

Карпов Егор Константинович

**ПОВЫШЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ
МАШИНЫ НА ОСНОВЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ
УПРАВЛЯЮЩИХ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курган – 2014

Работа выполнена на кафедре «Гусеничные машины и прикладная механика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Курганский государственный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор Держанский В.Б.

Официальные оппоненты:

Е.Б. Сарач – доктор технических наук,
профессор ФГБОУ ВПО
«Московский государственный
технический университет имени
Н.Э.Баумана».

М.В. Вязников – кандидат технических
наук, директор–генеральный
конструктор ООО «Головное
специализированное конструкторское
бюро по гусеничным и колёсным
машинам», г. Чебоксары

Ведущая организация:

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

Защита диссертации состоится «28» января 2015 г., в 13⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, проспект 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 « ____ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Лазарев. Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из основных эксплуатационных свойств быстроходных гусеничных машин (БГМ) является подвижность, оцениваемая скоростными качествами. Повышение удельной мощности машин до 25 кВт/т, совершенствование трансмиссий, систем управления движением и информационного обеспечения способствует росту потенциальных скоростных качеств современных гусеничных машин. Однако реализация потенциальных скоростных качеств ограничивается рядом динамических явлений характеризующих управляемость при прямолинейном движении и в процессе поворота. Это свойство характеризует все аспекты динамики системы «Человек – машина – внешняя среда» и оценивается динамическими, кинематическими и силовыми характеристиками. Динамические свойства определяются по фазовым частотным характеристикам и качеству переходных процессов, т.е. по реакции машины на управляющее воздействие.

Повышение степени реализации потенциальных скоростных качеств быстроходной гусеничной машины и управляемости частично достигается введением корректирующего устройства – ПИД-регулятора в систему управления движением БГМ. Однако эффективность такого решения ограничена вследствие вариации параметров конструкции гусеничной машины, входящих в математическую модель, определяющих собственную частоту системы и её демпфирующие свойства, в соответствии с которыми синтезирован регулятор. Кроме того, параметры сенсора бокового движения сильно зашумлены и их сигналы существенно запаздывают относительно управляющего воздействия, что снижает эффективность обратной связи.

В настоящее время для трудно формализуемых систем и, – для которых сложно организовать обратную связь используется метод перераспределения во времени управляющих силовых воздействий. Применение нового информационного подхода для повышения степени реализации потенциальных скоростных качеств БГМ и определяет актуальность исследования.

Цель и задачи исследования. Цель исследования состоит в разработке метода повышения подвижности быстроходной гусеничной машины с применением перераспределения управляющих силовых воздействий во времени с последующим синтезом автоматизированной системы управления движением.

Указанная цель достигается решением следующих задач:

1. Теоретическое исследование динамики управления движением БГМ. Имитационное моделирование процессов движения, анализ динамических свойств системы и оценка возможности их повышения на основе новых алгоритмов управления.
2. Экспериментальное исследование динамики управления движением быстроходной гусеничной машины для идентификации параметров системы, оценка адекватности математической модели объекта и корректности принятых допущений.

3. Обобщение результатов теоретического и экспериментального исследования, разработка метода повышения подвижности быстроходной гусеничной машины с применением перераспределения управляющих силовых воздействий во времени.

Решение этих задач позволило дополнить существующий метод прогнозирования быстроходности гусеничных машин, а так же обосновать пути повышения степени реализации потенциальных скоростных качеств.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач производилось имитационное моделирование динамики управляемого движения БГМ по математической модели, применяемой в теории движения и статистической динамике транспортных машин. Анализ динамических свойств объекта управления (фазово-частотные характеристики, качество переходных процессов) производился на основе методов теории автоматического управления, а также теории управляемости и устойчивости движения транспортных машин. Оценка адекватности математической модели объекта и корректности принятых допущений осуществлялась на основе экспериментального исследования – ходовых испытаний. Решение задачи распознавания заданных типов движения машины осуществлялось с применением аппарата искусственных нейронных сетей. Обработка экспериментальных данных велась на основе теории вероятностей, спектральных функций, прямого преобразования Фурье. Расчёт и настройка регуляторов и их адаптивных компонентов, моделирование процесса автоматизированного управления движением БГМ, верификация полученных данных и результатов экспериментов осуществлялись в программных пакетах Mathcad, Statistica и MATLAB.

Научная новизна работы заключается в следующем: Уточнена компьютерная математическая модель динамики управляемого движения, отличающаяся введением не учитываемой ранее вариации параметров конструкции, определяющих собственную частоту системы, её демпфирующие свойства, а также существенные нелинейности в системе управления движением.

Впервые разработан метод перераспределения во времени управляющих силовых воздействий для повышения подвижности БГМ. Для организации функционирования системы управления движением используется, в качестве управляемой координаты, давление рабочей жидкости в магистралях высокого давления гидрообъёмного механизма поворота.

Адаптация синтезированного алгоритма управления осуществляется на основе параметров G-сенсора бокового движения машины (скорость, ускорение и др.).

Предложен метод распознавания типов движения для отдельного регулирования.

Новизна технических решений подтверждена тремя патентами РФ на изобретения и полезную модель.

Практическая значимость работы. Предложенная компьютерная математическая модель позволяет прогнозировать скоростные качества БГМ при

движении на трассах с детерминированным и случайным изменением кривизны траектории.

Разработанный алгоритм управления движением БГМ на основе распределения управляющих воздействий во времени посредством *shaper*-фильтров, позволяет обеспечить робастность системы.

Организация обратной связи по скорости движения позволяет адаптировать алгоритм управления БГМ. Реализация предложенного алгоритма управления движением позволяет повысить степень реализации потенциальных скоростных качеств транспортной машины на тестовой змейке с длиной полуволны $\Delta S = 20 \dots 40$ м до 5 м/с, а на дорогах со случайным интенсивным изменением кривизны траектории до 38 %.

На защиту выносятся: 1. Уточнённая математическая модель и результаты моделирования динамики управляемого движения.

2. Метод повышения подвижности быстроходной гусеничной машины на основе применения перераспределения управляющих силовых воздействий во времени.

3. Математические закономерности, позволяющие осуществить адаптацию алгоритма управления, на основе параметров сенсора бокового движения машины.

4. Метод анализа и идентификации заданного типа движения БГМ для последующего отдельного регулирования.

Реализация работы. Теоретические и экспериментальные исследования отражены в 2 отчётах о НИР, переданных ОАО «СКБМ», г. Курган. При выполнении ОАО «СКБМ» ОКР по программе «Ракушка» использована предложенная функциональная схема системы управления движением машины и алгоритм работы автоматизированной системы на основе новых информационных подходов (разделы 2, 3).

Работа является составной частью проекта «Исследование по разработке научных основ синтеза мехатронной системы стабилизации движения быстроходной гусеничной машины», выполняемого в рамках Программы фундаментальных исследований №1 Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления Российской академии наук «Научные основы робототехники и мехатроники». Результаты работы положены в основу проекта «Разработка программно-аппаратного комплекса адаптивного управления движением быстроходной гусеничной машины», победившего в конкурсе Молодёжных инновационных проектов «УМНИК-2014-I» в рамках Региональной научно-технической конференции «Молодёжь Зауралья III тысячелетия». Результаты работы использованы также в учебном процессе при подготовке студентов специальности 190110.65 в ФГБОУ ВПО «Курганский государственный университет».

Степень достоверности результатов. Достоверность научных результатов работы подтверждается корректностью постановки задач и применяемых алгоритмов управления на основе методов перераспределения управляющих силовых воздействий, базирующихся на фундаментальных трудах отечественных и зарубежных ученых. Результаты численного моделирования динамики системы, с использованием

разработанной математической модели, согласуются с экспериментальными данными в исследуемом частотном диапазоне. Расхождение, наблюдаемое по частоте и амплитуде момента, не превышает 7...10%, что связано с отклонением начальных условий при моделировании. Достоверность подтверждена результатами измерений с использованием современного высокоточного сертифицированного комплекса измерительной аппаратуры.

Апробация работы. Основные положения и материалы работы докладывались и обсуждались на одиннадцати научно-технических конференциях и симпозиумах, в том числе: на XXIV Международной Инновационно-ориентированной конференции молодых учёных и студентов «Актуальные проблемы машиноведения» – Москва, 2012 г.; на XVI Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности» – Санкт-Петербург, 2013 г.; на VI Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике «Механика-2013» – Минск, 2013г; на Юбилейной XXV Международной инновационно-ориентированной конференции молодых учёных и студентов (МИКМУС – 2013) – Москва, 2013 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях перечня, рекомендованного ВАК РФ. Список основных публикаций приводится в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов основного текста, выводов, списка источников и приложений. Содержание работы изложено на 150 страницах текста, включающих 47 рисунков, 13 таблиц, списка использованных источников из 96 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы. Дана краткая характеристика состояния проблемы, поставлена цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов, приведены основные положения, которые выносятся на защиту.

В первом разделе (*Состояние вопроса, обоснование предлагаемого подхода решения проблемы и задачи исследования*) приводится анализ методов прогнозирования подвижности БГМ при криволинейном движении, обзор конструктивных решений, повышающих динамические свойства машин при повороте с ограниченной мощностью системы управления поворотом, критерии устойчивости и управляемости транспортных машин.

Для прогнозирования подвижности машины, формируемой режимом движения, взаимодействием с внешней средой, необходима соответствующая математическая модель системы «машина – водитель – внешняя среда». Расчётная схема движения машины строится в соответствии с работами Л.В. Сергеева, В.И. Красенькова, Е.Е. Александрова, С.А. Бекетова, В.А. Савочкина, Е.Б. Сарача, Г.О. Котиева, Б.М. Позина, M.G. Bekker, J.Y. Wong, исследователей Японии и США, а также отраслевых

материалов. Наиболее полно соответствует решаемой задаче определение фазово-частотных характеристик системы при движении с большой скоростью, определение цикличности включения, расчётная схема и модель, приведённая в работах А.А. Благонравова, В.Б. Держанского и развитая в работах И.А. Тараторкина. Эта модель позволяет определить фазово-частотные характеристики движущейся машины не только как сплошного твёрдого тела, но и учитывает динамические свойства системы управления поворотом, т.е. массы, податливости и демпфирующие свойства элементов трансмиссии, движителя, бесступенчатых передач, юз и буксование гусениц, особенности взаимодействия с малодемпфируемым грунтом.

В работах В.Б. Держанского и И.А. Тараторкина предложен метод прогнозирования подвижности БГМ по фазово-частотной характеристике управляемого объекта, обоснована необходимость сокращения фазового отставания реакции на основе синтеза корректирующих устройств в системе управления движением.

Произведённый анализ показывает, что повышение скоростных качеств машины при интенсивном изменении кривизны траектории показало, что рост удельной мощности системы управления поворотом является необходимым, но недостаточным условием повышения скоростных качеств. Фазовое отставание реакции предложено сокращать корректирующим устройством, однако эффективность предложенного решения ограничена вследствие вариации параметров конструкции машины в процессе движения, зашумлённости сигнала обратной связи и других.

В связи с этим задача повышения динамических свойств машины как управляемого объекта остаётся актуальной. Для повышения скоростных качеств проектируемых и модернизируемых машин необходимо решение задач сформулированных в диссертации.

Во втором разделе (Теоретическое исследование динамики управления движением быстроходной гусеничной машины) рассматривается общая структурная схема БГМ как управляемого объекта и математическое описание структурных составляющих, компьютерное моделирование процесса движения машины с учётом характерных нелинейностей и анализ результатов. Проводится синтез корректирующих устройств основанных на новых информационных подходах, анализируется фазово-частотная характеристика системы и устанавливается зависимость основных параметров автоматизированного регулятора от динамических свойств объекта.

Решение поставленных в работе задач осуществляется в соответствии с математической моделью плоскопараллельного движения машины в горизонтальной плоскости: поступательно по осям x , y и вращательное вокруг вертикальной оси. При ограничении ускорения поступательного движения, машина движется с постоянной скоростью и может совершать вращательное движение, описываемое дифференциальным уравнением второго порядка.

$$I_z \cdot \ddot{\varphi} + \frac{\dot{\varphi}}{V} \cdot \sum_{i=1}^n C_{yi} \cdot l_i^2 + 0.5 \cdot C_{\text{ПР}} \cdot \varphi = M_{\text{П}} , \quad (1)$$

где I_z – момент инерции машины вокруг вертикальной оси, φ – курсовой угол и его производные, V – линейная скорость, l_i – продольная координата i -ой оси опорных катков, относительно центра масс, C_{yi} – коэффициенты сопротивления уводу i -ой оси, n – число осей опорных катков, $C_{\text{ПР}}$ – приведённая жёсткость, $M_{\text{П}}$ – поворачивающий момент. Параметры машины, заданной в модели, соответствуют объекту экспериментального исследования.

Компьютерная модель системы приведена на рисунке 1 и, помимо зависимостей, определённых в дифференциальном уравнении, включает в себя блок задающих воздействий, индикатор реакции системы, элементы обратной связи и автоматизированного управления.

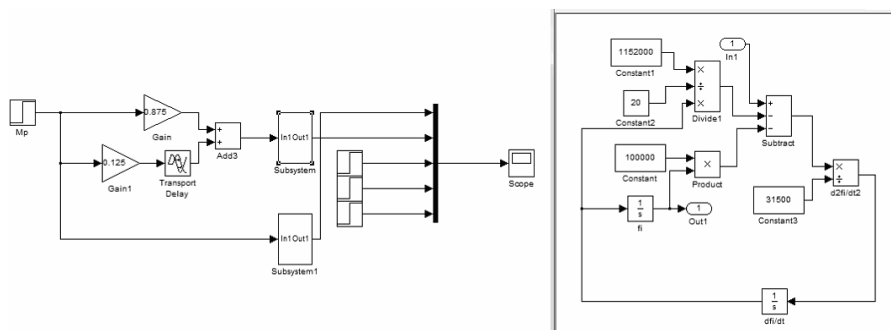


Рисунок 1 – Компьютерная модель вращательного движения БГМ

Особенность рассматриваемой модели (1) состоит в вариации упруго-инерционных параметров конструкции и диссипативных сил. В частности, боковые силы определяют демпфирование в системе и устойчивость её движения, а формируются они в соответствии с гипотезой о боковом уводе шин опорных катков. Параметрические колебания, особенно в резонансном режиме, формируют флуктуацию боковых сил, ограничивающих устойчивость движения машины. Другой эксплуатационный фактор, дестабилизирующий расчётное значение C_y , – существенное изменение температуры шин. Повышение температурного режима шин опорных катков многократно повышает их эластичность, что снижает коэффициент увода и ограничивает скорость машины по устойчивости. Также существенно варьируется коэффициент жёсткости из-за асимметрии характеристики упругости.

Для системы, описываемой уравнением (1), которой свойственна вариация параметров, синтезируется алгоритм управления с применением shaper-фильтров. Основная идея этих фильтров заключается в формировании управляющего сигнала путём свёртки задающего управляющего воздействия с последовательностью импульсов в виде дельта-функции Дирака. Реакция системы 2-ого порядка на импульсное задающее воздействие:

$$y(t) = \left[A \frac{\omega_0}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_0(t-t_0)} \right] \sin\left(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}(t-t_0)\right) \quad (2)$$

где A – амплитуда импульса, ω_0 – недемпфированная собственная частота, ξ – коэффициент демпфирования, t и t_0 – время и запаздывание импульсов.

Расчёт коэффициентов фильтров производился в соответствии с формулами:

ZV-shaper (нулевой вибрации, zero vibration): $A_i = \left[\frac{1}{1+K} \quad \frac{K}{1+K} \right]$; $t_i = [0 \quad 0.5T]$

ZVD-shaper (нулевых вибрации и производной, zero vibration and derivative):
 $A_i = \left[\frac{1}{(1+K)^2} \quad \frac{2K}{(1+K)^2} \quad \frac{K^2}{(1+K)^2} \right]$; $t_i = [0 \quad 0.5T \quad T]$; $K = \exp\left(\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)$, $T = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\xi^2}}$,

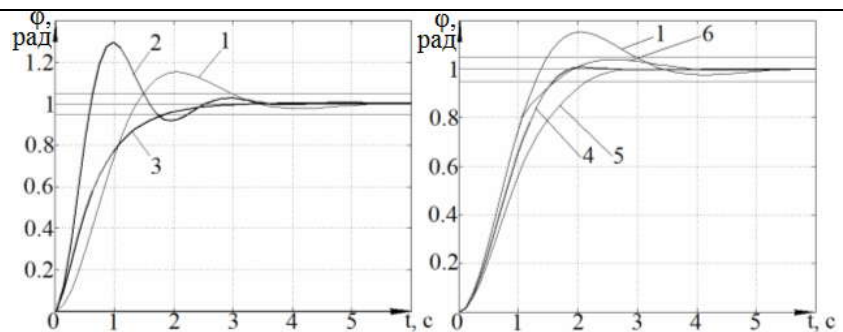
где A_i – амплитуда i -ого импульса, t_i – время i -ого импульса, ω – частота колебаний, ξ – коэффициент демпфирования.

Эти параметры определяются из (1) на основании численного решения, результаты которого приведены в таблице 1.

Реакция системы на единичное задающее воздействие – угол поворота БГМ представлена на рисунке 2. Скорость движения транспортной машины принята равной 20 м/с.

Таблица 1 – Значения коэффициентов shaping-фильтров

i	ZV		ZVD	
	A_i	t_i	A_i	t_i
1	0.875	0	0.75	0
2	0.125	2.1 с	0.20	1 с
3	–	–	0.05	1.2 с



1 – исходная СУ, 2 – ПД-регулятор, 3 – ПИД-регулятор, 4 – ZV-shaper, 5 – ZVD-shaper, 6 – UM-ZV-shaper

Рисунок 2 – Реакция на единичное воздействие системы управления (СУ) с различными регуляторами

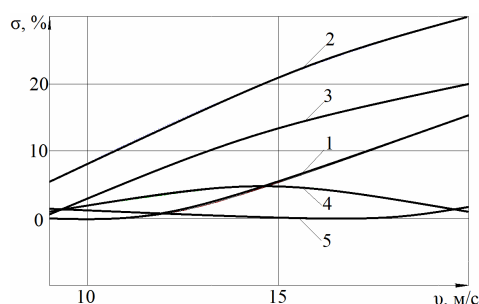
При этом установлено, что эффективность системы существенно повышается при учёте сигналов G-сенсора бокового движения, в частности, скорости поступательного движения. Для компенсации возмущений, возникающих в процессе движения машины в повороте, в качестве управляемой координаты принимается давление рабочей жидкости в силовых магистралях гидрообъёмного привода системы управления поворотом, которые фильтруются введённым в систему набором shaper-фильтров.

На рисунке 3 приведена зависимость перерегулирования переходного процесса – σ – реакции гусеничной машины при входе в поворот с различными системами управления. Как видно из данных графиков, наибольшее перерегулирование, достигающее 30%, наблюдается при использовании ПД-регулятора, настроенного на минимизацию времени переходного процесса. Угловые колебания корпуса в

горизонтальной плоскости под управлением исходной системы достигают 15% на предельных скоростях, равных 20 м/с. Наилучшие результаты показали shaper-фильтры, причём применение ZV-фильтра позволяет минимизировать предельное перерегулирование до 5%, а ZVD-фильтр – до 3%.

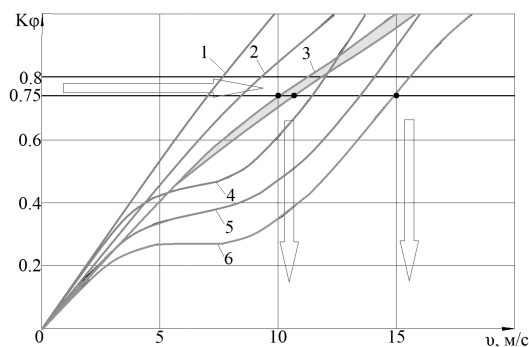
В работе выполнено динамическое моделирование реакции системы на гармоническое воздействие. Основным параметром, ограничивающим подвижность, является фазовое отставание (коэффициент фазовой напряжённости $K_\varphi = \varphi/\pi$). Реакция определяется при переменной частоте возмущений ω управляющих воздействий при движении по «тестовой змейке» с длиной полуволны $\Delta S = 20, 30, 40$ м $\omega = (\pi V)/\Delta S$. Результаты сравнения коэффициента фазовой напряжённости гусеничной машины и – оснащённой системой, реализующей shaper-алгоритмы, представлены на рисунке 4.

Из графиков рисунка 4 видно, что применение ZVD-shaper-фильтров с адаптацией по линейной скорости движения позволяет повысить предельную скорость на 25–30%, при которой сохраняется управляемость движения. Например, при $\Delta S = 40$ м, $V = 10$ м/с (36 км/ч), а при использовании ZVD-shaper-фильтра $V = 15$ м/с (54 км/ч). Этот эффект реализуется при достаточном значении поворачивающего момента и ограничении буксования движения.



1 – исходная система, 2 – с ПД-регулятором, 3 – с ПИД-регулятором, 4 – с ZV-shaper-фильтром, 5 – с ZVD-shaper-фильтром

Рисунок 3 – Зависимость перерегулирования от скорости БГМ



1, 2, 3 – исходная система – $\Delta S=20, 30, 40$ м соответственно, 4, 5, 6 – с ZVD-shaper-фильтром – $\Delta S=20, 30, 40$ м соответственно

Рисунок 4 – Зависимость коэффициента фазовой напряжённости от скорости движения

Результаты исследования позволяют сделать выводы, приведённые в основных результатах работы.

В третьем разделе (Экспериментальное исследование динамики управления движением быстроходной гусеничной машины) приводятся основные параметры конструкции объекта, цель и задачи экспериментального исследования, основные результаты и их анализ.

Объектом экспериментального исследования являлась быстроходная гусеничная машина массой 14 т. с увеличенной удельной мощностью до 24.2 кВт/т, обеспечивающей поворот машины с угловой скоростью до 1.1 рад/с.

Целью экспериментального исследования управляемости быстроходной гусеничной машины являлась идентификация параметров системы, оценка адекватности математической модели объекта и корректности принятых допущений. При этом решались следующие задачи:

- 1) определение коэффициентов фазовой напряжённости при движении БГМ по «тестовой змейке»;
- 2) оценка адекватности математической модели плоскопараллельного движения и корректности принятых допущений;
- 3) экспериментальное определение амплитудно-частотных характеристик параметрических колебаний опорных катков, возникающих при движении гусеничной машины по дороге с малодеформируемым основанием;
- 4) определение распределения температуры шин опорных катков, влияющей на коэффициент сопротивления уводу.

В процессе экспериментального исследования регистрировались следующие параметры: угол поворота штурвала и перемещение педали подачи топлива, угловая скорость поворота машины, курсовой угол, угловая скорость вала двигателя, линейное ускорение носовой и кормовой частей корпуса, вертикальные колебания опорных катков, а также температуры шин. Регистрация и обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием бортового информационно-измерительного комплекса на базе АЦП L-Card E14-440, разработанного на кафедре гусеничных машин ФБГОУ ВПО КГУ. Испытания проводились в соответствии с требованиями отраслевых нормативных документов, а также в соответствии с «Методикой проведения испытаний по определению характеристик поворотливости образца БТВТ с учётом особенностей механизма поворота с ГОП». Определение параметров динамики управляемого движения осуществляется при испытаниях машины на тестовой змейке.

Движение машины в повороте – на основе обрабатываемой осциллограммы установлено, что длительность переходных процессов снижается с увеличением скорости движения (рисунок 5), то есть, возможен вывод, что рост скорости облегчает управление. Однако, фактически это не так, и для определения предельных скоростей управляемого движения был вычислен коэффициент фазовой напряжённости. Фазовое отставание определяется по временной зависимости угла поворота штурвала и курсового угла. Зависимость фазового отставания от скорости движения при вариации длины полуволны «тестовой змейки» приведены на рисунке 6. Как показали эксперименты, движение машины по ровной дороге с малодеформируемым основанием (бетон, мёрзлый грунт) сопровождается параметрическими колебаниями опорных катков из-за переменной жёсткости упругого взаимодействия шин с обрешиненной беговой дорожкой гусеницы. Эти результаты отличаются от известных условий устойчивости движения по критерию Раусса–Гурвица, полученных для линеаризованной модели при определённых значениях боковых сил.

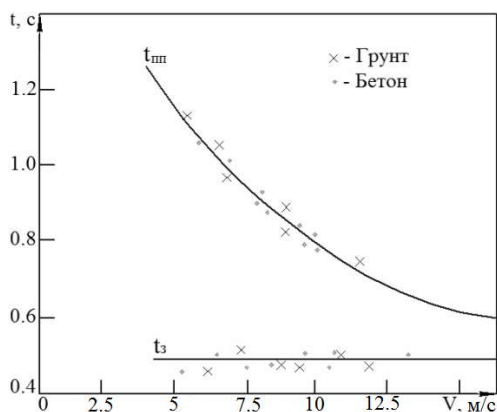


Рисунок 5 – Зависимость длительности процессов от скорости движения

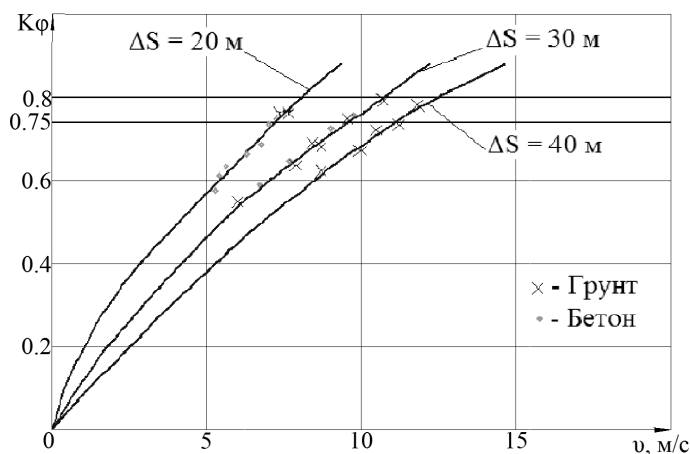


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента фазовой напряжённости от скорости движения

Длительность запаздывания реакции, то есть быстродействие системы управления поворотом, не зависит от скорости движения, а длительность переходного процесса с ростом скорости сокращается.

Температура внутренних слоёв шин измерялась специальным прибором (Патент РФ). Как показывают эксперименты, при движении при температуре окружающего воздуха -23°C через 66 км пробега со средней скоростью 49 км/ч (максимальная скорость 70 км/ч), температура шин возрастает неравномерно: температура шин опорных катков 3 и 4 осей возрастает до предельной 152°C , а минимальная температура катков 1 и 2 осей – около 50°C . Разница температур шин одной условной оси достигает 100°C .

Значительная неравномерность нагрева внутренних и наружных шин приводит к существенному изменению коэффициентов увода опорных катков, поэтому в дальнейшем при расчётах в выражении (1) коэффициент увода принимаем как функцию температуры, то есть $C_{yi}(\Delta T)$.

Датчики вертикальных ускорений устанавливались на нижние части стеблей балансиров опорных катков одного борта. Параметрические колебания опорных катков из-за переменной жёсткости упругого взаимодействия шин с обрезиненной беговой дорожкой гусеницы формируют флуктуацию боковых сил, ограничивающих устойчивость движения машины.

Экспериментальные исследования подтвердили необходимость оценки управляемости по коэффициенту фазовой напряжённости. Параметрические колебания опорных катков и повышение температуры нагрева приводит к существенной вариации коэффициента сопротивления увода.

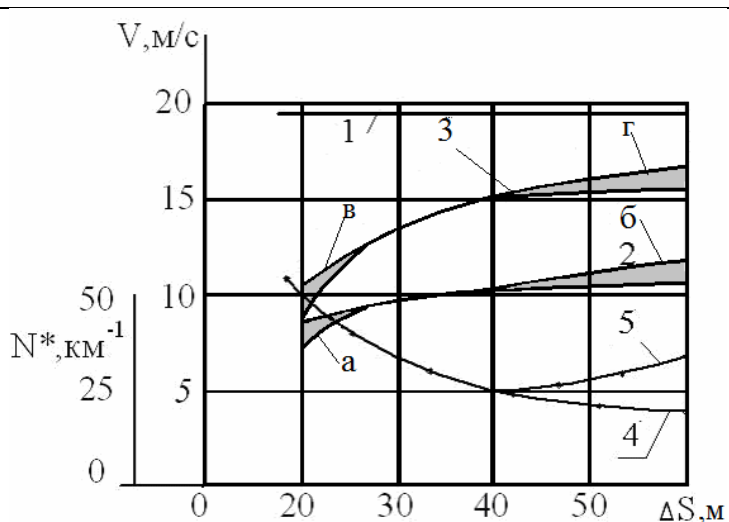
В четвертом разделе (Обобщение результатов теоретического и экспериментального исследования) приводится сопоставление результатов теоретического и экспериментального исследования, соответствующая корректировка математической модели управляемого движения машины и оценка эффективности предложенных алгоритмов управления поворотом.

На основе сопоставления теоретического и экспериментального исследования делается вывод о необходимости корректировки математической модели введением динамически изменяющихся параметров. Применительно к системе (1) эволюция которой представляет собой диффузионный марковский процесс, обосновано исследование устойчивости на основе применения функции Ляпунова.

Влияние температуры шин опорных катков на предельную по устойчивости скорость: при максимальной температуре шин, равной 80°C скорость ограничивается больше на 28%, чем по критерию Раусса-Гурвица. При дальнейшем росте температуры шин, достигающей 150°C , скорость ограничивается ещё в большей степени.

По результатам расчётов строятся графики изменения кинематических параметров при движении по «тестовой змейке» (рисунок 7). На основе этих данных и имитационного моделирования движения машины производится расчёт скорости движения как наименьшей по вышеприведённым ограничениям.

В рамках работы синтезирован алгоритм коррекции управляющего воздействия и функциональная схема, его реализующая (Патент 2 534 128). Он предотвращает возбуждение и гашение нежелательных колебаний, обеспечивает требуемое быстродействие, робастность, точность при ограниченных затратах мощности на компенсацию отклонений. Проведённый анализ изменения параметров конструкции машины, входящих в математическую модель динамического процесса управления движением гусеничной машины показал, что параметром, характеризующим колебательные процессы, является давление рабочей жидкости в силовых магистралях гидрообъёмного привода. В диапазоне давлений от 0 до 45 МПа оно может быть достаточно точно измерено датчиком давления с электрическим выходом. Как показали результаты данной работы, подход автоматизированного управления дви-



1 – кинематически возможная скорость по двигателю $V(S)$; 2 – ограничение предельной скорости по фазовой частотной характеристике СУП; 3 – данные, полученные при моделировании с предлагаемым регулятором; 4 – расчётное значение цикличности включений СУП N^* ; 5 – экспериментальное значение цикличности включений СУП, обеспечивающих точность траектории; а, в – зоны ограничения скорости по тяговым свойствам двигателя, СУП и буксованию движителя; б, г – зоны ограничения по динамическим свойствам СУП;

Рисунок 7 – Анализ результатов исследования

жением быстроходной гусеничной машины, основанный на перераспределении во времени управляющих силовых воздействий при помощи shaping-фильтров, обеспечивает повышение её быстродействия, сокращение фазового отставания реакции и подавление колебаний системы. Показана необходимость введения обратной связи по параметрам сенсора бокового движения, в частности линейной скорости, а также раздельного регулирования конкретных типов движения. Данный процесс реализован посредством алгоритма распознавания управляющих воздействий водителя и скоростного режима транспортной машины, реализованный на основе аппарата искусственных нейронных сетей (встречного распространения Кохонена-Гроссберга). Это позволяет осуществить адаптацию параметров фильтров. Применение ZVD-shaper-фильтра и последующая его модификация путём введения обратной связи по скорости позволило решать две противоположные задачи. На малых скоростях повысилась динамика движения гусеничной машины, при этом не вызывая колебаний. На высоких скоростях движение водителем задачи расчёта скорости и упреждения задающих воздействий при поворотах затруднено. Реализация потенциальных скоростных свойств машины ограничена (корпус машины не успевает повернуться на заданный угол). Введение фильтров уменьшает фазовое запаздывание и устраняет колебания гусеничной машины в горизонтальной плоскости, тем самым, снимая часть нагрузки на человека-оператора и повышая динамику процессов поворота. Полученные результаты можно использовать при написании алгоритмов управления для вычислительных блоков существующих и перспективных транспортных машин. На основе результатов исследования предложена функциональная схема управления движением. Дальнейшим развитием данной работы может быть введение обратной связи ZVD-фильтра по другим параметрам G-сенсора движения – продольные и поперечные скорости и ускорения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ:

1. На основе проведённого исследования в данной работе научно обоснована и решена задача повышения степени реализации потенциальных скоростных качеств быстроходных гусеничных машин и снижения утомляемости водителя, на основе перераспределения управляющих силовых воздействий во времени (shaper-фильтры) для управления движением. В целом решена задача повышения скоростных качеств машин при движении по дорогам с интенсивным изменением кривизны траектории, имеющая важное значение для развития соответствующей отрасли знаний.

2. При решении поставленной задачи теоретическими и экспериментальными исследованиями по уточнённой модели получены новые математические зависимости основных коэффициентов адаптивных shaper-фильтров от динамически изменяющихся параметров конструкции БГМ и её характеристик.

3. Проведённая верификация экспериментально полученных данных с результатами моделирования рассчитанных алгоритмов управления подтверждает

достоверность дополненной математической модели, отражающей процесс управляемого движения и корректность основных допущений.

4. В ходе моделирования был получен прогноз, согласно которому применение адаптивных shaping-фильтров и метода раздельного регулирования различных типов движения позволит повысить предельную скорость движения, при которой сохраняется управляемость транспортной машиной водителем, до 5 м/с и снизить перерегулирование переходных процессов с 15% до 3%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК РФ

1. Карпов Е.К. Применение shaping-фильтров в системе управления движением быстроходной гусеничной машины [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, Е.К. Карпов // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. Серия «Наземные транспортные средства, энергетические установки и двигатели». – М.: МГТУ «МАМИ». № 1(19). – 2014. – Т. 1. – С. 8-13.

2. Карпов Е.К. 77-48211/649847 Гашение колебаний корпуса гусеничной машины в горизонтальной плоскости / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, Е.К. Карпов // Наука и образование. Издательство: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва) ISSN: 2307-0595. - 2013. - №11. - С. 1.

3. Патент 134 502 Российская Федерация, МПК В 60 W 30/045, В 60 W 40/10, В 60 W 10/04, В 60 W 10/10, В 62 D 55/00. Комбинированная система управления движением быстроходной гусеничной машины / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, Е.К. Карпов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Курганский государственный университет». – № 2013114043/11; заявл. 28.03.2013; опубл. 20.11.2013, Бюл. № 32. – 8 с.

4. Патент 2 529 929 Российская Федерация, МПК В 62 D 11/08, В 60 W 30/045. Мехатронная система управления поворотом быстроходной гусеничной машины / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, Е.К. Карпов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Курганский государственный университет». – № 2013114020/11; опубл. 10.10.2014, Бюл. №28. – 11 с.

5. Патент 2 534 128 Российская Федерация, МПК В 60 К 41/00. Система управления движением быстроходной транспортной машины / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, Е.К. Карпов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Курганский государственный университет». – № 2013114021; заявл. 28.03.2013; положительное решение по заявке от 21.03.2014. – 8 с.

Научное издание

Карпов Егор Константинович

ПОВЫШЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ
МАШИНЫ НА ОСНОВЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ
УПРАВЛЯЮЩИХ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 26.11.14 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,
640669 г. Курган, ул. Гоголя 25.
Курганский государственный университет.