управления;
- адаптированные для управления колесной дорожно-строительной машиной методы «чистое преследование» и Стэнли;
- разработанный новый копирный метод управления колесной дорожно-строительной машиной, эффективность которого в среднем на 23% лучше метода «чистое преследование» и на 54% лучше метода Стэнли.

## **Практическая ценность**

Практическая ценность исследования определяется комплексом предложенной методологии автономного управления, включающей в себя метод построения траектории движения, методы управления движением, и предложенных практических решениях, включающих в себя двухуровневую структурную схему и инженерную методику для создания перспективных систем автономного управления дорожно-строительными машинами.

Использование предложенной методологии автономного управления позволит создать класс принципиально новых систем автономного управления дорожно-строительными машинами и повысить эффективность их работы.

В рамках выполнения диссертации получен патент на изобретение и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Применение данных разработок позволит создавать перспективные системы автономного управления дорожно-строительных машин.

Практическая ценность проведенного 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)».

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты исследования могут быть рекомендованы к внедрению предприятиями и организациями, занимающимися производством дорожно-строительной техники, предприятиями, занимающимися производством систем управления для дорожно-строительной техники, что позволит повысить эффективность производимых машин и осуществить импортозамещение.

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.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Содержание диссертационной работы 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»).

### **Замечания по диссертационной работе**

1. При обосновании расчетной схемы автогрейдера (3.2) не указано для машины, с какой колесной формулой она составлялась, а от ее вида будут зависеть реакции на колесах.
2. Непонятно почему на пространственных расчетных схемах автогрейдера (рис. 3.2.1, стр. 76) и фронтального погрузчика (рис. 3.3.1, стр. 81) к ведущим колесам приложено разное количество сил в продольном направлении (у автогрейдера отсутствуют силы  $\bar{R}_i$ ).
3. На пространственных расчетных схемах автогрейдера (рис. 3.2.1, стр. 76) и фронтального погрузчика (рис. 3.3.1, стр. 81) отсутствуют боковые силы  $F_{гиy}$ , хотя их наличие признается, и предельное значение величины определяется зависимостью 3.9.5 на стр. 110.

4. Упруго-вязкие свойства грунта и пневматических шин учитывались только в вертикальном направлении, хотя в боковом направлении они имеют сравнимые величины.
5. Для определения вертикальных реакций, действующих на колеса автогрейдера, принята расчетная схема (рис.3.9.33, стр. 110) не учитывающая действие крутящего момента в шарнире подвески балансира, который приводит к значительному перераспределению нагрузок на его ведущие колеса.
6. При описании предложенного копирного метода введен параметр  $L_0$  – вынос точки копирования, и аналогичный параметр в методе «чистое преследование»  $L_0$  – дальность видимости. В чем их принципиальная разница?
7. Не ясно, почему рассмотрены только два известных метода управления – «чистое преследование» и метод Стэнли.
8. В 4 главе в методе построения траектории описан четкий алгоритм выбора направления поворота автогрейдера при выполнении определенных логических условий. В данном случае целесообразно было бы использовать аппарат булевой алгебры.
9. На стр. 51 обоснован интегральный критерий эффективности  $E_T$ , который использован при исследовании различных методов управления. Зачем на стр. 192 был выбран второй критерий – перерегулирование переходного процесса?
10. В диссертации рассмотрены два типа дорожно-строительных машин с рабочим органом расположенным в базе и перед базой. Почему вне поля зрения остались машины с расположением рабочего органа за базой машины?
11. При исследованиях всех трех методов управления проводились многофакторные эксперименты. Не ясно, какой план эксперимента был использован. Почему отсутствуют полнофакторные уравнения регрессии?

### **Заключение**

Диссертация Сухарева Романа Юрьевича «Научные основы автономного управления колесными дорожно-строительными машинами» посвящена актуальной теме, написана на высоком научном уровне, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена крупная

научная проблема повышения эффективности работы колесных дорожно-строительных машин на основе методологии автономного управления, имеющая важное хозяйственное значение.

Диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям пунктами 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Сухарев Роман Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.11 «Наземные транспортно-технологические средства и комплексы».

Жулай Владимир Алексеевич  
официальный оппонент,  
доктор технических наук по специальности  
05.05.04 – «Дорожные, строительные и  
подъемно-транспортные машины»  
профессор, заведующий кафедрой  
строительной техники и инженерной  
механики им. профессора Н.А. Ульянова  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»  
394006, Россия, г. Воронеж,  
ул. 20-летия Октября, 84  
Тел.: +7(473)277-01-29  
e-mail: [zhulai@vgasu.vrn.ru](mailto:zhulai@vgasu.vrn.ru)



24.05.2023 г.

Подпись В.А. Жулая заверяю.  
Первый проректор - проректор по науке  
доктор техн. наук, профессор



Дроздов И.Г.

С одобрением  
16.06.23  
