

На правах рукописи

УДК 629.11.012.8



Волков Александр Александрович

ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ В ПОВОРОТЕ БЫСТРОХОДНОЙ  
ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Курган – 2018

Работа выполнена на кафедре «Гусеничные машины и прикладная механика» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Курганский государственный университет».

Научный руководитель: Держанский В.Б. – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет»

Официальный оппонент: Е.Б. Сарач – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

А.А. Абызов – доктор технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт транспортного машиностроения» (ВНИИТрансмаш), г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г., в \_\_<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета и на его официальном сайте <http://susu.ac.ru/>.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, на имя ученого секретаря диссертационного совета Д212.298.09.  
E-mail: D212.298.09@mail.ru

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

Лазарев Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Важнейшим показателем эксплуатационных качеств быстроходных гусеничных машин (БГМ) является подвижность, характеризуемая скоростными качествами. При комплексном подходе совершенствования конструкции гусеничных машин, таких как: повышение удельной мощности с 12 до 25 кВт/т, применение гидромеханической трансмиссии с дифференциальным гидрообъемным (ГОП) механизмом поворота с современными электронными системами позволяют обеспечить повышение скоростных свойств современных БГМ. Но реализовать, указанные свойства, в полной мере не удастся из-за ряда динамических событий вызываемых прямолинейным движением и в процессе поворота, особенно трудно реализовать на роботизированных машинах. Основным недостатком дифференциальных гидрообъемных механизмов поворота состоит в том, что для достижения высоких динамических качеств, при управлении поворотом необходима высокая установочная мощность гидрообъемной передачи (ГОП). При существенных ограничениях по условиям компоновки и объемно-массовым параметрам установочная мощность ГОП системы управления поворотом ограничена. В связи с этим в системе управления поворотом отечественных и зарубежных машин вводится ряд конструктивных решений по созданию управляемых многопоточных приводов, обеспечивающих повышение динамических свойств и управляемости быстроходной гусеничной машины. Так как данные машины предназначены для эксплуатации в суровых условиях вдали от населенных пунктов, поэтому весьма затруднительно организовать качественное сервисное обслуживание. Из-за недостаточной надежности электронных элементов, гидрообъемных передач и ограничение конечной стоимости изделия, приводит к необходимости создания гораздо более простых механизмов и систем управления поворотом. Ими являются механизмы поворота с дискретными свойствами, обладающие преимуществами по сравнению с системами указанными ранее. Данным механизмом оснащены многие ранее разработанные машины, а так же современный перспективный снегоболотоход ТМ-140А, предназначенный для суровых условий эксплуатации в Арктике.

Сравнительные испытания гусеничных машин с различными системами управления поворотом (СУП) показали, что при движении по деформируемому грунту с удельной мощностью до 20 кВт/т оснащенных СУП с дискретными свойствами, средняя скорость движения не ниже, чем

у машин с непрерывными свойствами. При движении по дорогам с мало деформируемым основанием (асфальт, бетон, мерзлый грунт), с ограниченными сцепными свойствами и интенсивным изменением кривизны, на тестовых трассах «змейка», «переставка» и «затяжной поворот», скоростные качества машин, оснащенных СУП с дискретными свойствами, ограничены и не превышают 36...38 км/ч. Это связано с невозможностью плавного регулирования кривизны траектории, углового ускорения и компенсации отклонения траектории. Это приводит к увеличению интенсивности управляющей деятельности водителя, число подруливаний на километр пути возрастает в 6...9 раз, достигая 96 на 1 км пути. Из-за психофизиологического компенсирующего управление, водителя, эффективно при скорости меньшей 36 - 38 км/ч, а при дистанционном управлении робототехническим комплексом (РТК) на базе этих машин средняя скорость движения не превышает 5 км/ч. Это определяет актуальность исследования.

**Цель работы состоит в** повышении быстроходности гусеничной машины на основе совершенствования алгоритмов управления, учитывающих новые закономерности взаимодействия движителя с опорным основанием, получаемые на основе расчетно-экспериментальных методов с использованием современных информационных технологий.

**Задачи исследования:**

1. Теоретическое исследование управляемого движения БГМ. Имитационное моделирование движения машины, определение кинематических, силовых и динамических свойств машины, их зависимости от параметров конструкции машины и условий движения.

2. Экспериментальное исследование динамики управляемого движения БГМ, идентификация параметров системы, определение кинематических, динамических и силовых параметров движения гусеничной машины.

3. Обобщение результатов теоретического и экспериментального исследования, верификация математической модели движения гусеничной машины, разработка новых способов определения необходимого поворачивающего момента и коэффициента сопротивления уводу шин опорных катков, обоснование алгоритма управления, обеспечивающего повышение быстроходности гусеничной машины.

Решение выше указанных задач, позволит более корректно оценивать скоростные качества быстроходных гусеничных машин и обосновать пути их повышения.

### **Методология и методы исследования.**

При решении задач диссертационного исследования было произведено имитационное моделирование управляемого движения БГМ по усовершенствованной математической модели. Производился динамический анализ объекта исследования, это фазово-частотные характеристики и качество переходных процессов, на основе теории управляемости и устойчивости движения транспортных машин. Валидация математической модели и принимаемых допущений, осуществлялась на основе лабораторно-дорожных испытаний. Обработка полученных результатов экспериментального исследования осуществлялись в программных пакетах PowerGraph, VBOXTools, Mathcad, LMS AMESim и MATLAB.

### **Научная новизна исследования состоит в следующем:**

- в разработке усовершенствованной математической модели движения машины, метода расчетно-экспериментального определения параметров грунта и коэффициента сопротивления боковому уводу в режиме реального времени, его зависимости от угла скольжения с учетом параметров конструкции блока подвески опорных катков и их взаимодействие с опорной поверхностью через гусеницу;
- в установлении новых закономерностей кинематических и силовых параметров, характеризующих криволинейное движение, при учете нелинейного взаимодействия движителя с опорным основанием, на основе реализации гипотезы о боковом уводе опорных катков на любых видах грунта;
- в разработке метода определения требуемого поворачивающего момента, реализуемого системой управления поворотом с учетом инерционной составляющей;
- в обосновании алгоритма управления движением гусеничной машины, обеспечивающего коррекцию управляющего воздействия с использованием разработанных матриц управления.

**Практическая значимость работы.** Разработанный метод расчетно-экспериментального определения параметров взаимодействия движителя гусеничной машины с опорным основанием обеспечивает достоверность идентификации типа грунта, основных кинематических и силовых показателей, характеризующих параметры криволинейного движения.

Предложенные расчетно-экспериментальные методы идентификации параметров движения БГМ в режиме реального времени, полученные новые закономерности, позволяют разработать более совершенные

алгоритмы корректировки управляющих воздействий, обеспечивающие устойчивое движение с требуемой кривизной траектории и максимально возможной (заданной) скоростью.

Результаты исследования, в частности, разработанные новые технические решения по совершенствованию системы управления движением, повышают устойчивость и обеспечивают в зависимости от типа грунта и кривизны траектории рост скорости до 10...11 км/ч. Реализация предложенного алгоритма управления позволяет повысить скорость движения в 1,5..1,6 раза при управлении водителем средней квалификации.

Результаты исследования, позволили создать корректирующие таблицы, которые с высокой эффективностью применимы при разработке систем управления движением РТК, создаваемых на базе быстроходных гусеничных машин.

**Реализация работы.** Теоретические и экспериментальные исследования изложены в двух отчётах НИР и переданы ОАО «СКБМ», КУРГАНМАШЗАВОД, г. Курган. При выполнении ОАО «КМЗ» опытно конструкторской работы по программе «РТК» применялась разработанная функциональная схема, системы управления движением гусеничной машины по совершенствованию алгоритмов работы системы управления с применением современных информационных технологий (разделы 2, 3).

Данная работа является ключевой частью госбюджетной темы №256 «Научные основы синтеза систем стабилизации траектории движения быстроходной гусеничной машины на основе инновационных информационных технологий».

Акт о внедрении результатов НИР № 6 от 07.09.2018г.

Результаты НИР использованы ОАО «СКБМ» при разработке перспективных программ управления движением гусеничных машин, а так же в учебном процессе подготовки специалистов по направлению 23.05.02, и аспирантов по специальности 05.05.03 в Курганском государственном университете.

**На защиту выносятся.**

Положение научной новизны, практической значимости, а так же результаты и выводы по работе.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность научных положений работы, подтверждена сравнением результатов численного моделирования и экспериментальных исследований. Расхождение, полученных результатов по частоте и амплитуде поворачивающего

момента, не превышает 7..10%, из-за отклонения начальных условий при моделировании. Достоверность результатов моделирования, подтверждена лабораторно-дорожными испытаниями с применением современного сертифицированного высокоточного комплекса RaceLogic VBOX3i.

**Апробация работы.** Результаты и положения работы обсуждались на девяти научных конференциях:

- VIII Межрегиональной научно-практической конференции «Инновационные технологии, системы вооружения и военной техники для Арктики, Сибири и Дальнего Востока» (БРОНЯ – Омск – 2015). – Омск, 2015 г;

- XVIII, XIX, XX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности» – Санкт-Петербург, 2015, 2016, 2017 гг.;

- VI Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике «Механика-2016» – Минск, 2016 г;

- 75-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, кафедры тягачей и амфибийных машин – Москва, 2017 г;

- Международный военно-технический форум “АРМИЯ-2017”. Конференция “Академическая наука – Армии”, Моск. обл., г. Кубинка, 2017 г;

- Международный научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2018» - Севастополь, 2018 г.

В полном объеме диссертационная работа обсуждалась на научных семинарах кафедр: амфибийных машин МАДИ ГТУ, г. Москва (2017); гусеничных машин и прикладной механики КГУ, Курган (2018); колесных и гусеничных машин ЮУрГУ, Челябинск (2018) и на научном семинаре отдела механики транспортных машин ИМАШ УрО РАН.

**Публикации.** По результатам полученным при выполнении диссертационной работы опубликовано 16 научных статей, в том числе 4 статьи в изданиях перечня ВАК РФ, 4 патентов РФ на изобретения и полезные модели. Основные публикации приводятся в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, основного текста, выводов, списка источников и приложений. Работа изложена на 145 листах машинного текста, содержит 46 рисунков, 6 таблиц. Список литературы содержит 75 наименований и приложений на 36 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, дана краткая характеристика состояния проблемы, поставлена цель и задачи исследования, сформулирована цель работы, новизна и положения выносимые на защиту.

**В первой главе** (*Состояние вопроса и обоснование задач исследования*) приводится анализ литературных источников по определению Подвижности мобильных боевых машин, период с 1900-х годов по настоящее время, его обоснования по повышению подвижности.

К кинематическим параметрам определяющих подвижность относятся: скорость поступательного движения ( $v$ ) и угловая ( $\omega$ ), кривизна траектории ( $k$ ), продольное ( $\chi$ ) и поперечное ( $y_1, y_2$ ) смещение полюса поворота машины, а так же угол бокового движения ( $\theta$ ), силовые параметры: поворачивающий момент ( $M_{\Pi}$ ) и момент сопротивления повороту ( $M_C$ ).

Приводится анализ методов прогнозирования подвижности БГМ, оснащенных системой управления поворотом с дискретными свойствами, при криволинейном движении. Обзор конструктивных решений, обеспечивающих повышение скоростных свойств, устойчивости и управляемости транспортных машин.

**Степень разработанности темы.** Для прогнозирования подвижности гусеничной машины, необходима соответствующая математическая модель. Расчётная схема движения гусеничной машины основана на работах советских, российских и зарубежных ученых Л.В. Сергеева, В.И. Красненькова, В.А. Савочкина, С.А. Бекетова, А.А. Благоднарова, В.Б. Держанского, И.А. Тараторкина, Е.Б. Сарача, Г.О. Котиева, Б.М. Позина, С.В. Кондакова, М.Г. Vekker, J.Y. Wong, а также отраслевых материалов. Выполнен анализ трудов в данной области научных школ ВНИИТрансмаш, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАДИ, МАМИ, 3 ЦНИИ МО РФ, Академии БТВ, КГУ, ЮУрГУ.

В работах Gurkan Erdogan, Sanghyun Hong, Francesco Borrelli, Karl Hedrick и другие, предлагают методы оценки коэффициента сцепления колеса с дорогой, с использованием нового беспроводного акселерометра. Однако вопросы взаимодействия гусеничного движителя с опорным основанием требует выполнения соответствующих исследований.

Во многих научных работах рассматривается движение многоопорных машины по мало деформированному грунту. При этом момент сопротивления повороту формируется силами сопротивления

боковому уводу. Метод определения коэффициента сопротивления уводу шин опорных катков гусеничных машин приведен в работе А.А. Благонравова. Однако точность этого метода ограничивается из-за эффекта шимми мерных колес, и может быть использован лишь при равномерном повороте машины, движущейся с небольшой скоростью. Применительно к колесным машинам выполнено много исследований и установлено, что основным параметром, определяющего момент сопротивления повороту, является коэффициент сопротивления уводу шин и его зависимость от угла скольжения, кривизны траектории и других. Для повышения точности определения коэффициента сопротивления уводу колесных машин, специалистами предлагается «умное колесо», содержащее датчики давления температуры, а так же устройства определения интенсивности износа и динамического радиуса колеса.

Однако процесс формирования коэффициента сопротивления уводу в гусеничной машине гораздо сложнее, что так же требует проведения дополнительных исследований. Современные комплексы информационно измерительной аппаратуры, реализующие технологию глобального позиционирования (ГЛОНАСС/GPS), позволяет определить кинематические и силовые параметры с более высокой точностью. Другой важнейшей задачей, требующей своего решения, является создание регуляторов, позволяющих эффективно отрабатывать отклонение заданной траектории движения. Исследованиям в данной области посвящены работы Дорф Р., Бишоп Р., Lawrence J., Singhose W., Song, M.-Z., R. Takai, L. Yang, N. Noguchi и др.

Проведенный анализ современного состояния вопроса по динамике управляемого движения транспортных машин позволил обосновать цель исследования, необходимость решения ряда научных задач для ее достижения.

**Во второй главе** (*Теоретическое исследование динамики управляемого движения быстроходной гусеничной машины*) рассмотрена общая схема объекта исследования и математическое описание движения машины в подвижных и неподвижных системах координат.

Выполнено компьютерное моделирование процесса движения машины с учётом нелинейностей взаимодействия гусеницы с грунтом, и анализ полученных результатов.

Решение поставленных задач осуществляется в соответствии с математической моделью движения машины относительно подвижной системы координат с совмещенным центром масс, а оси координат

совпадают с осями симметрии машины. В этих координатах плоскопараллельное движение машины определяется следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}_x = \delta_x^{-1} g(f_D - f_C) - V_y \omega \\ m \dot{V}_y = m V_x \omega_M + \sum C_i \theta_i \\ \dot{\omega}_M J_z = -m V \omega \cdot (\chi - l_{ц.м.}) + \sum_i C_i \cdot \theta_i (\chi - l_i) - C_{tor} (\varphi_M - \varphi_D) - b_{dis} (\omega_M - \omega_D) \\ \dot{\omega}_y J_y = -C_{tor} (\varphi_D - \varphi_M) - b_{dis} (\omega_M - \omega_D) + M(f) \\ f_C = f_{zp} + i + f_{\Pi} \\ \chi = f(V_x, \omega, \mu) \\ \theta = f(\omega, V_x, \chi) \\ C_i = f(\mu, \omega) \end{array} \right.$$

где:  $m$  – масса машины;  $\dot{x}$  – продольная скорость;  $\ddot{x}$  – продольное ускорение;  $\dot{y}$  – поперечная скорость;  $\ddot{y}$  – поперечное ускорение;  $\dot{\varphi}$  – угловая скорость;  $g$  – ускорение свободного падения;  $f_d$  – динамический фактор;  $f_s$  – коэффициент сопротивления движению;  $C_{yi}$  – коэффициент сопротивления уводу  $i$ -ой пары опорных катков;  $\chi$  – продольное смещение полюса поворота;  $\theta$  – угол увода;  $l_i$  – расстояние от центра масс до оси  $i$ -ой пары опорных катков;  $J_z$  – момент инерции машины;  $M_n$  – поворачивающий момент,  $C_{tor}$  – приведенная жесткость системы управления.

Отличие модели заключается в том, что в ней учитываются упруго-инерционные свойства элементов трансмиссии и двигателя, независимо от вида грунта (деформируемый или твердый) формирование момента сопротивления повороту основана на гипотезе о боковом уводе опорных катков.

Для моделирования траектории движения машины осуществляется переход из подвижной системы координат в неподвижную, определяющую реальное движение машины относительно поверхности Земли.

### Результаты моделирования.

При этом машина рассматривается как многоопорная. В отличие от ранее принимаемых допущений о постоянстве значений коэффициента сопротивления уводу, в данной работе зависимость  $C_{yi}(\theta)$  принимается не линейной функцией от угла бокового увода и кривизны траектории. Значения коэффициента сопротивления уводу определяется по уравнению

$C(\theta_i) = \frac{M_{\pi}}{\sum(l_i - \chi)\theta_i}$ , где  $M_{\pi}$  - поворачивающий момент. В процессе движения гусеничной машины, значения функции коэффициента сопротивления повороту от угла скольжения измеряется достаточно точно (см. раздел 3). Учитывая, что параметры  $\mu$  и  $C_y$  являются производными боковых сил.

$C_{yi} = a_i \cdot \ln \theta_i + b_i$ , где:  $a_i, b_i - \text{Const}$ , соответствуют типу грунта,  $\theta_i$  - угол увода  $i$  оси,  $\mu = \mu_y \left(1 - \exp\left(\frac{-k}{k_0}\right)\right)$ .

Результаты определения функции  $C_{yi}(\theta_i)$  при дискретных значениях  $\mu=0,1..0,8$  приведены на рисунке 1.

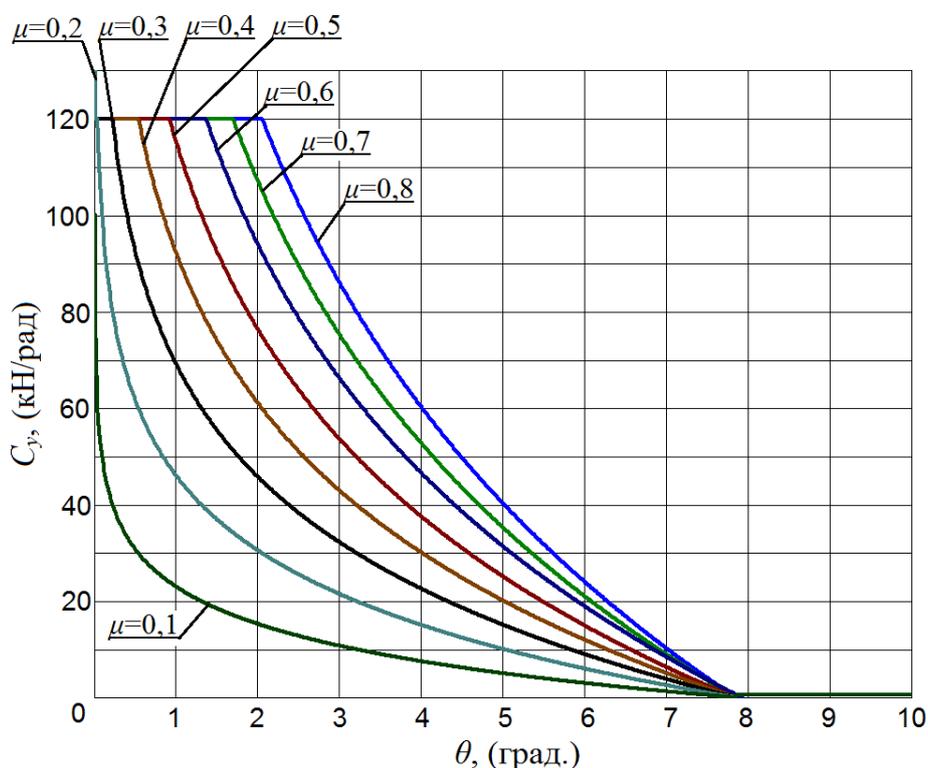


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента сопротивления уводу от величины угла скольжения при вариации коэффициента сопротивления повороту.

С использованием полученной зависимости  $C_y(\theta, \mu)$ , путем имитационного моделирования системы (2.1) установлен вид функции продольного смещения полюса поворота  $\chi(t)$  при периодическом включении механизма поворота. При входе в поворот  $\chi$  возрастает от 0 до 2 м. При повороте в противоположную сторону  $\chi \rightarrow 0$ , а за тем вновь возрастает и смещается на край опорной поверхности в момент времени ( $t=6$  с.) (график 1 на рисунке 2). Увеличение  $\chi$  приводит к росту углов

увода см. (график 2 на рисунке 2). На рисунке 2 цифры 1..6 соответствуют углам увода соответствующих осей опорных катков.

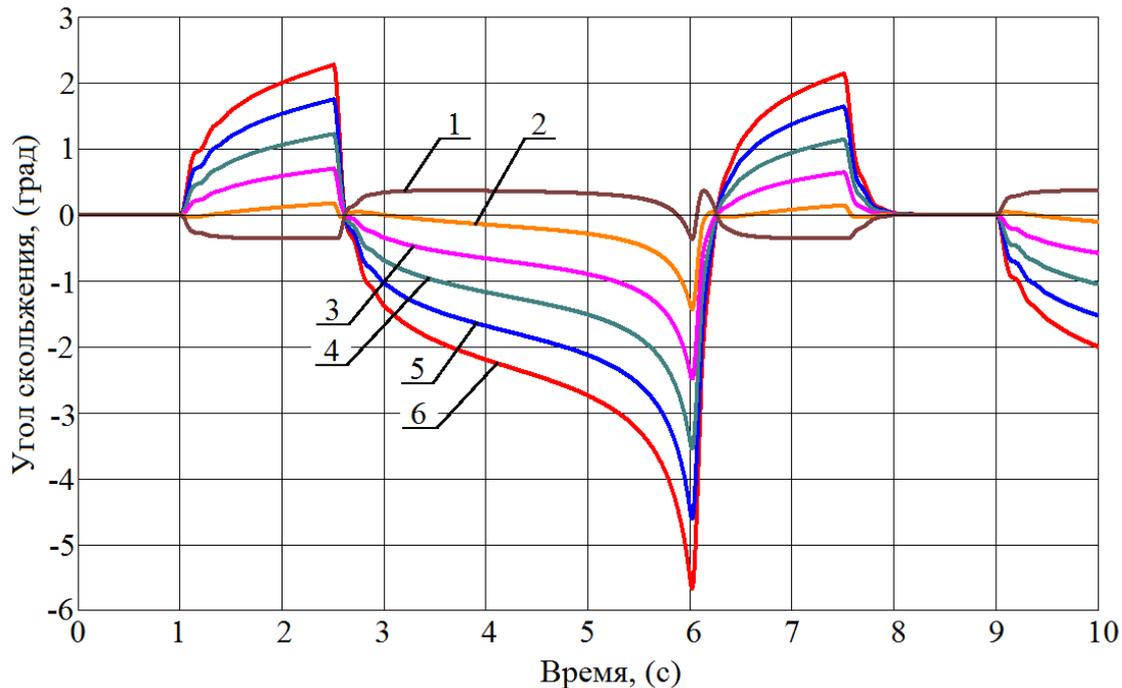


Рисунок 2 – Углы увода отдельных осей пар опорных катков

При известных значениях функций  $\mu(k)$ , и  $C_y(\theta)$  представляется возможным определить продольное смещение центра поворота  $\chi$ , следовательно, и скорость движения, предельную по устойчивости, когда  $\chi \rightarrow 0,5L$ . Следует отметить, что характер зависимости коэффициента сопротивления уводу требует дополнительного снижения скорости движения машины по твердому грунту.

Приведенные функции реализованы в процессе моделирования движения по различным траекториям (тестовая змейка и окружности различных радиусов). При этом значения поворачивающего момента задавалось в виде дискретной единичной функции  $\pm 1(t)$ . Амплитуда поворачивающего момента определялась в соответствии со значением коэффициента сопротивления повороту.

При моделировании принимается, что параметры гусеничной машины, в том числе нелинейности системы управления поворотом, соответствует объекту экспериментального исследования. Значения физико-механических свойств деформации грунта приняты  $\mu = 0,8$ ,  $f_c = 0,07$ . Длина полуволны тестовой змейки  $\Delta S$  применяется равной 20, 30 и 40 [м]. Движение имитируется при включенной 5 передаче, заблокированном гидротрансформаторе, общее передаточное число трансмиссии  $u_{\text{тр}}=32,958$ , что соответствует скорости движения  $v_5=32$

[км/ч]. При исследовании определялись кинематические параметры траектории движения  $k, \chi, \theta$ .

$$k = \frac{\dot{\varphi}}{v} \text{ или } k = \frac{tg\theta_3 - tg\theta_{п}}{L}, \quad \chi = \frac{v^2 Lk}{2\mu g}, \quad \theta = arctg\chi k$$

Иллюстрация результатов моделирования приводится на рисунке 3.

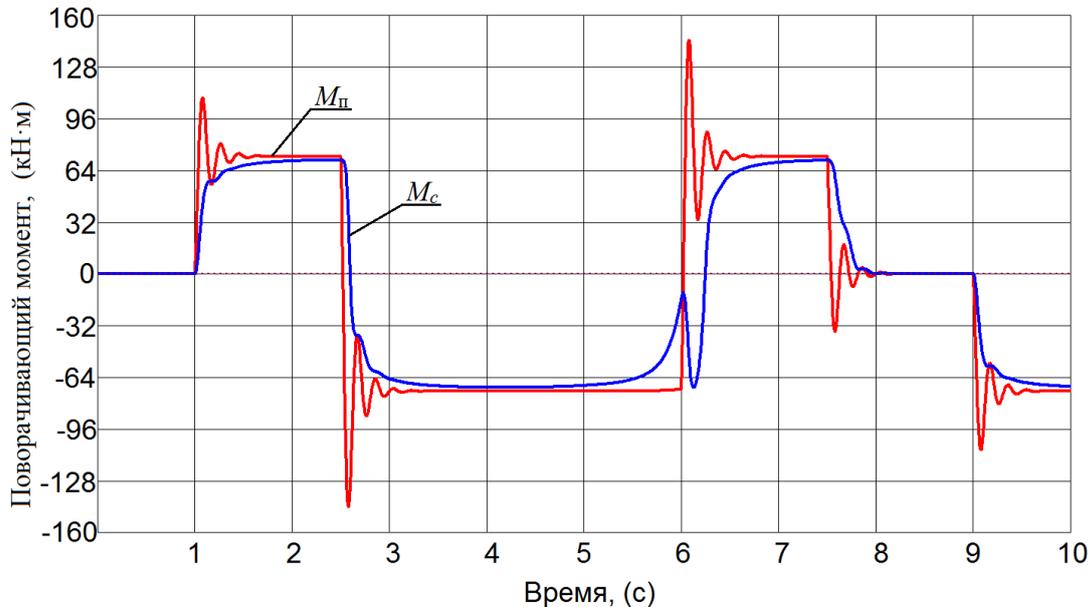


Рисунок 3 - Результаты моделирования криволинейного движения машины с учетом упругости ветвей гусениц и соединительных валов трансмиссии

Из рисунка 3 следует, что переходной процесс сопровождается высокочастотными колебаниями, определяемыми упругостью системы управления поворотом и высокой степенью перерегулирования, определяемой инерционными свойствами машины.

Из приведенных данных следует, что переходной процесс входа в поворот и выхода из него сопровождается колебаниями момента с перерегулированием 1,5 и более раз.

Продольное смещение полюса поворота при действии центробежных сил, пропорционально квадрату скорости и кривизне, приводит к отклонению продольной оси машины относительно касательной к требуемой траектории на угол  $\Theta = arctg \cdot \chi k$ , т.е. боковому движению гусеничной машины в повороте.

По математической модели может быть определена так же величина поперечного перемещения (относительно неподвижной системы

координат). При принятых условиях движения величина бокового перемещения машины составляет 1,5 [м].

На рисунке 4 приведена зависимость предельно допустимых скоростей движения от поворачивающего момента для различных грунтов ( $\mu=0,1 \dots 0,9$ ). Зона между линией *a-b* (предельная кинематическая скорость движения) и линией *в-г* (ограничение по устойчивости движения) определяет область гарантированно управляемого движения. Зона ниже линии *в-г* характеризуется быстрым нарастанием угловой скорости из-за потери устойчивости. В этом режиме машина может двигаться только при управлении водителем высокой квалификации. Использование полученных данных при наличии эффективного регулятора по угловой скорости в качестве обратной связи, может позволить реализовать данный скоростной режим при автономном беспилотном управлении.

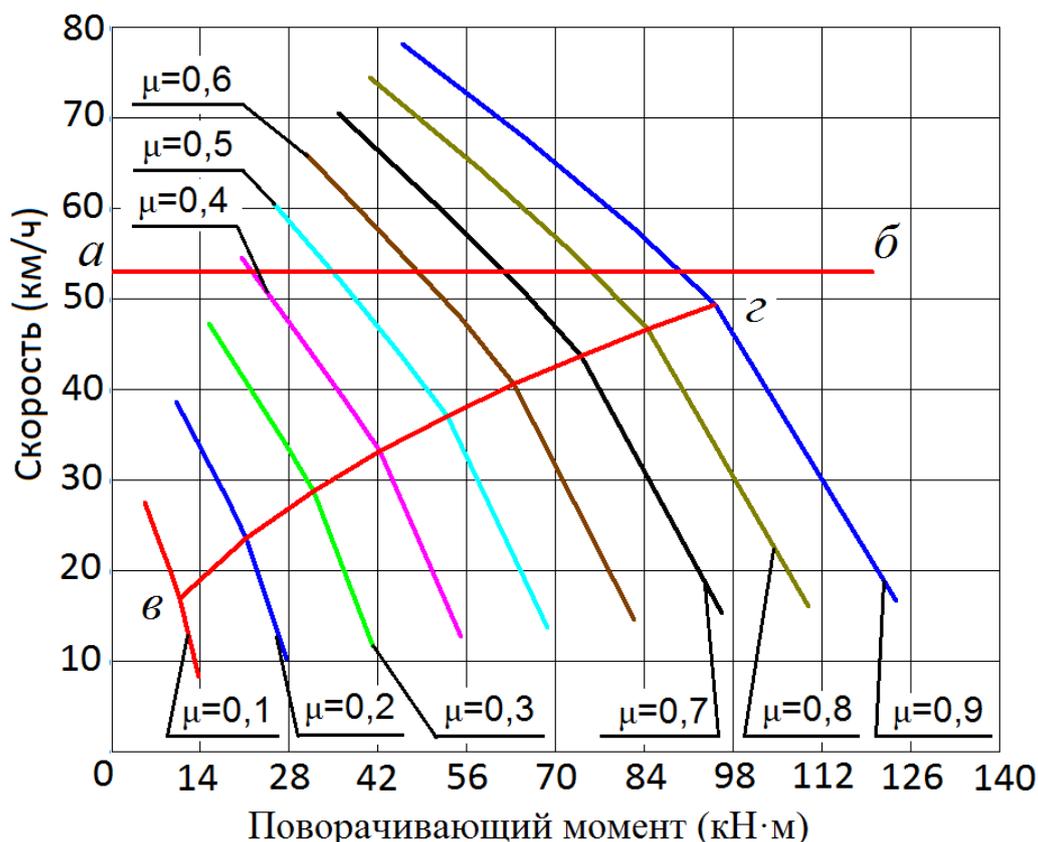


Рисунок 4 - Зависимость предельно допустимых скоростей движения от поворачивающего момента для различных грунтов

Кроме того, установлены зависимости допустимой угловой скорости и кривизны траектории от поворачивающего.

Таким образом, полученные новые результаты позволяют уточнить методику проектного расчета, более точно прогнозировать подвижность гусеничной машины, оценивать устойчивость ее движения. Разработанная

математическая модель и методы экспериментального определения условий и параметров движения гусеничной машины позволяют получить зависимости реакции машины на управляющие воздействия при различных ограничениях. Это способствует совершенствованию корректирующих устройств – помощников оператора транспортной машины, а также при разработке эффективных алгоритмов автономного беспилотного управления роботом на базе гусеничной машины.

**В третьей главе** (*Лабораторно-дорожные испытания управляемого движения гусеничной машины*) приведены технические характеристики объекта исследования, сформулированы цель и задачи исследования, комплекс информационно измерительной аппаратуры на базе регистратора Racelogic VBOX3i, результаты определения зависимости кинематических и силовых параметров от свойств машины и условий движения, а так же динамических свойств машины, их анализ.

Объектом экспериментального исследования является опытный образец робототехнического комплекса РТК-ТМ-140А, оснащенной комплектом средств дистанционного управления, в составе опытного образца транспортной машины ТМ-140А массой 12000 [кг], двигателем ЯМЗ-236Н мощностью 169 [кВт], шести ступенчатой гидромеханической трансмиссией «Синтез» и планетарным механизмом поворота. Кроме того, при экспериментальном исследовании использовался информационно-измерительный комплекс RaceLogic VBOX3i, позволяющий измерять кинематические параметры: скорость движения, курсовой угол, угловую скорость поворота, боковые ускорения в носовой и кормовой частях корпуса, а также углы увода крайних опорных катков. Крутящий момент и частота вращения грузовых валов, а также два потенциометра соединенных со штурвалом механика водителя, выход которых подключен к регистратору RaceLogic VBOX3i. Схема установки аппаратуры на машину приведена на рисунке 5.

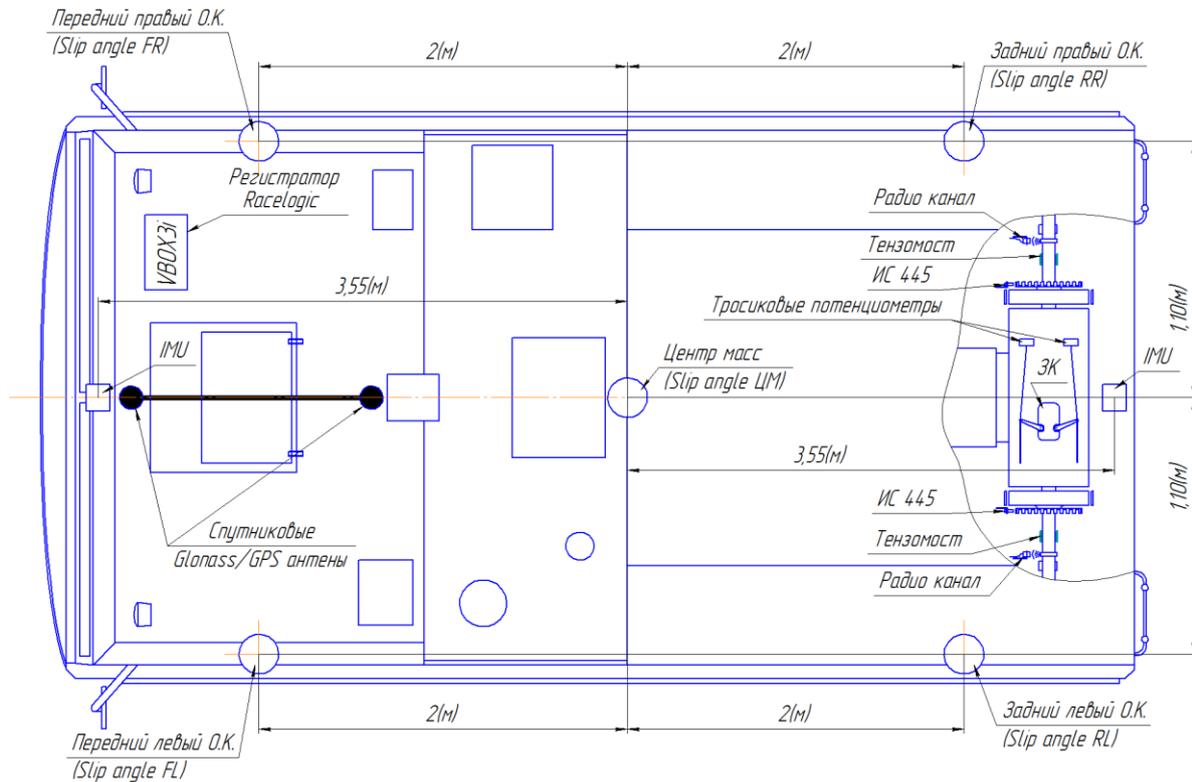


Рисунок 5 - Схема установки аппаратуры на машине

Основная целью экспериментального исследования являлась определение параметров.

При этом решались следующие задачи:

1) экспериментальное измерение угловой скорости поворота машины, кривизны траектории, и величину продольного смещения полюса поворота при движении БГМ по «тестовой змейке», а также параметры не линейности характеристики системы управления поворотом;

2) определение величины поворачивающего момента с учетом углового ускорения корпуса машины и значения коэффициента сопротивления уводу по значениям углов скольжения по углам увода крайних опорных катков.

3) Валидация математической модели плоскопараллельного движения гусеничной машины и корректность принимаемых допущений.

Фрагмент осциллограммы характеризующей изменение кинематических, силовых и динамических параметров при движении по тестовой змейке приведен на рисунок 6.

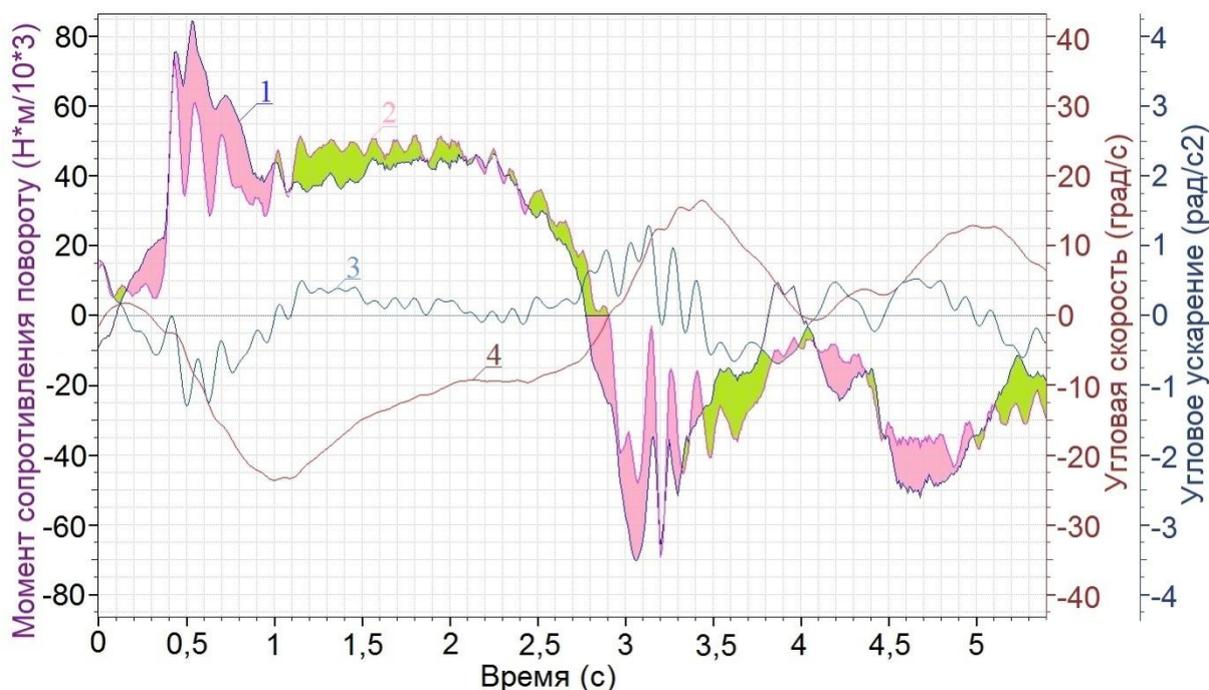


Рисунок 6 – Фрагмент осциллограммы, характеризующий изменение силовых и кинематических параметров

1 – суммарный момент сопротивления повороту (синий); 2 – момент сопротивления повороту, формируемый взаимодействием гусеничного движителя с опорной поверхностью (без учета инерционной составляющей - розовый); 3 – угловое ускорение машины (серый); 4 – угловая скорость поворота машины (коричневый).

В результате выполненных экспериментальных исследований и обработке результатов установлено следующее.

1) Кинематические параметры, определяющие траекторию управляемого движения гусеничной машины, существенно отличаются от расчетных значений, определенных по известным зависимостям. В частности, экспериментальные значения угловой скорости поворота и кривизны траектории отличаются от расчетных значений. Максимальные значения фактической угловой скорости соответственно и кривизны траектории гораздо ниже теоретической (в 1,5...2,1 раза) вследствие процесса буксования и юза гусениц. В отдельных случаях продольное смещение полюса поворота машины превышает расчетное допустимое значение (выходит за край опорной поверхности). Однако при движении по деформируемому грунту управляемость машины сохраняется. Сравнения результатов численного моделирования динамики управляемого движения с экспериментальными данными показывают, что временные функции поворачивающего момента качественно совпадают, в

частности, и по частотам колебаний. Однако ввиду сложности реального процесса есть и определенные отличия. Например, при входе в поворот экспериментальное значение динамической составляющей момента гораздо выше расчетного. Это связано с тем, что при моделировании не учитывается юз и буксование гусениц, приводящих к увеличению радиуса инерции корпуса машины. Кроме того, при движении по деформируемому грунту в начальный период образуется кромка колеи, увеличивающая момент сопротивления, соответственно и поворачивающий.

Следует отметить, что экспериментальные значения цикличности включения системы управления поворотом во много раз превышает расчетные значения. Это вызвано тем, что число поворотов штурвала определяется не только числом поворота дороги, но и выполнением водителем компенсирующего отклонения.

Экспериментально установлено, что при положении  $\alpha_{шт}$  в зоне нечувствительности СУП, когда выключается блокировочный фрикцион и выключенном тормозе поворота, радиус траектории зависит от внешних условий со стороны опорного основания. При малом значении коэффициента сопротивления дороги, траектория является прямолинейной. При движении гусеничной машины на спуске или подъеме наблюдается не прогнозируемое отклонение траектории, в том числе и в сторону, противоположную повороту штурвала из-за действия продольных сил, формируемых макро профилем дороги или продольным ускорением.

2) Поворачивающий момент, реализуемый системой управления поворотом на переходных процессах до 1,3...1,5 раза превышает расчетные значения вследствие действия не учитываемых в расчете инерционных составляющих.

Параметры переходных процессов характеризующих динамические свойства машины составляет: - запаздывание реакции  $t_3 = 0,3 \dots 1,0$  [с]; - быстроедействие  $t_o = 1,3 \dots 1,4$  [с]; - перерегулирование (заброс реакции) 51...54%; - длительность переходного процесса  $t_{шт} = 1,6 \dots 1,8$  [с]; - максимальное угловое ускорение  $0,91$  [рад/с<sup>2</sup>].

**В четвертой главе** (*Обобщение результатов теоретического и экспериментального исследования*) приводится оценка корректности математической модели управляемого движения машины. Предлагаются новые способы определения требуемого поворачивающего момента, коэффициента сопротивления уводу шин опорных катков с учетом

параметров конструкции блока подвески опорных катков и их взаимодействия с опорной поверхностью через гусеницу.

При анализе результатов теоретического и экспериментального исследования сформирован следующий вывод. Для прогнозирования подвижности гусеничной машины по известной траектории движения по дорогам с интенсивным изменением кривизны, синтез автоматизированных систем, при дистанционном или программном управлении движением необходима существенная корректировка математической модели. Синтез алгоритмов традиционного и программного управления движением необходимо осуществлять на основе точного измерения параметров, взаимодействия движителя с опорным основанием, кинематических и силовых параметров, введением динамически изменяющихся параметров. Из результатов исследования установлена необходимость разработки нового способа определения поворачивающего момента с учетом составляющих: инерционной и формируемой боковым движением машины (ПР по заявке №2017132115 от 13.09.2017), а так же разработки способа определения коэффициента сопротивления боковому уводу шин опорных катков с учетом конструкции блока подвески и взаимодействия опорных катков с поверхностью через гусеницу.

Предлагаемая система телеметрического измерения коэффициента сопротивления уводу, отличается тем, что на наиболее чувствительной части балансира устанавливается датчик боковой силы, например, тензомост. Вход этого датчика электрически, соединен через блок питания с пьезоэлектрическим генератором напряжения, который установлен на оси балансира. Выходы датчиков соединены с регистратором через тензоусилитель. Угол увода опорных катков в процессе движения гусеничной машины по дороге с интенсивным изменением кривизны траектории измеряется спутниковым информационно измерительным комплексом. В дальнейшем строится зависимость боковых сил от соответствующих углов увода.

Матрицы, составленные по установленным закономерностям  $C_{yi}(\theta)$ , позволяет более точно определять зону устойчивости движения по таким параметрам как  $V$ ,  $k$ ,  $\omega$  в функции поворачивающего момента.

Использование таких матриц при реализации электронной системы управления движением гусеничной машины позволяет не зависимо от квалификации водителя и при автономном управлении, двигаться в зоне устойчивости.

На основе результатов теоретического и лабораторно-дорожного исследования управляемого движения БГМ с дискретной системой управления поворотом, обоснована необходимость автоматизации управления поворотом и изложены основные требования к автоматической системе:

- сокращение запаздывания реакции машины на управление;
- исключение «быстрых» боковых ускорений, не компенсируемых водителем из-за его психофизиологических качеств, необходимо осуществлять плавным регулированием кривизны траектории.

С ростом скорости движения БГМ чувствительность к управляющему воздействию необходимо снижать, а форсирующим увеличением является подача топлива.

Известна система управления движением быстроходной гусеничной машины (Патент РФ №156493 от 10.11.2015) с дискретными свойствами системы управления поворотом. Этой системе присущ недостаток, который заключается в невозможности обеспечения устойчивости движения машины в повороте. В предлагаемой конструкции системы управления тормозом поворота включен механизм управления, выполненный в виде передачи преобразующей вращательное движение в поступательное, например, «шарик-лунка» (Патент РФ №179898 от 28.05.2018).

Предлагаемый алгоритм управления движением предусматривает определение следующих параметров:

- физико-механические свойства грунта опорного основания в текущий момент времени ( $\mu$ ,  $\varphi$ );
- силовые и кинематические ( $\omega$ ,  $k$ ,  $\chi$ ,  $C_{y_i}(\theta_i)$ );
- требуемой траектории движения;
- управляющие воздействие (необходимый поворачивающий момент, скорость движения, режим работы двигателя) при выполнении требуемых ограничений по устойчивости движения, качества переходных процессов.

Для реализации данного алгоритма предложен блок коррекции траектории движения, который может работать при традиционном (в качестве помощника водителя), либо роботизированном автоматическом управлении машиной, подобно баллистическому вычислителю для расчета упреждающего управления полетом снаряда. Данный блок позволяет обоснованно создавать управляющее воздействие, обеспечивающее устойчивое движение по заданной траектории на основе точного знания вышеперечисленных параметров. В этом состоит основное отличие

предлагаемого решения от отечественных и зарубежных работ, предлагающих управление автономным движением на основе постобработки отклонения траектории с использованием все более эффективных регуляторов.

Эффективность результатов исследования определяется типом грунта, интенсивностью изменения кривизны траектории и способом управления движением.

Движение по деформируемому грунту  $\varphi=0.8$  по тестовой трассе типа «змейка» скорость движения может быть повышена до 10 км/ч обеспечением статической устойчивости при боковом движении машины, на твердом грунте  $\varphi=0.4$  скорость движения может быть повышена до 11 км/ч при управлении поворотом по патенту №179898 от 28.05.2018. При дистанционном управлении движением скорость может быть повышена незначительно при создании трехпараметрического контура технического зрения.

Эффективным путем повышения скорости движения РБТК на базе гусеничной машины является реализация адаптивного алгоритма управления приведенного выше реализующего данные измерения кинематических и силовых параметров в соответствии с обоснованными методами.

Например, при движении по змейке, с длиной полуволны ( $\Delta S=20$ ,  $\mu=0,8$ ) водитель средней квалификации развивает скорость движения машины с параметрами конструкции приведенными в разделе 3, до 20-22 км/ч (4 передача). При управлении по предложенному алгоритму движение можно осуществлять на 5 передаче (32 км/ч) соответствует возможностям высококвалифицированного водителя. Таким образом скорость движения может быть повышена 1,5..1,6 раза.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ:**

1. На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что вследствие неудовлетворительной точности формализации процессов буксования гусеничного движителя при повороте машины кинематические параметры угловая скорость и кривизна траектории в 1,5...2,1 раза ниже расчетных. Кроме того, при переходных процесса входа и выхода из поворота момент сопротивления повороту превышает установившееся значение до 1,5 раз, вследствие действия инерционных составляющих. В связи с этим требуется существенная

корректировка математических моделей движения, принимаемых допущений и алгоритмов управления.

2. Разработан новый метод расчетно-экспериментального определения параметров взаимодействия движителя гусеничной машины с опорным основанием с использованием программно-аппаратного обеспечения спутниковой технологии глобального позиционирования, отличающийся возможностью достоверной идентификации в режиме реального времени типа грунта и основных кинематических и силовых показателей, характеризующих параметры криволинейного движения.

3. Предложена математическая модель криволинейного движения гусеничной машины на основе усовершенствования расчетной схемы взаимодействия движителя с опорным основанием в соответствии с теорией бокового увода, не зависимо от вида грунта.

4. На основе математической модели и новых технологий идентификации параметров движения разработан новый способ расчетно-экспериментального определения значений коэффициента сопротивления боковому уводу, его зависимости от угла скольжения с учетом конструкции блока подвески опорных катков и их взаимодействия с опорной поверхностью через гусеницу. При этом боковое сопротивление формируется по всей длине опорной ветви гусеницы с учетом участков между катками.

5. Предложенные методы идентификации параметров движения БГМ в режиме реального времени, полученные новые закономерности, позволяют разработать более совершенные алгоритмы корректировки управляющих воздействий, обеспечивающие устойчивое движение с требуемой кривизной траектории и максимально возможной (заданной) скоростью.

6. Результаты исследования, в частности, разработанные новые технические решения по совершенствованию системы управления движением, повышают устойчивость и обеспечивают в зависимости от типа грунта и кривизны траектории рост скорости до 10...11 км/ч. Реализация предложенного алгоритма позволяет повысить скорость движения в 1,5..1,6 раза при управлении водителем средней квалификации.

7. Новые способы определения параметров взаимодействия движителя с опорным основанием, характеризующих плоскопараллельное движение гусеничной машины, с высокой эффективностью могут быть применены при разработке системы управления движением РТК, создаваемых на базе БГМ.

**Основные положения диссертации отражены  
в следующих работах:**

**Перечень публикаций в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ**

1. Волков А.А., Тараторкин И.А., Держанский В.Б., Вязников М.В., Тараторкин А.И. Экспериментальное определение кинематических и силовых параметров при повороте гусеничной машины. «Транспорт Урала» / №3 (50)/ 2016. С. 80 – 86.

2. Волков А.А., Тараторкин И.А., Держанский В.Б., Тараторкин А.И. Повышение степени реализации потенциальных скоростных свойств гусеничных машин с дискретными свойствами системы управления поворотом. «Транспорт Урала» / №3 (54)/ 2017. С. 49 – 55.

3. Волков А.А., Тараторкин И.А., Держанский В.Б., Тараторкин А.И.. Стабилизация траектории движения быстроходной гусеничной машины при ошибочных управлениях. // «Вестник Уральского государственного университета путей сообщения» № 2 (38), 2018 г. – С. 20 - 25. DOI: 10.20291/2079-0392.

4. А.А. Волков, Абдулов С.В., Тараторкин И.А., Держанский В.Б., Тараторкин А.И.. Гашение колебаний в энергосиловом блоке при пуске современного двигателя. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2018. Т. 18, №2. С. 5-14. DOI: 10.14529/engine180201.

5. Автоматизированная система управления гидромеханической трансмиссией транспортной машины: пат. 153666 Рос. Федерация. №2015106216/11 ; заявл. 24.02.2015 ; опубл. 27.07.2015, Бюл. №21. 2с.

6. Система управления движением быстроходной гусеничной машины : пат. 156493 Рос. Федерация. №2015117306 ; заявл. 06.05.2015 ; опубл. 10.11.2015, Бюл. №31. 2 с.

7. Мехатронная система управления движением быстроходной гусеничной машины : пат. 2645487 Рос. Федерация. №2015154151 ; заявл. 16.12.2015 ; опубл. 21.02.2018, Бюл. №6. 2 с.

8. Полезная модель. Система управления движением быстроходной гусеничной машины: пат. 179898 Рос. Федерация. №2017124559 от 10.07.2017 ; заявл. 10.07.2017 ; опубл. 28.05.2018, Бюл. №16. 4с.

Научное издание

Волков Александр Александрович

ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ В ПОВОРОТЕ БЫСТРОХОДНОЙ  
ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано к печати __.__.18 Формат 60×84 1/16 Заказ	Формат 60х84 1/16 Усл. печ. л. 1,0 Тираж 100 экз.	Бумага тип. № 1 Уч. – изд. л. 1,0 Бесплатно

РИЦ Курганского государственного университета,  
640020 г. Курган, ул. Советская, 63 ст4.  
Курганский государственный университет.