

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Курганский государственный университет»

На правах рукописи

Карпов Егор Константинович

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

Специальность 05.05.03 – Колёсные и гусеничные машины

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
профессор, доктор технических наук
Держанский В.Б.

Курган – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Анализ методов оценки подвижности быстроходной гусеничной машины в характерных условиях движения.....	10
1.2 Зависимость подвижности быстроходной гусеничной машины от удельной мощности двигателя, динамических свойств машины, типа системы управления поворотом.....	18
1.3 Анализ автоматизированных систем управления движением быстроходной гусеничной машины и методов синтеза оптимального управления.....	27
1.4 Задачи исследования.....	37
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ.....	38
2.1 Математическая модель плоскопараллельного движения транспортной машины в горизонтальной плоскости.....	38
2.2 Синтез автоматизированного управления на основе аппарата shaper–фильтров.....	52
2.3 Алгоритм идентификации и отдельного регулирования различных типов движения БГМ с применением искусственных нейронных сетей.....	59
2.4 Расчёт и построение модели адаптивного ZVD–shaper–фильтра системы автоматизированного управления движением БГМ.....	69
2.5 Выводы.....	84
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ.....	86
3.1 Объект и задачи экспериментального исследования.....	86
3.2 Комплекс измерительно–информационной аппаратуры.....	88
3.3 Проведение экспериментальных исследований управления движением	

быстроходной гусеничной машины, статистическая обработка и анализ результатов.....	90
3.4 Выводы.....	103
4. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	104
4.1 Сопоставление результатов теоретического и экспериментального исследования.....	104
4.2 Алгоритм коррекции управляющих воздействий.....	115
4.3 Расширение функциональности и оптимизация разработанной автоматизированной системы.....	126
4.4 Оценка эффективности результатов исследования.....	136
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ.....	138
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	139

ВВЕДЕНИЕ

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 применяется перераспределение управляющих воздействий во времени посредством shaper-фильтров. Они обеспечивают управление объектом по управляющему воздействию. 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 быстроходной гусеничной машины. 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.

Методы исследования

Имитационное моделирование динамики управляемого движения быстроходной гусеничной машины по математической модели, применяемой в теории движения и статистической динамики транспортных машин, осуществлялось в программном пакете MATLAB. Оценка динамических свойств объекта управления (фазово-частотные характеристики, качество переходных процессов) производилась на основе методов теории автоматического управления,

а также теории управляемости и устойчивости движения транспортных машин. Синтез алгоритмов управления движением машины осуществлён на основе реализации shaper-фильтров (zero vibration ZV, zero vibration and derivative ZVD). Идентификация параметров системы, адекватность математической модели объекта и корректность принятых допущений осуществлялась на основе экспериментального исследования – ходовых испытаний быстроходной гусеничной машины с регистрацией параметров бортовым комплексом информационно-измерительной аппаратуры. Обработка экспериментальных данных велась на основе теории вероятностей, спектральных функций, прямого преобразования Фурье в программных пакетах PowerGraph и Statistica. Оценка адекватности полученной модели в ходе теоретического исследования и корректность основных допущений основывались на сопоставлении с результатами экспериментальных исследований. Решение задачи распознавания заданных типов движения машины осуществлялось с применением аппарата искусственных нейронных сетей. Расчёт значений коэффициентов shaping-фильтров осуществлялся с помощью методов вычислительной математики, настройка коэффициентов адаптивных компонентов регулятора, моделирование процесса автоматизированного управления движением БГМ, верификация полученных данных и результатов экспериментов велись в программных пакетах Mathcad, MATLAB, Statistica и VisSim.

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 и формирующих обратную связь.

Впервые разработан метод перераспределения во времени управляющих силовых воздействий для повышения подвижности БГМ. Для организации функционирования системы управления движением используются 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 (линейная и угловая скорость, ускорение и др.).

Предложен метод распознавания типов движения для отдельного регулирования.

Новизна технических решений подтверждена 3 патентами РФ на изобретения и полезную модель.

Практическая ценность

Предложенная компьютерная математическая модель позволяет прогнозировать скоростные качества БГМ при движении на трассах с детерминированным и случайным изменением кривизны траектории.

Разработан алгоритм управления движением БГМ на основе перераспределения управляющих воздействий во времени посредством shaper-фильтров, позволяющий обеспечить робастность системы.

Обоснована целесообразность включения в мультиплексную систему управления движением машины сигнала датчика управляемой координаты давления рабочей жидкости гидропривода механизма поворота, позволяющего существенно повысить точность функционирования системы при сокращении числа измеряемых параметров, уменьшить время чистого запаздывания обратной связи.

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 $\Delta S=20...40$ м до 5 м/с, а на дорогах со случайным интенсивным изменением кривизны траектории на 38%.

На защиту выносятся:

1. Компьютерная математическая модель динамики управляемого движения, уточнённая возможностью вариации параметров конструкции, определяющих собственную частоту системы, её демпфирующие свойства, а также дополненная

существенными нелинейностями, оказывающими влияние на обратную связь системы управления.

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 – shaper-фильтров и искусственных нейронных сетей (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 опубликовано 20 работ, в том числе 5 в издании перечня, рекомендованного ВАК РФ.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ методов оценки подвижности быстроходной гусеничной машины в характерных условиях движения

Прогнозирование подвижности при криволинейном движении

При проектировании систем управления движением быстроходных гусеничных машин (БГМ) наиболее важной оказывается задача оценки эффективности полученной системы и подвижности машины в характерных условиях движения. Средняя скорость движения является одним из критериев оценки быстроходности транспортных машин.

Без учета ограничений, связанных с решением тактико-технических задач, т.е. при движении в транспортном режиме по характерным дорогам, используются методы прогнозирования, основанные на изучении установившихся процессов. Средняя скорость определяется как случайная величина на основе функции распределения скорости по пути [34]

$$F_S(V) = \prod_{i=1}^3 F_{S_i}(V), \quad (1.1)$$

где $F_{S_i}(V)$ – функция распределения скорости движения с учетом ограничений по тяговым качествам ($i=1$), по предотвращению заноса на криволинейных участках ($i=2$), по параметрам плавности хода на неровных участках дороги ($i=3$).

Расчет скорости движения производится на основе тягово-скоростной характеристики машины, скоростной характеристики системы поддрессоривания и функций распределения коэффициентов сопротивления движению $F_S(f)$, повороту $F_S(\mu)$, кривизны $F_S(k)$ и микропрофиля $F_S(h,a)$, или интенсивности микропрофиля $F_S(J_n)$.

При движении по ровным дорогам скорость ограничивается тягово-динамическими качествами машины и условиями движения в повороте – условиями бокового заноса

$$V \leq \sqrt{\mu \cdot g / k} \quad (1.2)$$

Для характерных дорог функции распределения кривизны k и коэффициента сопротивления повороту $F_S(\mu)$ известны.

Эти методы разработаны и дают достаточно точные результаты для сравнительно тихоходных машин и при движении по местности на деформируемых грунтах. Для скоростных машин подвижность во многом ограничивается управляемостью. Данное свойство характеризует все аспекты динамики системы «Человек – машина – внешняя среда» и оценивается динамическими, кинематическими и силовыми характеристиками. Динамические характеристики определяются по качеству переходных процессов входа в поворот и выхода из него, т.е по реакции машины как управляемого объекта.

В работе [49] показано, что управляемость быстроходных машин адекватно оценивается по фазово-частотным характеристикам. Автором определены соответствующие зависимости для линейных систем, а аргументом принята частота процесса, определяемая параметрами кривизны тестовой «змейки» без учёта выполнения водителем функции обратной связи. На основе исследования движения машины как непрерывного марковского процесса В.А. Савочкин [34] определил цикличность как число положительных выбросов кривизны нулевого уровня. Для повышения точности метода необходимо дополнительно учесть результаты исследования динамики управляемого движения, выполнение водителем функции звена обратной связи по компенсации отклонений.

Интенсификация рабочих процессов при повышении скоростных качеств, применение принципиально новых конструктивных решений, получение дополнительных экспериментальных данных позволяют углубить понимание физических процессов, уточнить принимаемые ранее ограничения и допущения, дополнить математические модели движения с учётом реальных динамических

свойств, интенсивности изменения и особенностей формирования параметров управления, динамики системы управления движением, водителя как звена обратной связи системы и др. Учитывая тенденцию дальнейшего повышения скоростных качеств, представляется актуальным совершенствование методов прогнозирования подвижности.

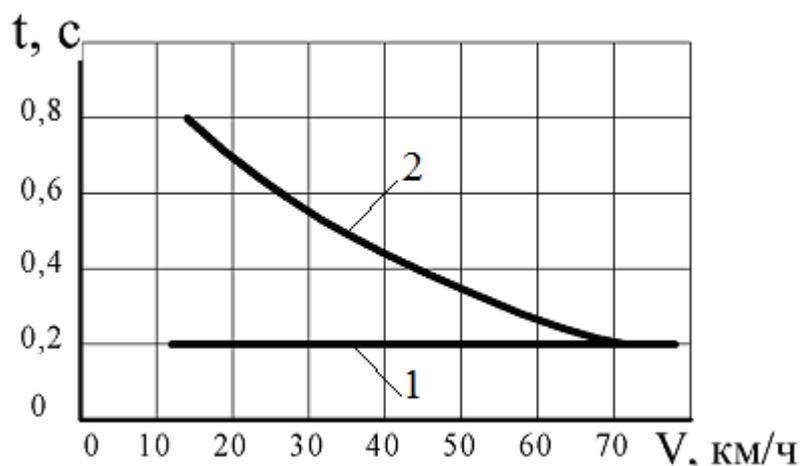
Переходные процессы при управлении поворотом машины, управляемость принято определять на тестовых испытаниях, таких как вход в поворот, «переставка» и движение по синусоидальной траектории с предопределённой длиной полуволны – «змейке».

Динамические свойства гусеничной машины наиболее полно проявляются при движении по тестовой «змейке». Динамические характеристики определяются по качеству переходных процессов входа в поворот, выхода из него и оцениваются следующими параметрами:

- время запаздывания реакции по угловой скорости и по курсовому углу как длительность времени от начала перемещения штурвала до начала изменения угловой скорости и курсового угла соответственно;

- быстродействие системы, определяемое по длительности от начала перемещения штурвала до момента, когда угловая скорость достигнет установившегося значения.

Обычно при оценке напряжённости управляющей деятельности водителя в качестве основного показателя рассматривается время упреждения, при котором обеспечивается точность траектории движения [21]. Применительно к рассматриваемому процессу время, соответствующее требуемому опережению задающего воздействия по отношению к изменению курсового угла, с увеличением скорости уменьшается. Это подтверждается исследованием механики управляемого движения гусеничной машины. Результаты обработки экспериментальных данных приведены на рисунке 1.1 в виде зависимости длительности $t_{3\varphi}$, $t_{1\omega}$ от скорости движения. Как следует из рисунка, с увеличением скорости движения время запаздывания остаётся неизменным, а быстродействие системы управления поворотом снижается.



1 – время запаздывания, 2 – время переходного процесса

Рисунок 1.1 – Зависимость длительности переходного процесса от скорости движения

Если быстроедействие рассматривать как показатель сложности регулирования направления движения, то следовало бы признать, что управлять движением машины по заданной «змейке» с неизменной длиной волны тем проще, чем выше скорость. Такое заключение противоречит опыту, поскольку с ростом скорости уменьшается время прохождения машиной одного цикла.

Исследования показывают, что человек как звено замкнутого контура управления может сравнительно легко изменить значение динамического коэффициента усиления в соответствии со сложившейся ситуацией, но ему трудно компенсировать отставание выходного сигнала по фазе [15]. В приводе управления поворотом машины нет форсирующих звеньев, которые могли бы способствовать изменению курсового угла (направления движения) с требуемым опережением; эта функция возлагается на водителя. Поэтому с увеличением фазового сдвига, ужесточаются требования, предъявляемые динамической системой «машина – внешняя среда» к водителю и исполнительным механизмам системы управления поворотом. При больших значениях фазового отставания водитель вообще не может вписаться в заданную кривую пути. В связи с этим критерием сложности управления принимается коэффициент фазовой напряжённости регулирования направлением движения.

Для прогнозирования подвижности в качестве аргумента целесообразно применять частоту процесса ω . При движении по тестовой змейке $\omega = \pi V / \Delta S$. Если рассматривать дорожную кривизну как случайную функцию, то предельную скорость движения также можно определить по коэффициенту фазовой напряжённости. Частотная характеристика траектории определяется функцией частной производной курсового угла $d\varphi$ по пути ds . В статистической динамике транспортных машин показано, что курсовой угол φ , его производная $d\varphi/ds$, следовательно и кривизна, являются стационарными случайными функциями, обладающими свойствами эргодичности. Если управляющее воздействие водителя соответствует производной курсового угла направления траектории движения, то оно является стохастической функцией. В силу стационарности случайной функции $k(s)$ её центрируют относительно математического ожидания $m_k = 0$. Реакцией гусеничной машины как линеаризованной системы является случайная функция. Фазово-частотная характеристика и в этом случае является детерминированной функцией.

Анализ выполненных работ показывает, что подвижность во многом ограничивается устойчивостью движения. Исследование устойчивости движения проводится на основе математической теории устойчивости Ляпунова. Для линейной системы используется первый метод, в соответствии с которым применяется критерий Рауса-Гурвица. Для нелинейных систем строится функция Ляпунова и устойчивость анализируется по прямому (основному) методу Ляпунова. В работе [6] приводится анализ устойчивости линеаризованного дифференциального уравнения вращательного движения машины. На основе исследований установлена зависимость предельной по устойчивости скорости равномерного движения.

Многочисленными работами, посвященными исследованию динамики управляемого движения быстроходных гусеничных машин [6,16,19,20,31,51,71] (БГМ) установлено, что скоростные качества на трассах с интенсивным изменением кривизны траектории во многом ограничиваются удельной мощностью и величиной поворачивающего момента, создаваемого

гидрообъемным механизмом поворота (ГОМП). Для повышения динамических качеств машин поворачивающий момент должен быть достаточным для преодоления сопротивления грунта повороту и инерционной составляющей. В противном случае проявляется действие нелинейности характеристики гидрообъемной передачи системы управления поворотом (СУП), вызванной ограничением давления или расхода рабочей жидкости. В этих условиях не обеспечивается не только динамическая устойчивость, но и статическая. Введение обратной связи в СУП не повышает управляемости. Следовательно, движение замкнутой нелинейной динамической системы не только не устойчиво, но и не управляемо [15].

Анализ результатов исследования динамики управляемого движения

Анализ методов расчета и прогнозирования подвижности быстроходных гусеничных машин показывает, что достаточно точные результаты могут быть получены при установившемся движении машин с ограниченной удельной мощностью. Из результатов исследования динамики управляемого движения следует, что скоростные качества гусеничных машин зависят от свойств системы управления поворотом, ограничиваются удельной мощностью машины, динамическими явлениями при циклическом включении механизма поворота, отклонением (дивергенцией) параметров траектории движения от заданной вследствие несовпадения траекторной кривизны с дорожной, психофизиологическими возможностями выполнения водителем функции обратной связи, быстродействием системы управления переключением передач, а также удельной мощностью системы управления поворотом. Удельная мощность системы управления поворотом определяет динамические свойства. Применение гидроприводов в системе управления поворотом требуемой мощности ограничивается условиями компоновки в корпусе машины и габаритно-массовыми параметрами.

Выполненный анализ мирового опыта разработки конструктивных решений, обеспечивающих требуемые динамические качества при ограниченной мощности систем управления поворотом показывает, что известные решения имеют

существенные ограничения. При этом делается вывод, что основным направлением повышения скоростных качеств машин при повороте является не только повышение ее удельной мощности, но и системы управления поворотом. Это обеспечивает регулирование направления движения с требуемыми угловой скоростью, ускорением, а так же фазовым отставанием реакции машины на управляющее воздействие. Однако из результатов экспериментального исследования динамики управляемого движения машины с увеличенными удельной мощностью на 33 % и поворачивающим моментом, обеспечивающим рост угловых ускорений при повороте на малодеформируемом грунте от 0,7 до 1,1 рад/с², то есть в 1,4 раза, следует, что средняя скорость движения на тестовой змейке с интенсивным изменением кривизны траектории гораздо ниже расчетной по силовым условиям поворота при движении по влажному бетону и дернистому грунту.

Результаты исследований показывают, что при движении машин по трассам с интенсивным изменением кривизны траектории скорость движения ограничивается условием вписываемости в ограниченный коридор в большей степени, чем по условиям устойчивости.

В работах В.И. Красенькова [53] показано, что управляемость, следовательно, и подвижность быстроходных машин адекватно можно оценить по фазово-частотным характеристикам. Им определены соответствующие зависимости для линейных систем, а аргументом принята частота процесса, определяемая параметрами кривизны тестовой «змейки» без учёта выполнения водителем функции обратной связи. При движении по трассе со случайным изменением направления движения частоту процесса можно определить по цикличности включения механизма поворота. На основе исследования движения машины как непрерывного марковского процесса В.А. Савочкин определил цикличность как число положительных выбросов кривизны нулевого уровня [34].

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 [69, 71], В.И. Красненькова [50,51,52,54], Е.Е. Александрова [2], С.А. Бекетова [5], В.А. Савочкина [34], Е.Б. Сарача [33], Г.О. Котиева, M.G. Bekker, J.Y. Wong, исследователей Японии и США [84,85,88,86], а также отраслевых материалов [38]. 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. Благоднарова [6], В.Б. Держанского [32] и развитая в работах И.А. Тараторкина [73]. 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 [16] 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.

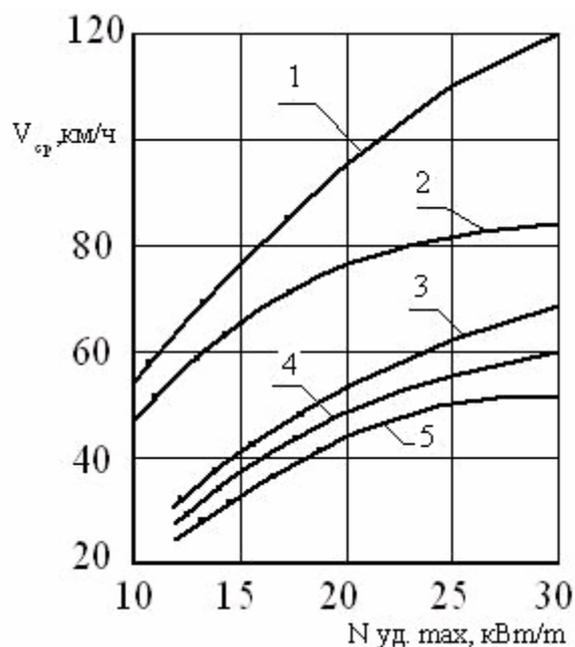
Произведённый анализ показывает, что повышение скоростных качеств машины при интенсивном изменении кривизны траектории показало, что рост удельной мощности системы управления поворотом является необходимым, но недостаточным условием повышения скоростных качеств. Фазовое отставание реакции предложено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

1.2 Зависимость подвижности быстроходной гусеничной машины от удельной мощности двигателя, динамических свойств машины, типа системы управления поворотом

Влияние удельной мощности на подвижность и зависимость скоростных качеств от типа системы управления поворотом

Прогноз, который базировался на исследованиях выполненных в ВА БТВ в 1964 году [70], когда удельная мощность машины не превышала 12 кВт/т, позволил построить зависимость максимальной скорости движения от удельной мощности машины (рисунок 1.2). При удельной мощности равной 30 кВт/т максимальная скорость движения по дорогам составляет более 100 км/ч (график 1) и до 80 км/ч по местности (график 2). При учете ограничений по силе тяги, плавности хода, управляемости, затрат мощности в движителе и трансмиссии средняя скорость должна составлять 70 км/ч.

Результаты аналогичных исследований, выполненных во ВНИИТМ (1982 год, графики 3,4,5) дают более низкие значения [37].



Прогноз ВАБТВ (1965 г.): 1 – по дорогам; 2 – по местности. Прогноз ВНИИТМ (1982 г.): 3 – фактор внешних условий; 4 – управляемость; 5 – плавность хода.

Рисунок 1.2 – Зависимость прогнозируемой скорости движения машины от удельной мощности

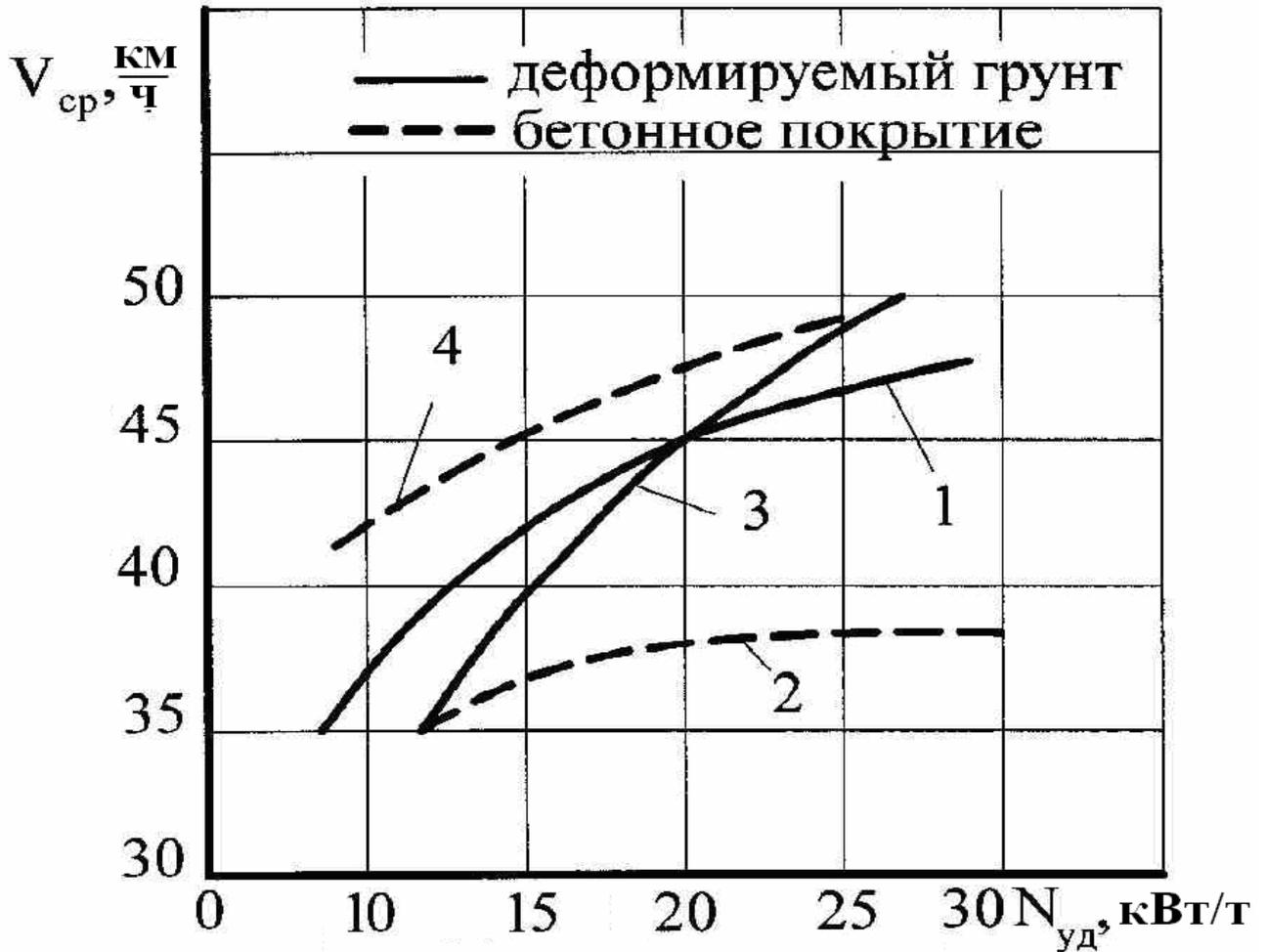
Анализ указанной зависимости для современных машин с удельной мощностью до 30 кВт/т приводится ниже. Выполненными исследованиями [1] установлено, что длительность движения при переходных процессах регулирования направления движения (поворота) быстроходных гусеничных машин составляет более 60 % времени. Зависимость интегрального критерия – средней скорости движения от удельной мощности машины с дискретными и непрерывными свойствами системы управления поворотом при движении на деформируемых и малодеформируемых грунтах установлена экспериментальным исследованием динамики управляемого движения быстроходных гусеничных машин.

Результаты исследования приведены на рисунке 1.3 [33]. График 1 характеризует зависимость средней скорости движения гусеничной машины с дискретными свойствами механизма поворота (МП) при движении по деформируемому грунту. Из графика следует, что при увеличении удельной мощности с 13,6 до 19,0 кВт/т средняя скорость прохождения тестовой «змейки» возрастает с 35 до 46 км/ч (на 30 %). В этих же условиях для гусеничных машин с непрерывными свойствами гидрообъемного механизма поворота (ГОМП, график 3) повышение удельной мощности от 14,8 до 22,7 кВт/т (в 1,53 раза) средняя скорость прохождения змейки возрастает на 40 % (с 35 до 48 км/ч).

Следует отметить, что при удельной мощности до 20 кВт/т в характерных условиях (деформируемый грунт) средняя скорость движения машины с МП с дискретными свойствами не ниже, чем у машин с непрерывными свойствами (с ГОМП) - графики 1, 3. Это связано с тем, что часть мощности двигателя тратится на привод гидрообъемной передачи ($f_{\text{ГОП}}$) механизма поворота.

Эти результаты получены при движении на деформируемых грунтах. При движении на малодеформируемых грунтах с ограниченными сцепными свойствами и интенсивным изменением направления движения скоростные качества гусеничной машины с МП с дискретными свойствами весьма ограничены и не превышают 35...38 км/ч из-за невозможности плавного

регулирования кривизны, углового ускорения (график 2), компенсации отклонения траектории. Анализ спектральной плотности случайного процесса



1, 2 – механизм поворота с дискретными свойствами; 3, 4 – механизм поворота с непрерывными свойствами

Рисунок 1.3 – Зависимость средней скорости движения от удельной мощности машины

отклонения угловой скорости от заданной показывает, что с ростом скорости движения частота процессов превышает предельные возможности водителя $[f_e] < 0.8..1.0$ Гц [1]. При движении по дороге с покрытием число «подруливаний» составляет $n_a = 96$ на километр пути. В связи с этим компенсирующее управление эффективно при скорости движения $V < 36$ км/ч. В таких условиях движения преимущества гидрообъемных механизмов (с непрерывными свойствами) существенны (график 4 на рисунке 1.3).

Приведенные данные подтверждаются практикой модернизации МТ-ЛБ. Сравнительные испытания двух модернизированных машин с увеличенной на 25 % удельной мощностью (до 17,0 кВт/т) показали, что в характерных условиях движения подвижность машин со ступенчатым механизмом поворота (СМП) лишь на 8...15 % ниже, чем с МП с непрерывными свойствами (ГОМП) при установочной мощности 250 кВт. Однако на дорогах с интенсивным изменением направления движения и ограниченными сцепными свойствами – на тестовых трассах «змейка», «переставка» и затяжных поворотах, динамические и скоростные качества гусеничных машин, оснащенных СМП, существенно ниже, чем с ГОМП, увеличивается интенсивность управляющей деятельности водителя, число включений механизма поворота на километр пути возрастает в 6...9 раз.

Скоростные качества гусеничных машин с дискретными свойствами системы управления поворотом ограничиваются удельной мощностью машины, динамическими явлениями при циклическом включении механизма поворота, отклонением (дивергенцией) параметров траектории движения от заданной вследствие несовпадения траекторной кривизны с дорожной, психофизиологическими возможностями выполнения водителем функции обратной связи, а также быстродействием системы управления переключением передач.

Подвижность, соответственно и управляемость гусеничных машин с непрерывными свойствами системы управления во многом определяется динамическими и кинематическими свойствами, анализ которых приводится ниже.

Высокие динамические качества, определяющие фактор подвижности гусеничной машины

Динамические свойства определяют качество переходных процессов, при которых угловое ускорение $\dot{\omega}$ определяется отношением разности моментов поворачивающего M_{Π} и сопротивления M_c к моменту инерции $\delta_{\omega} I_Z$ машины. Для машин с дифференциальным гидрообъемным механизмом поворота поворачивающий момент создается гидромотором $M_{\Pi} = M_{ГМ} B(1+k) U_{БР} U_{МС} / 2r_{Вк}$ автоматически в силу свойств гидропередачи. Момент гидромотора является

сложной нелинейной функцией, которая описывается следующей системой дифференциальных уравнений (1.3), приведенной в работе [13,14]:

$$\begin{aligned} M_{ГМ} &= \Delta P \cdot q_{зон}; \\ \frac{\Delta P}{dt} &= (Q_{ГН} - \Delta Q) \cdot E(\Delta P, b, n); \\ Q_{ГН} &= q_n(\alpha_{ум}) \cdot \omega_\partial(\alpha_{nm}) \cdot U_{\partial n}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где ΔP – избыточное давление в силовых магистралях; $q_{ГОН}$ – объемная постоянная; Q – расход жидкости; ΔQ – утечки жидкости, включая через предохранительный клапан; $E(\Delta P, b, n)$ – модуль упругости рабочей жидкости, зависящий от избыточного давления ΔP ; газосодержания b и показателя политропы n .

Требуемый рост давления и расход жидкости при переходных режимах ограничивается вследствие срабатывания предохранительного клапана. При этом возрастает температура рабочей жидкости в силовых магистралях ГОП, что переводит ее в двухфазное состояние. При этом повышается коэффициент газосодержания, снижается модуль упругости жидкости, и, соответственно, механическая жесткость ГОП, увеличивается фазовое отставание реакции на управляющее воздействие и ограничивается работоспособность передачи.

Скоростные качества определяются кинематическими и силовыми условиями, создаваемыми системой управления поворотом. Кинематические условия регулирования направления движения машины, в том числе на затяжных поворотах ограниченной кривизны, во многом определяются зависимостью

(характеристикой) $\omega_{ПТ} = \omega_{П0}(\alpha_{ШТ}, \alpha_{ПТ})$ и чувствительности $\sum \frac{\partial \omega_n}{\partial \alpha_i}$ к управлению

$\omega_n = \omega_{n0}(\alpha_{ум}, \alpha_{nm}) + \sum \frac{\partial \omega_n}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i$, а также максимальным значением угловой скорости поворота ω_{nmax} . По этому параметру дифференциальные гидрообъемные механизмы поворота превосходят другие. При отсутствии динамических

ограничений положительность производных $\frac{\partial \omega_n}{\partial \alpha_{ум}} > 0$, $\frac{\partial \omega_n}{\partial \alpha_{nm}} \text{sign} \dot{\alpha}_{nm} > 0$ соответствует

управляемости. При росте ω_{II} (последнее условие) увеличение подачи топлива выполняет роль форсирующей функции.

Для машин, оснащенных системой управления поворотом с непрерывными свойствами – дифференциальным гидрообъемным механизмом поворота, угловая скорость поворота является функцией двух управлений α_{III} и α_{II} :

$$\omega_3 = 2r_{вк} U_{ГОП}(\alpha_{um}) \cdot \omega_{\delta}(\alpha_{nm}) / (1+k) B \cdot U_{\delta p} U_{дн} U_{MC} K_R \quad (1.4)$$

и не зависит от номера включенной передачи.

Передаточные числа $U_{дн}$, U_{MC} определяются из условия движения без бокового заноса на грунтах с высокими сцепными свойствами на максимальном скоростном режиме ($\omega_{\delta} = \omega_N$). При этом расчетная угловая скорость поворота принимается равной 1 рад/с. Это обеспечивает высокие скоростные качества машины на дорогах с интенсивным изменением кривизны. Однако при движении машины со скоростью ниже максимальной $V < V_{jmax}$ на режиме вращения вала $\omega_{\delta} = \omega_M$ угловая скорость поворота снижается в ω_N / ω_M раз и может быть недостаточной. Например, при движении по окружности с радиусом 20 м ($k = 0,05 м^{-1}$ $k = 0.05 м^{-1}$) по сухой бетонной дороге ($\mu = 0.8$) с предельной скоростью (1.2), равной 12,6 м/с, угловая скорость должна составлять $\omega = V \cdot k = 0.63$ рад/с. Если двигатель работает на режиме максимального момента, то расчетная угловая скорость составляет $\omega_p = \omega_{max} \cdot \omega_N / \omega_M = 0,5$ рад/с. При юзе и буксовании гусениц фактическая угловая скорость поворота еще меньше и не превышает 0,33...0,38 рад/с (принято, что на установившемся режиме коэффициент буксования определяется отношением длины опорной поверхности к ширине колеи $K_R = L/B = 1,3 \dots 1,5$). Следовательно, передаточное число привода ГОП $U_{дн}$ должно быть регулируемым для обеспечения необходимой угловой скорости поворота машины при работе двигателя не на максимальной угловой скорости $\omega_{\delta} \ll \omega_N$. В противном случае следует уменьшить номер включенной передачи.

Для обеспечения высоких динамических качеств поворачивающий момент должен быть достаточен для преодоления сопротивления грунта и инерционных

сил. Численная оценка показывает, что для машин массой 20 т необходима установочная мощность ГОП не менее 240 кВт – 50...60 % мощности двигателя.

Применение гидрообъемных передач такой мощности при достигнутом значении рабочего давления 45 МПа ограничивается условиями компоновки и габаритно-массовыми параметрами.

Запаздывание реакции гусеничной машины на управляющее воздействие приводит к необходимости создания соответствующего упреждения управления. При появлении на трассе полигона внезапных «закрытых» поворотов управление не является упреждающим. В этом случае резкий поворот штурвала не приводит к соответствующему повороту гусеничной машины, движение является неуправляемым, машина проезжает поворот на 5...10 м. Движение в таких случаях приводит к съезду с дороги и к другим нежелательным последствиям. Особенно ярко это проявляется при движении на высшей передаче с неполной подачей топлива, так как при этом проявляется нелинейность гидрообъемной передачи, связанная с ограничением расхода рабочей жидкости при недостаточной частоте вращения вала гидронасоса. Снижение скорости движения путем торможения перед поворотом приводит к дополнительному снижению частоты вращения вала гидронасоса и его производительности. Экспериментально установлено, что при вероятности появления «закрытых» поворотов управляемость может быть повышена при быстром переключении передачи на номер ниже и при увеличении частоты вращения вала двигателя близко к максимальной (конструкция системы управления гидромеханической трансмиссией позволяет это осуществить). Первое приводит к повышению чувствительности к управляющему воздействию, а второе увеличивает производительность гидронасоса ГОП.

Для обеспечения устойчивости движения замкнутой системы с обратной связью и высоких динамических качеств при ограниченной установочной мощности гидрообъемной передачи, ее объемно-габаритных и компоновочных размеров, в конструкциях трансмиссий используются двухпоточные управляемые приводы (таблица 1.1). Анализ конструктивных решений, обеспечивающих

высокие динамические качества при ограниченной установочной мощности ГОП, показывает наличие существенных функциональных ограничений.

Таблица 1.1 – Характеристика конструктивных решений, обеспечивающих высокие динамические качества при ограниченной мощности гидрообъемной передачи

Трансмиссия	Устройство, включаемое в дополнительный поток	Основные ограничения
1	2	3
Marder, HSWL-194	Разгрузочные гидромуфты с регулируемым наполнением	Недостаточное быстродействие, особенно при опорожнении, большая длительность переходных процессов, особенно при выходе из поворота, приводящая к режиму эволюционного движения
Гусеничная машина массой 19т	Раздельное управление торможением гусеницы отстающего борта на низших передачах	Необходимость управления тормозным моментом с обратной связью по угловой скорости из условия $\omega_{\Phi} \leq \omega(\alpha_{ШТ}, \alpha_{ПТ})$
Гусеничная машина средней категории по масс	Подключение механической ветви через управляемый фрикцион, двойной дифференциал	Необходимость управления моментом фрикциона с обратной связью по угловой скорости из условия $\omega_{\Phi} \leq \omega(\alpha_{ШТ}, \alpha_{ПТ})$
Перспективная машина, Bready	Две бортовые гидрообъемные передачи	Синхронность функционирования, сложная программа управления

Например, конструкция системы управления остановочными тормозами гусеничной машины на низших передачах позволяет увеличить поворачивающий момент за счет отдельного торможения гусеницы отстающего борта (строка 2 таблица 1.1) [15]. Однако при торможении одной из гусениц при отдельном управлении тормозами, а также при заклинивании одной из гусениц в процессе аварийного сброса гидромотор переходит в режим гидронасоса. Такой режим работы сопровождается раскруткой вала гидронасоса с угловой скоростью, в несколько раз превышающей номинальную. Предохранительные клапаны силовых магистралей выполнены таким образом, что выдерживают давление в этом режиме выше, чем при номинальном. Поэтому происходит перегрузка ГОП и разрушение ее деталей. В связи с этим в автоматизированную систему управления движением необходимо ввести устройство, предохраняющее ГОП от перегрузок.

Для машин с дифференциальным ГОМП снижение скорости поступательного движения уменьшением подачи топлива (частоты вращения вала двигателя), как показано выше, недопустимо, так как это приводит к снижению угловой скорости гидромотора и поворота машины и еще в большей степени снижает динамические качества.

Торможение в процессе поворота не допустимо, так как затрудняется возможность криволинейного движения. Некоторый эффект может быть достигнут при упреждающем переключении передач в ГМТ на номер ниже и соответствующим увеличением подачи топлива. Для повышения динамических качеств и управляемости гусеничной машины с ограниченной мощностью ГОП путем использования кинетической энергии поступательного движения (инерционных сил при замедлении) конструкция механизма поворота и управление им должны быть с регулируемым в зависимости от скорости кинематическим параметром q , определяющим расстояние от центра масс до точки, сохраняющей при повороте скорость прямолинейного движения. Это может быть реализовано при двух бортовых гидрообъемных передачах (последнее решение в таблице 1.1). Проведенные всесторонние

экспериментальные исследования управляемости гусеничных машин с такой системой управления показали, что параметры, характеризующие качество переходных процессов, несколько выше, чем с обычной системой управления, что обеспечивает более высокие скоростные и динамические качества. Такое решение позволяет не только снизить нагруженность гидрообъемной передачи, но и при одновременном управлении расширить кинематический диапазон трансмиссии, осуществлять синхронизацию включаемых элементов в процессе переключения передач. В такой схеме управления возникает проблема асинхронности работы гидрообъемных передач из-за нелинейности характеристик, разности моментов на ведущих колесах, необходимости стабилизации прямолинейного движения, а также сложности программы управления, так как при такой системе управления угловая скорость поворота является неоднозначной функцией трех управляющих воздействий: $\alpha_{шт}$, γ_1 и γ_2 .

Схема такого механизма сложнее дифференциального из-за необходимости установки двух гидромашин. Усложняется также система и программа управления поворотом.

1.3 Анализ автоматизированных систем управления движением быстроходной гусеничной машины и методов синтеза оптимального управления

Регуляторы автоматизированного управления, рассчитанные по классическим методикам и оценка эффективности их применения

Одним из основных эксплуатационных свойств транспортных гусеничных машин 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 при прямолинейном движении и в процессе поворота.

Существующие ограничения скорости и управляемости были уменьшены введением корректирующего устройства – интегрирующего звена. В такой системе сигнал на выходе содержит составляющие, пропорциональные рассогласованию и интегралу от рассогласования. Однако введение интегрирующего звена в закон управления уменьшило устойчивость системы автоматического регулирования и увеличило запаздывание в действии результирующего сигнала (поворачивающего момента). Для сокращения запаздывания в закон регулирования были введены одновременно и производная рассогласования, то есть был синтезирован пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (рисунок 1.4) [35].

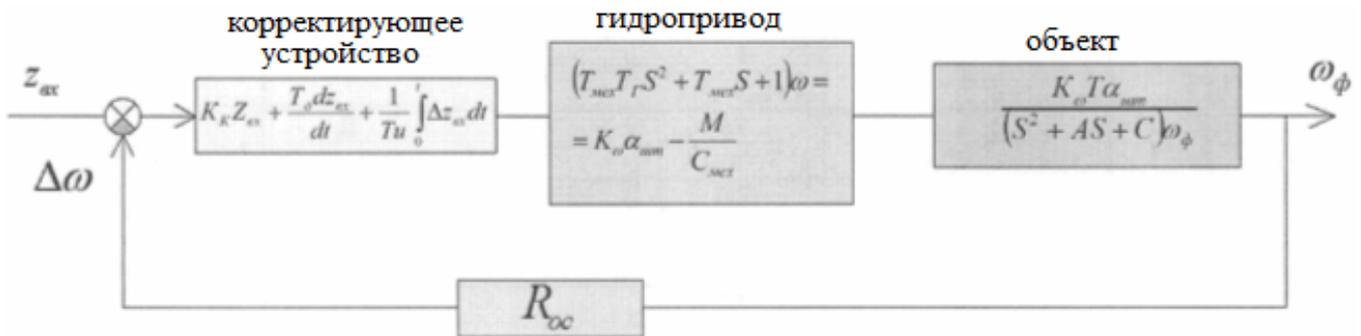


Рисунок 1.4 – Структурная схема системы управления

Параметры регулятора (таблица 1.2) были рассчитаны для типового процесса с 20%-перерегулированием [18, 96], который распространён в рамках САУ (систем автоматизированного управления) и даёт наилучшие результаты при управлении большинством технических систем [59].

В соответствии с результатами исследования был синтезирован ПИД-регулятор, осуществляющий коррекцию управления движением. В ходе экспериментальной проверки его эффективности были получены результаты, представленные в таблице 1.3.

Степень реализации потенциальных скоростных качеств быстроходной гусеничной машины может быть повышена при автоматизации управления движением, однако, результаты испытаний машины с макетным образцом ПИД-регулятора, синтезированного на основе известных методов [7,66], показывают, что эффективность регулятора недостаточна. Основной недостатком

существующей системы состоит в том, что реакция на боковой занос формируется по данным о боковых скоростях и ускорениях от датчиков, установленных на корпусе машины, в то время как разность во времени между появлением этих ускорений и задающим воздействием водителя велика, то есть в системе имеется время чистого запаздывания, которое оказывает влияние на общую динамику гусеничной машины и её управляемость.

Таблица 1.2 – Рассчитанные параметры существующего регулятора

Тип регулятора	Формулы для расчёта параметров настройки	Результаты расчёта
П	$K_p = \frac{0.7}{K_{ov} \cdot \tau / T}$	$K_p = 3.2$
И	$K_p = \frac{1}{1.7 \cdot K_{ov} \cdot \tau}$	$K_p = 303$
ПИ	$K_p = \frac{0.7}{K_{ov} \cdot \tau / T}$; $T_i = 0.7 \cdot T$	$K_p = 3.2$; $T_i = 0.011$ с
ПИД	$K_p = \frac{1.2}{K_{ov} \cdot \tau / T}$; $T_i = 2 \cdot T$; $T_d = 0.4 \cdot \tau$	$K_p = 5.5$; $T_i = 0.03$ с; $T_d = 1.2$ с

Таблица 1.3 – Эффективность синтезированного ПИД-регулятора

Параметры оценки	Условия движения		
	Тестовая змейка ($\Delta S = 30 \dots 50$ м)	Извилистая грунтовая дорога	Прямолинейный участок (бетон, заснеженная дорога)
Повышение средней скорости $V_{cp}, \%$	14,3	12...16	Эффект отсутствует
Цикличность включения СУП водителем, $N^*, \text{км}^{-1}$	37->25	Уменьшается в 1,5...1,8 раза	Не снижается

Другой недостаток заключается в том, что ПИД-регулятор, применяемый в ней работает наиболее эффективно в том случае, если задающие воздействия

являются гармоническими, однако в действительности управляющие воздействия водителя даже при движении на тестовых змейках не являются таковыми, они приводят к дополнительным нежелательным колебаниям реакции машины как объекта управления с упруго-инерционными свойствами. Кроме того недостаточная эффективность ПИД-регулятора во многом объясняется тем, что его структура должна обеспечивать выполнение двух противоречивых требований: высокое быстродействие в процессе управления поворотом и слабая чувствительность к изменению параметров объекта управления, в тоже время - минимизация или снижение колебаний корпуса при прямолинейном движении. Последнее достигается введением в регулятор интегрирующего звена, которое снижает устойчивость системы и увеличивает запаздывание реакции машины в процессе поворота. Эффективность ПИД-регулятора снижается также вследствие вариации параметров конструкции гусеничной машины, входящих в математическую модель и определяющих собственную частоту системы, в соответствии с которой синтезирован регулятор, а также колебаний корпуса машины в горизонтальной плоскости и в системе управления движением - существенно изменяемым параметром конструкции машины, приводящим к вариации собственной частоты системы и её демпфирующих свойств, то есть известная система не обладает робастностью [64,65]. Учитывая противоречивость требования по обеспечению быстродействия системы при управлении поворотом, а при прямолинейном режиме движения - интенсивность гашения колебаний корпуса, в систему необходимо ввести идентификатор требуемого режима движения и распараллелить алгоритмы управления движением. В виду существенной вариации параметров конструкции объекта управления, входящих в математическую модель и скоростного режима движения, приводящих к вариации собственной частоты и демпфирующих свойств, необходимо обеспечить робастность системы управления.

Необходим новый информационный подход, который способен учитывать нелинейные изменения параметров системы, а также обрабатывать зашумлённые или неполные наборы входных данных.

Перспективные методики регулирования и обзор возможности адаптации их для решения поставленных в работе задач

Среди существующих и применяющихся на практике подходов по синтезу автоматизированных систем направленных на получение оптимального управления выделяются shaper-алгоритмы, системы с применением алгоритмов нечёткой логики и искусственных нейронных сетей [55].

Принцип работы Shaping-алгоритмов заключается в формировании управляющего сигнала путём свёртки задающего управляющего воздействия с последовательностью импульсов в виде дельта-функции Дирака. Количество импульсов, период их следования и амплитуда каждого из них определяет эффективность алгоритма. Алгоритм их работы основан на перераспределении во времени силового воздействия на объект управления при сохранении неизменной величины суммарного воздействия. За счёт относительного увеличения времени перехода системы из одного состояния в другое обеспечивается компенсация возникающих колебаний, а сдвиг управляющего воздействия на половину периода вычисленных колебаний объекта управления обеспечивает в идеальном случае полное их подавление.

Первыми стали применяться shaping-фильтры с так называемой нулевой вибрацией (zero-vibration, ZV). Однако ZV-фильтр работает хорошо только при совпадении фактической частоты и частоты, на которую он настроен [56]. Когда эти частоты не совпадают, в системе возникают остаточные колебания, амплитуда которых может достигать неприемлемого уровня в случае большой ошибки по частоте. Для получения алгоритма, менее чувствительного к отклонению частоты, строят трёхимпульсный алгоритм, который называют алгоритмом с нулевой вибрацией и производной (zero vibration and derivative, ZVD). Решение для UM-ZV-алгоритма является достаточно сложным. Решения для систем с большим коэффициентом демпфирования приводятся в [83].

Фильтры класса ZV-Shaper обеспечивают эффективное подавление колебаний при вариации параметров объекта управления, но обладают пониженным быстродействием. Фильтр UM-ZV-Shaper (unity-magnitude zero-

vibration, UM-ZV) повышает быстродействие, но снижает эффективность подавления колебаний.

Shaper-алгоритмы или фильтры формирования управляющего воздействия применяются в системах управления для подавления колебаний и достижения нулевой вибрации во время переходных процессов системы. Амплитуда этих вибраций будет зависеть от амплитуды начального возмущения. Чтобы свести к нулю вибрацию, необходимо произвести второе возмущение ровно через 180 градусов по фазе от первого. Данная концепция формирования управляющего воздействия показана на рисунке 1.5, где два возмущения приблизительно выражаются импульсами A_1 и A_2 [89,94].

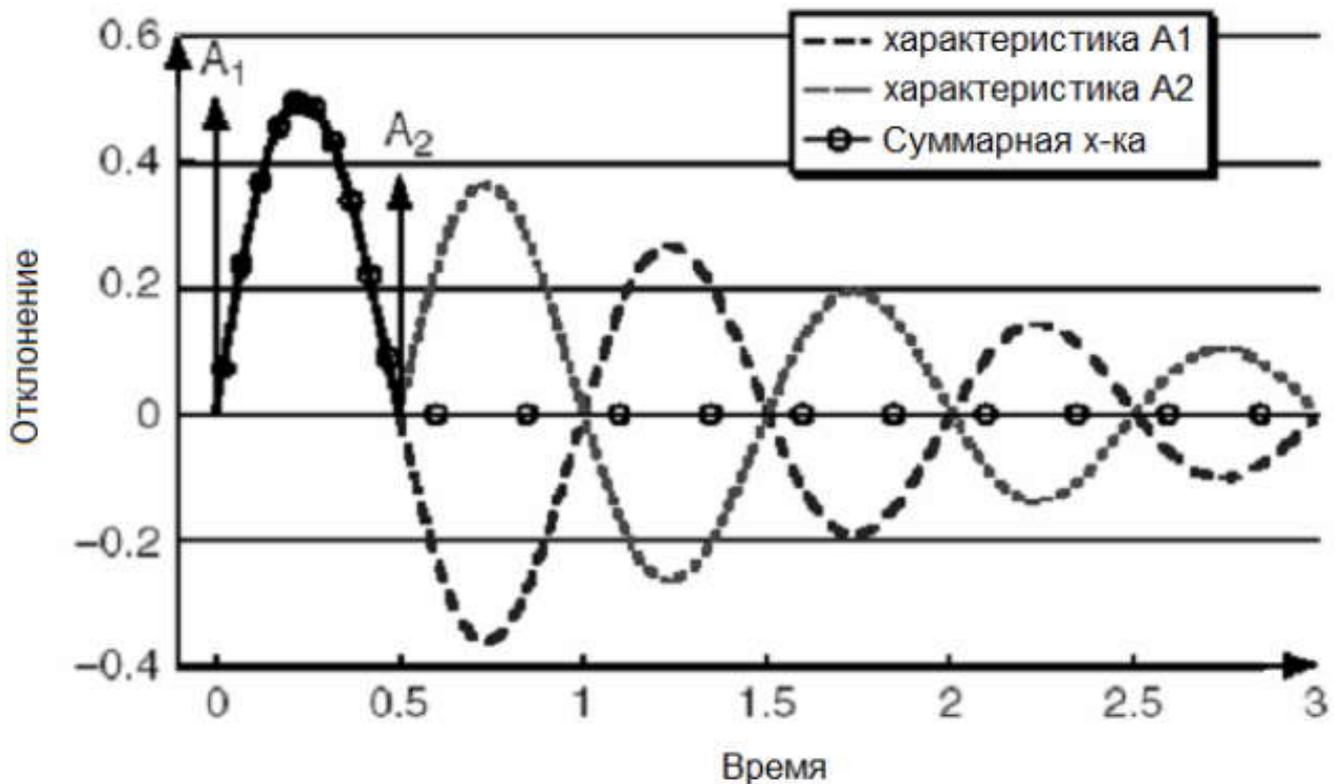


Рисунок 1.5 – Применение двух импульсов для обнуления вибрации объекта

Shaping-фильтры рассчитаны путём определения оптимального времени и амплитуды каждого импульса для достижения поставленной цели (т.е. нулевой вибрации, скорости, устойчивости и т.д.). ZV-shaper – это простейший алгоритм преобразования управляющего воздействия, включающий в себя только два импульса, разделённые во времени на половину собственной частоты системы. Существует множество вариаций данного фильтра, включая и UM-ZV-Shaper [88].

Он оптимизирован по скорости и позволяет сформировать сигнал быстрее, чем сигналы от других фильтров. Алгоритм UM-ZV представлен на рисунке 1.6.

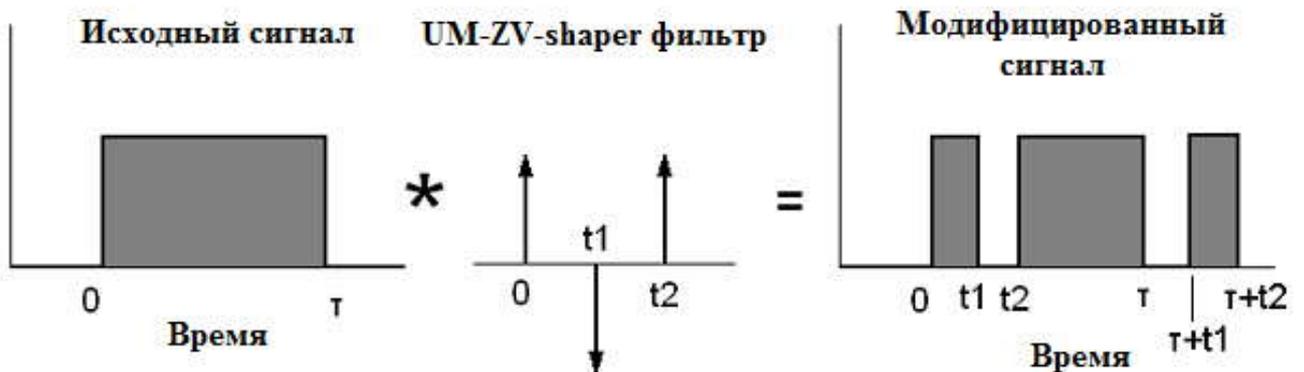


Рисунок 1.6 – Алгоритм UM-ZV-shaper-фильтра

Большинство существующих Shaping-фильтров работают с допущением, что времена замедлений и ускорений в переходных процессах систем равны. В них не учитывается возможность появления нелинейностей, вызванных трением в объекте и его динамическими характеристиками. В результате это приводит к снижению эффективности подавления вибраций.

Главным недостатком данного подхода является невозможность совмещения в одном фильтре высокой эффективности для нелинейных и линейных участков передаточной характеристики регулируемого процесса и статичность коэффициентов корректирующих воздействий, что сужает область применения до predetermined состояний объекта управления. Вторым недостатком является то, что один и тот же фильтр не способен обеспечивать одновременно высокую скорость передаточных характеристик объекта и одновременное эффективное подавление колебаний, что приводит к необходимости одновременного применения нескольких фильтров для различных состояний объекта, причём определение того или иного состояния необходимо производить в автоматическом режиме при помощи дополнительного вычислительного оборудования.

Искусственные нейронные сети (ИНС), представляют собой технологию, объединяющую множество дисциплин: нейрофизиологию, математику, статистику, физику, компьютерные науки и технику. Они находят своё

применение областях моделирования, анализа временных рядов, распознавания образов, обработки сигналов и управления, благодаря способности обучаться на основе данных при участии учителя или без его вмешательства [39,72,74,75,79].

Нейронная сеть – это громадный распределённый параллельный процессор, состоящий из элементарных единиц обработки информации, накапливающих экспериментальные знания и предоставляющих их для последующей обработки, пример такой сети представлен на рисунке 1.7.

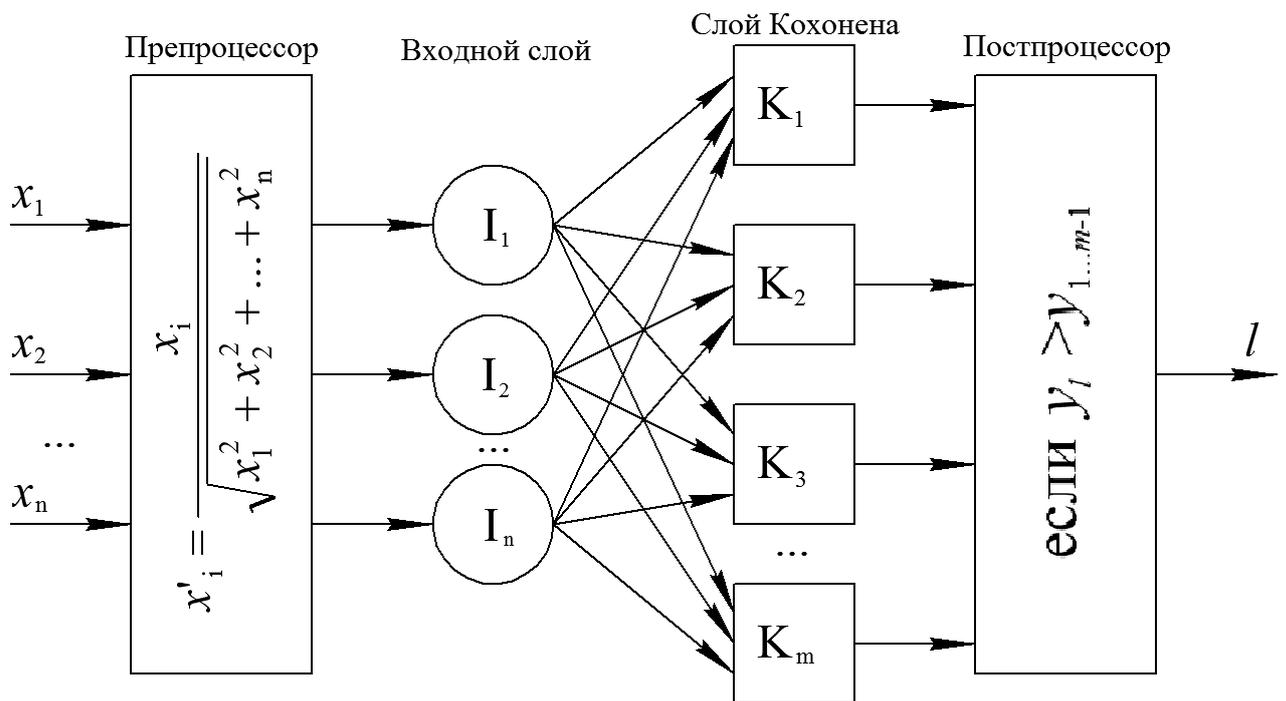


Рисунок 1.7 – Пример искусственной нейронной сети. Схема структурная

Совершенно очевидно, что свою силу нейронные сети черпают, во-первых, из распараллеливания обработки информации и, во-вторых, из способности самообучаться, т.е. создавать обобщения. Под термином обобщение понимается способность получать обоснованный результат на основании данных, которые не встречались в процессе обучения. Эти свойства позволяют нейронным сетям решать сложные (масштабные) задачи, которые на сегодняшний день считаются трудноразрешимыми. Однако на практике при автономной работе нейронные сети не могут обеспечить готовые решения. Их необходимо интегрировать в сложные

системы. В частности, комплексную задачу можно разбить на последовательность относительно простых, часть из которых может решаться нейронными сетями [58].

С позиций нейронной сети используется следующее определение понятия “обучения”:

Обучение – это процесс, в котором свободные параметры нейронной сети настраиваются посредством моделирования среды, в которую эта сеть встроена. Тип обучения определяется способом подстройки этих параметров.

Это определение процесса обучения предполагает следующую последовательность событий:

- 1) в нейронную сеть поступают стимулы из внешней среды;
- 2) в результате этого изменяются свободные параметры нейронной сети;
- 3) после изменения внутренней структуры нейронная сеть отвечает на возбуждения уже иным образом.

Вышеуказанный список четких правил решения проблемы обучения называется алгоритмом обучения. Несложно догадаться, что не существует универсального алгоритма обучения, подходящего для всех архитектур нейронных сетей. Существует лишь набор средств, представленный множеством алгоритмов обучения, каждый из которых имеет свои достоинства. Алгоритмы обучения отличаются друг от друга способом настройки синаптических весов нейронов.

Многослойный персептрон, обучаемый согласно алгоритму обратного распространения, можно рассматривать как практический механизм реализации нелинейного отображения “вход-выход” общего вида.

Теорема об универсальной аппроксимации, обосновывающая минимальное количество скрытых слоёв многослойного персептрона, обеспечивающего аппроксимацию некоторого непрерывного отображения, является теоремой существования, т.е. математическим доказательством возможности аппроксимации любой непрерывной функции [90]. Тем не менее из теоремы не следует, что один скрытый слой является оптимальным в смысле времени

обучения, простоты реализации и, что более важно, качества обобщения, но для первого этапа моделирования этого достаточно.

Основной сложностью в применении сетей является то, что по процессу определения большинства выбираемых и настраиваемых параметров системы (тип сети, способ обучения, число слоёв, алгоритм преобработки данных) не существует конкретных и чётких правил. Основной упор делается на опыт исследователя в области применения и работе с ИНС.

На основании результатов исследования различных методик синтеза автоматизированного управления с применением новых информационных подходов в системах управления быстроходных гусеничных машин для повышения быстроходности и управляемости в процессе прямолинейного движения и поворота был сформулирован круг задач, которые возможно реализовать на базе шапер-фильтров и искусственных нейронных сетей[45,87]:

1) создание математической модели, учитывающей нелинейности реальной системы, с применением существующих экспериментальных данных;

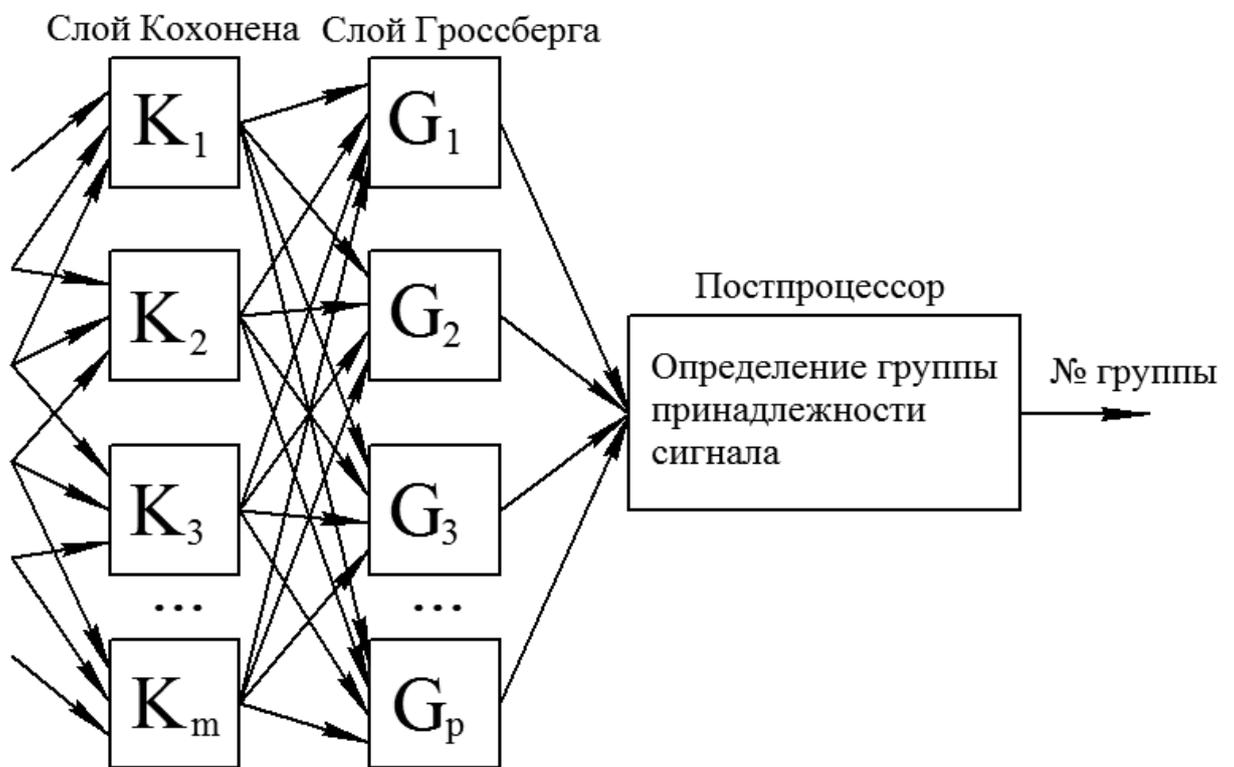


Рисунок 1.8 – Пример нейросети классификации входных данных на группы сигналов

2) разработка блока идентификации, предназначенного для определения управляемости БГМ и типа задающего воздействия на основе двухслойных сетей классификации Кохонена–Гроссберга (рисунок 1.8);

3) реализация регулятора на базе фильтрации задающих воздействий, способного корректировать свои коэффициенты в соответствии с изменяющимися характеристиками БГМ и условиями внешней среды за счёт нейросетевых обратных связей, повышающего свою эффективность в процессе применения.

1.4 Задачи исследования

Для создания метода более точной оценки скоростных качеств проектируемых и модернизируемых машин, решения обратной задачи – их повышения решаются следующие поставленные в диссертации задачи:

– теоретическое исследование динамики управляемого движения гусеничной машины;

– экспериментальное исследование динамики управляемого движения гусеничной машины, определение параметров переходных процессов и фазово-частотных характеристик системы;

– обобщение результатов исследования и разработка метода прогнозирования подвижности быстроходных гусеничных машин при управлении поворотом по динамическим свойствам системы.

Решение этих задач позволило дополнить существующие методы прогнозирования скоростных качеств быстроходных гусеничных машин, а также обосновать пути повышения подвижности.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

В данном разделе рассматривается общая структурная схема гусеничной машины 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.

2.1 Математическая модель плоскопараллельного движения транспортной машины в горизонтальной плоскости

Вопросам моделирования в теории движения машин традиционно уделяется много внимания. Процесс развития теории движения основан на учете новых экспериментальных данных. Структура и вид математической модели управляемого движения гусеничной машины определяется предпосылками и допущениями, принимаемыми при построении расчетной схемы. Расчетная схема плоско-параллельного движения строится в соответствии с работами Л.В. Сергеева [69], А.А. Благонравова [6], В.И. Красненькова [16], О.Н. Брилёва, Е.Е. Александрова [2] и отраслевыми материалами. 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 [6], В.Б. Держанского [32] и развитая в работах И.А. Тараторкина [73]. Математическая модель строится в соответствии с расчетной схемой в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих движение в проекциях на оси, подвижной системы декартовых или натуральных координат.

Математическое описание движения машины рассматривается в подвижной прямоугольной декартовой системе координат, начало которой совмещено с центром масс в положении статического равновесия, а оси совпадают с осями симметрии машины.

Исследование динамики управляемого движения быстроходной гусеничной машины ведется на основе математической модели движения, приведенной в работе [6], которая в наибольшей степени соответствует цели настоящего исследования. Отличие модели от известных заключается в рассмотрении правых частей дифференциальных уравнений, которые описывают управляющие воздействия водителя на управляемые координаты $\dot{V}, \dot{\omega}$, т.е. моделируется управляемое движение машины. Модель позволяет учесть динамические качества тягового двигателя, бесступенчатых передач в трансмиссии, затрат мощности гусеничного движителя, юз и буксование гусениц, динамику системы управления движением и водителя как звена обратной связи замкнутой системы или регулятора. Модель существенно дополнена новыми результатами теоретических и экспериментальных исследований динамики управляемого движения.

При анализе динамики системы в соответствии с расчетная схемой, представленной на рисунке 2.1, движение гусеничной машины как сплошного твердого тела с неголономными связями, рассматривается по пяти координатам движения центра масс: вдоль осей x, y , вокруг оси z , а так же вращения ведущих колес ω_1, ω_2 .

Рассматривается общий случай неустановившегося плоско-параллельного движения машины с длиной опорной поверхности L и шириной колеи B как сплошного твердого тела массой m и моментом инерции вокруг вертикальной оси J_z на горизонтальной плоскости XOY . Основные параметры управляемого движения: продольная скорость V , кривизна траектории K , угловая скорость $\dot{\psi}$ и курсовой угол ψ – определяются на основе уравнений движения машины в подвижной системе координат, начало которой совмещено с центром масс машины.

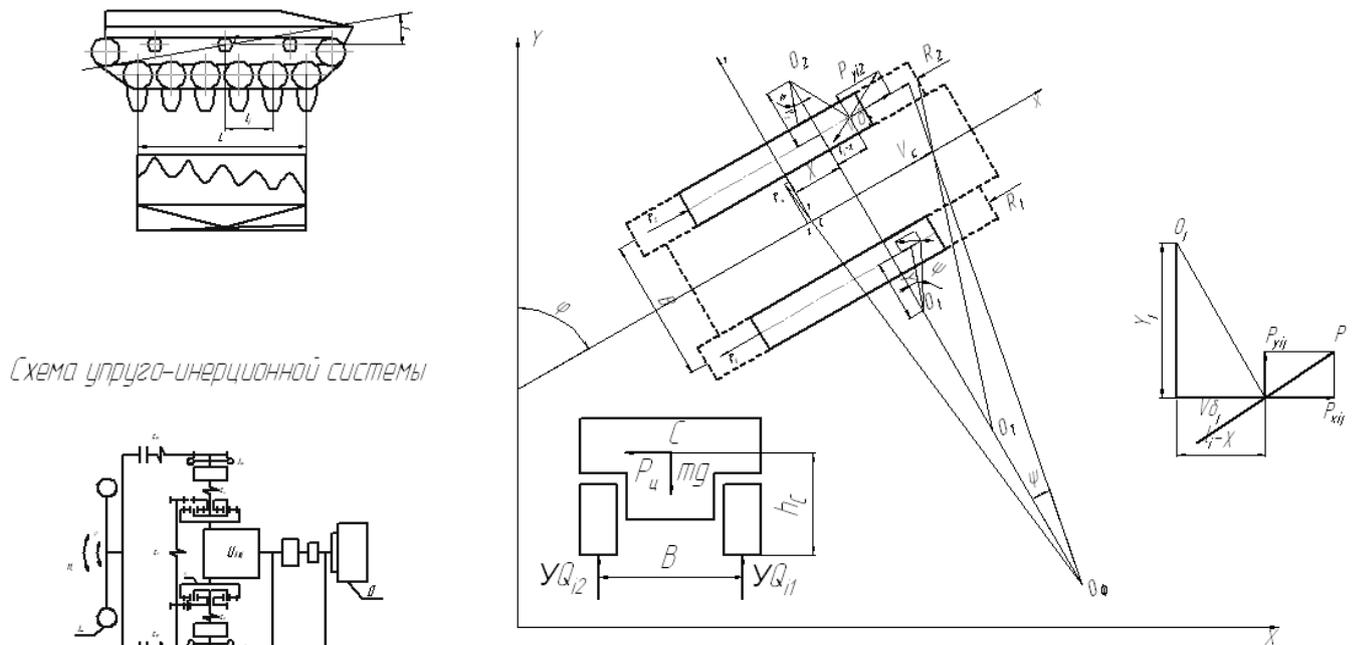


Рисунок 2.1 – Расчетная схема движения машины

Поворот машины происходит с теоретическим радиусом R_T вокруг центра O_T в соответствии с управляющими действиями водителя. При юзе отстающей гусеницы 1 и буксовании забегающей 2 происходит поперечное смещение полюсов их вращения на величину y_1 и y_2 . Мгновенные центры вращения опорных ветвей гусениц O_1 и O_2 и корпуса O_T находятся на одном перпендикуляре к продольной оси машины. Перпендикуляр смещен относительно центра масс машины C из-за действия центробежной силы $P_{ц}$ на величину χ . Вследствие юза и буксования гусениц поворот корпуса происходит с фактическим радиусом R_{Φ} вокруг центра O_{Φ} с угловой скоростью ψ , которая отличается от теоретической, определяемой управляющими воздействиями. Юз и буксование обуславливают неголономность связи гусениц с грунтом. Из подобия треугольников – планов скоростей в расчетной схеме – устанавливается соотношение между фактическим радиусом поворота и теоретическим:

$$R_{\Phi} = R_T(B + y_1 + y_2)/B, \quad (2.1)$$

Если неголономные связи гусениц с грунтом выразить через кинематические введением поперечного смещения полюсов вращения, можно установить связь теоретических скоростей движения гусениц с фактическими (рисунок 2.1 справа):

$$\begin{aligned} V_1 &= \omega_1 r_{BK} = V_c - (0,5B + y_1) \dot{\psi} \\ V_2 &= \omega_2 r_{BK} = V_c + (0,5B + y_2) \dot{\psi} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Продифференцировав эти равенства по времени, разрешив относительно угловых ускорений ведущих колес и выполнив соответствующие преобразования [6], последние три уравнения вращательного движения системы [21] приводят к одному, что упрощает исследование, а система уравнений движения приводится к виду:

$$\begin{aligned} \dot{V}_x &= \delta_x^{-1} g(f_\delta(V_c, \alpha_{um}) - f_c) - V_y \dot{\psi} \\ \dot{V}_y &= V_x \dot{\psi} - \frac{\dot{\psi}}{m V_x} \sum_{i=1}^n C_{yi} l_i - \frac{\Theta_c \sum_{i=1}^n C_{yi}}{m} \\ I_z \left(1 + \frac{B(y_1 + y_2 + B) I_\Gamma}{2r_{BK}^2 I_z}\right) \ddot{\psi} &= M_n(\omega_\delta, \alpha_{um}) - M_c - 0,5B(R_2 + R_1) \end{aligned} \quad (2.3)$$

где V_x , V_y – продольная и поперечная поступательные скорости и их производные,

$\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}$ – курсовой угол и его производные,

I_z – момент инерции машины вокруг вертикальной оси,

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,

M_Π – поворачивающий момент,

δ_x – коэффициент приращения масс при вращательном движении,

$g(f_\delta - f_c)$ – продольное ускорение и замедление,

m – масса быстроходной гусеничной машины,

Θ_c – угол бокового увода,

I_Γ – момент инерции гусеничного движителя,

B – ширина колеи машины,

y_1, y_2 – поперечные смещения полюсов вращения отстающей и забегающей гусениц,

$r_{\text{вк}}$ – радиус ведущего колеса,

M_C – момент сопротивления повороту,

R_1, R_2 – силы сопротивления поступательному движению.

В дифференциальное уравнение системы (2.3) – машины как сплошного твердого тела входят силовые и кинематические параметры, создаваемые двигателем и трансмиссией, зависящие от управляющих действий, а так же силы и моменты сопротивления грунта (внешние) и внутреннего сопротивления, определяемые затратами энергии в трансмиссии и в гусеничном движителе. Величины этих параметров определяются на основе соответствующих моделей

В данной модели сопротивления независимо от типа грунта определяются по формуле

$$M_C = \frac{\mu mgL}{4} \left(1 - \left(\frac{2\chi}{L} \right)^2 \right). \quad (2.4)$$

При движении по деформируемому грунту коэффициент сопротивления повороту μ определяется по формуле А.О. Никитина, для машин с отношением длины опорной поверхности к ширине колеи больше двух – по данным Б.М. Позина [63]. При движении машины по недеформируемому основанию – по экспоненциальной зависимости, аппроксимирующей экспериментальные данные А.А. Благоднарова. То есть при движении по деформируемому грунту

$\mu = \frac{\mu_{\text{max}}}{0.925 + 0.15R/B}$, по недеформируемому основанию
 $\mu = \mu_y (1 - \exp(-K/K_0))$, где K_0 – кривизна, при которой момент сил трения равен моменту сил бокового увода.

Следует отметить, что в работах японских исследователей также принята экспоненциальная зависимость коэффициента сопротивления повороту от кривизны, установленная экспериментально [84, 85, 86].

При движении с большой скоростью кривизна траектории не может быть большой, и момент сопротивления повороту с достаточной точностью определяется линейной зависимостью $M_C = \Theta_C \sum_{i=1}^n C_i l_i + K \sum_{i=1}^n C_i (l_i - \chi) l_i$.

При учете упругих, инерционных и динамических (передаточных) свойств системы управления поворотом (рисунок 2.1 слева) третье уравнение системы 2.3 – определяющее вращательное движение, существенно уточняется.

Качество переходных процессов движения во многом определяется податливостью деталей. Полнота учёта податливостей определяется решаемой задачей. В ряде работ показано, что податливость отдельных элементов трансмиссии существенно влияет на характер колебаний, которые носят высокочастотный характер, и на процесс движения машины не влияет. Податливость каждого элемента вносит дополнительную степень свободы, что увеличивает порядок дифференциального уравнения. Во избежание громоздких математических моделей учитывается податливость элементов, упругие деформации которых существенно влияют на величину потенциальной энергии системы, соответственно и на характер движения. В расчётной схеме (рисунок 2.1) учитывается линейная продольная жёсткость рабочих ветвей гусениц забегающего борта $C_{Г2}$ и отстающего $C_{Г1}$, угловая валов C_1 и C_2 , соединяющих суммирующие ряды с бортовыми редукторами, а также угловая жёсткость C_B вала дифференциального механизма. Упругость указанных элементов приводится к ведущим колёсам и характеризуется так называемой приведённой жёсткостью:

$$C_{PP} = \left(\sum_K C_K \right)^{-1}. \quad (2.5)$$

Приведенная к ведущему колесу отстающего и забегающего бортов угловая жесткость составляет:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_{PP1}} &= \frac{1}{C_{Г1} r_{BK}^2} + \frac{1}{U_{BP}^2 C_2}; \\ \frac{1}{C_{PP2}} &= \frac{1}{C_{Г2} r_{BK}^2} + \frac{U_{BP}^2}{C_2} + \frac{(U_{BP} U_{MC} (1 + K))^2}{C_B}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Без учёта податливости системы подрессоривания корпуса и геометрии гусеничного обвода, приведенная к ведущим колесам жесткость гусениц и валов трансмиссии, соединяющих ведущие колеса с гидромотором определяется по уравнению:

$$C_M = \frac{C_{PP1} C_{PP2} B}{(C_{PP1} + C_{PP2}) r_{\text{вк}}^2 K_R}, \quad (2.7)$$

где $C_{PP1,2}$ – приведённая к ведущему колесу отстающего и забегающего бортов угловая жёсткость,

K_R – коэффициент, учитывающий юз и буксование гусениц, $K_R = \frac{B + y_1 + y_2}{B}$.

В расчетной схеме учитываются также инерционность двигателя и деталей гусеничных движителей в виде моментов инерции $I_d, I_{Г1}, I_{Г2}$.

Взаимодействие гусеничных движителей с машиной осуществляется через неголономные связи, определяемые буксованием гусениц, которые на расчетной схеме показаны в виде фрикционных устройств, каждое из которых вносит дополнительную степень свободы. Как показано выше, эти связи могут быть описаны кинематическими через поперечное смещение полюсов поворота.

Свойства машины, совершающей вращательное движение с угловой скоростью $\dot{\psi}$ и преодолевающей момент сопротивления повороту M_C , моделируются моментом инерции $I_{ГМ}$.

Момент сопротивления повороту определяется силами внешнего сопротивления, а также затратами в гусеничном движителе. Первая составляющая – момент сопротивления внешних сил в общем случае формируется взаимодействием гусениц с грунтом и инерционностью машины и зависит от свойств грунта, кривизны траектории и скорости движения [6, 34, 69]. Момент сопротивления повороту формируется боковыми силами и во многом определяет управляемость и устойчивость движения. В связи с этим все более широкое развитие получают методы расчёта, основанные на математическом описании процесса взаимодействия опорных поверхностей гусениц с грунтом [49] с привлечением математической теории упругости, которая справедлива для любого

линейно–деформируемого тела. Для определения боковых сил на мгновенных площадках контакта гусениц с грунтом необходимо решать систему интегральных уравнений, которые при грубых допущениях и при неучёте многих факторов, влияющих на распределение нагрузки приводят к сингулярным уравнениям. При установлении конечной зависимости между нагрузкой в контакте с величиной сдвиговых и контактных напряжений (деформаций) сингулярность уравнений ограничивается, они приводятся к линейным уравнениям Фредгольма 1 рода. Такие уравнения являются некорректно поставленной задачей, т.к. малые возмущения параметров могут привести к существенным изменениям распределения деформаций. В отдельных случаях решение может быть осуществлено методом регуляций при известных вертикальных силах. При движении машины с большой скоростью по бетонной дороге эпюра вертикальных сил во многом формируется вибронагруженностью опорных катков, что связано со звенчатостью гусеницы. Многими экспериментами установлено, что вертикальные ускорения опорных катков увеличиваются с ростом скорости. В спектре ускорений доминирует траковая частота ($f_{TP} = V/L_{TP}$) и частоты кратные ей. Кроме узкополосных, вертикальные ускорения содержат и широкополосную составляющую, т.е. "фоновый" уровень спектра, вызванную непрерывными соударениями катков и беговой дорожки в процессе движения.

Эластичность шин опорных катков, податливость упругих элементов подвески создают дополнительные степени свободы. При движении машины с большой скоростью вертикальные перемещения опорных катков, обладающих определённым моментом инерции, могут привести к прецессии, т.е. вследствие действия гироскопического момента вертикальные колебания опорных катков могут привести к колебаниям в горизонтальной плоскости.

Сложность и нестабильность процесса формирования боковых сил делает маловероятным установление аналитических зависимостей. В связи с этим момент сопротивления повороту определяется на основе использования экспериментальных данных.

Силы сопротивления движению машины в продольном направлении формируются сопротивлением грунта f_c , а также нагрузочными и скоростными затратами мощности в гусеничном движителе. Нагрузочные затраты мощности определяются КПД зацепления гусеницы с ведущим колесом η_r , и для современных конструкций $\eta_r = 0.92...0.95$. Скоростные затраты мощности являются суммой затрат на перематывание гусениц и на качение опорных катков по беговой дорожке. Затраты мощности на перематывание гусениц зависят от параметров конструкции и состояния ходовой части, а также от скорости движения.

Компьютерное моделирование процесса вращения БГМ вокруг вертикальной оси

Для исследования автоматизированного регулирования процесса движения БГМ в программе MATLAB производилось построение модели объекта, разработанной на кафедре гусеничных машин и прикладной механики ФГБОУ ВПО «Курганский государственный университет» (рисунок 2.1).

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:

$$I_z \cdot \ddot{\phi} + \frac{\dot{\phi}}{v} \cdot \sum_{i=1}^n C_{yi} \cdot l_i^2 + 0.5 \cdot C_{ПП} \cdot \phi = M_{II}, \quad (2.8)$$

где I_{zPP} – приведенный момент инерции машины вокруг вертикальной оси,
 $\phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi}$ – 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 [78] системы приведена на рисунке 2.2 и, помимо зависимостей, определённых в дифференциальном уравнении, включает в себя блок задающих воздействий, индикатор реакции системы, элементы обратной связи и автоматизированного управления.

При моделировании учтено, что параметры системы $I_{\text{ЗПР}}$, C_{yi} , V варьируются в широких пределах. Их влияние на качество переходных процессов модели показано ниже. Компьютерная математическая модель динамики управляемого движения, отличается введением не учитываемой ранее вариации параметров конструкции, определяющих собственную частоту системы, её демпфирующие свойства, а также существенные нелинейности в системе управления движением и формирующих обратную связь – в этом заключается научная новизна модели.

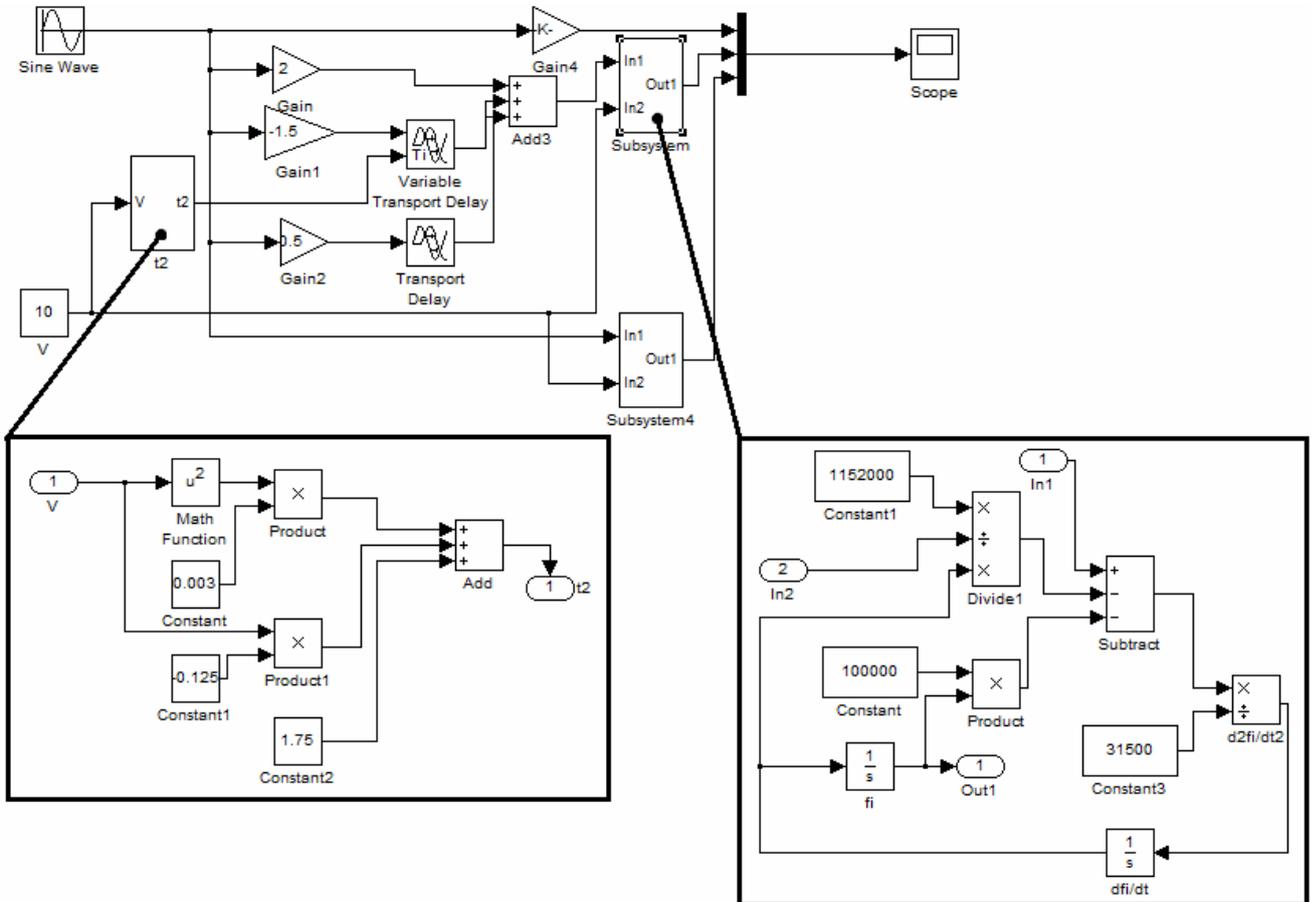
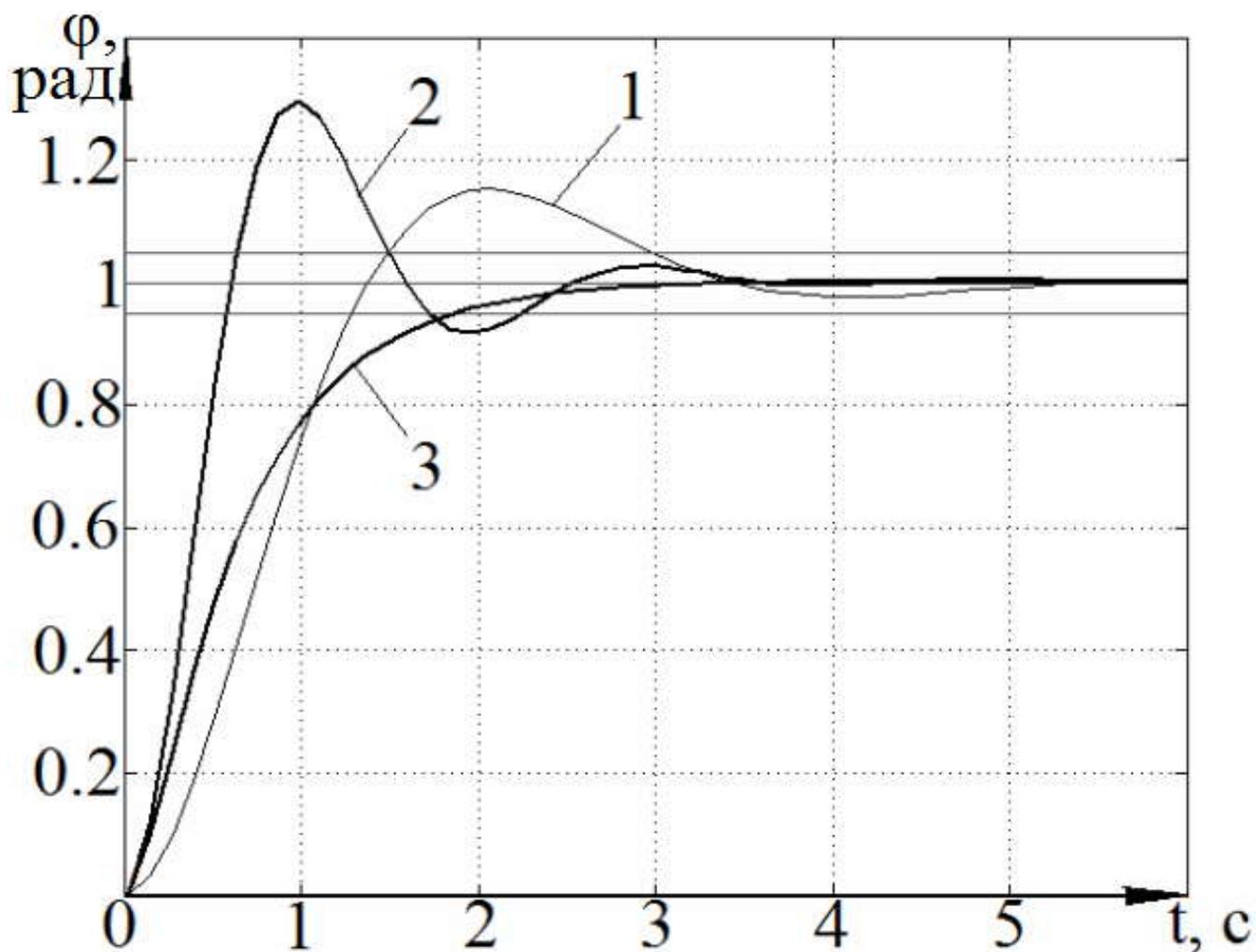


Рисунок 2.2 – Компьютерная модель вращательного движения БГМ

Для дальнейших исследований были рассчитаны и построены модели ПД- и ПИД-регуляторов по методике Циглера–Никольса на наибольшее быстродействие и – наименьшее перерегулирование. Сравнение эффективности применения этих регуляторов с исходной системой было осуществлено путём оценки реакции модели на единичное задающее воздействие (рисунок 2.3).



1 – исходная СУ, 2 – ПД-регулятор, 3 – ПИД-регулятор

Рисунок 2.3 – Реакция на единичное воздействие системы управления (СУ) с различными регуляторами

Как видно из результатов моделирования, применение регуляторов, рассчитанных для систем со статично заданными параметрами, даёт определённый прирост эффективности управления.

Моделирование характерных нелинейностей и динамически изменяющихся в процессе движения параметров

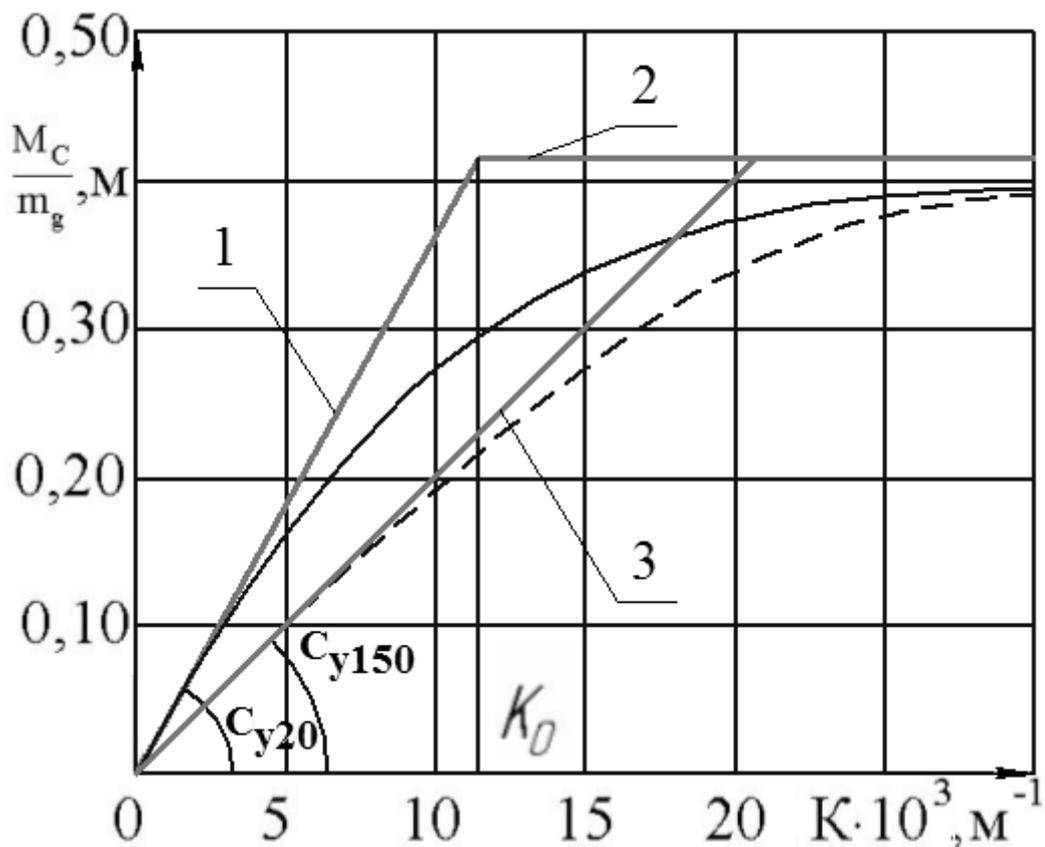
Результаты исследований в области оценки влияния динамических параметров БГМ на процессы движения, а также возможности компьютерного моделирования, позволяют учесть воздействие характерных нелинейностей и изменений характеристик транспортной машины на эффективность автоматизированной системы управления.

Программная среда проведения моделирования позволяет реализовать и учесть нелинейности, присущие реальному объекту. Это возможно осуществить путём применения блоков характерных нелинейностей – зоны нечувствительности, насыщения, сухих и вязких трений, зазоров и ограничений скорости и величины ускорений. Также применение чистых запаздываний позволит более адекватно оценить эффективность применения обратной связи, время переходных процессов объекта и перерегулирования. Варианты применения характерных нелинейностей, использованных в процессе моделирования движения БГМ, приведены далее.

Особенность рассматриваемой модели (2.3) 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. Как показали эксперименты [31], движение машины по ровной дороге с малодеформируемым основанием (бетон, скальный, 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. Колебания опорных катков приводят к периодическому изменению нормальной нагрузки вплоть до отрыва катков от опорной поверхности гусеницы. Недостаток нагрузки,

как и перегрузка, приводит к вариации коэффициента увода C_y и смещению машины в боковом направлении [19].

Другой эксплуатационный фактор, дестабилизирующий расчётное значение C_y , – существенное изменение температуры шин. Нагрев шин в следствие выделения теплоты от внутреннего трения при упругой деформации зависит от размера шин, свойств упругих материалов, характера крепления к бандажу, а также напряжённости их работы – давления в контакте и скорости. В существующей теории движения гусеничных машин учёту зависимости коэффициента увода от температуры не уделяется должного внимания. Однако, температурный фактор, перегрев шин, существенно влияют на устойчивость движения. Повышение температурного режима шин опорных катков многократно повышает их эластичность, что снижает коэффициент увода и ограничивает скорость машины по устойчивости (рисунок 2.4) [82].



1 – момент сил бокового увода; 2 – момент сил трения; 3 – характеристика при критической температуре

Рисунок 2.4 – Влияние температуры шин опорных катков на значение коэффициентов сопротивления боковому уводу

Одним из основных параметров транспортной машины является её масса. При расчёте регуляторов и построении моделей БГМ, масса определяется как постоянная, однако фактически она изменяется в процессе движения (таблица 2.1). В рассматриваемой модели плоскопараллельного движения масса оказывает влияние на параметры через момент инерции вокруг вертикальной оси – I_z .

В процессе выполнения боевых задач масса транспортной машины может изменяться на величину до 30% от исходной, что оказывает значительное влияние на процессы регулирования автоматизированного управления движением. Учёт динамики изменения данного параметра возможен при помощи уже установленной аппаратуры (датчик запаса топлива, боезапаса), а также установки дополнительных датчиков наличия десанта на борту машины. Полученную информацию можно передавать на бортовой вычислительный компьютер и применять при расчёте динамических характеристик используемых регуляторов.

Таблица 2.1 – Колебания массы БГМ

Наименование массовой составляющей	Диапазон изменения, кг
Быстроходная гусеничная машина	14 000
Боекомплект	0 – 2 000
Топливо	0 – 1500
Десант	0 – 840
Итого	14 000 – 18 340

Ещё одним фактором, оказывающим значительное влияние на процессы плоскопараллельного вращения вокруг вертикальной оси, является линейная скорость быстроходной гусеничной машины. При первичных расчётах регуляторов с применением новых информационных подходов она принимается равной 20 м/с. Однако, на практике, необходимо применять системы корректировки задающих воздействий водителя уже начиная со скорости машины равной 10 м/с. Помимо этого поступательная скорость входит в уравнение, на основе которого построена компьютерная модель движения – это значит, что её изменение приведёт к изменениям в расчётах значений коэффициентов любых классических регуляторов. Следовательно, при создании новой

автоматизированной системы управления движением БГМ необходимо учитывать влияние данного параметра при моделировании и в экспериментах. Существующее применяемое в транспортных машинах оборудование – G-сенсор позволяет считывать скорость движения, продольные и поперечные ускорения, что позволит учитывать их при динамических расчётах параметров регулирования.

2.2 Синтез автоматизированного управления на основе перераспределения во времени управляющих силовых воздействий

Shaper-алгоритмы в системах автоматизированного управления и особенности их применения

Для повышения степени реализации потенциальных скоростных качеств машины предлагается ввести в систему управления преобразователь задающих воздействий, организованный так, что действия водителя, направленные на изменение курса, не будут вызывать колебаний корпуса в горизонтальной плоскости, что приведёт к повышению динамики и управляемости гусеничной машины. Предлагаемое решение возможно осуществить с помощью Shaping-алгоритмов. С их применением строится разомкнутая система управления - фильтр, которая обеспечивает компенсацию колебаний БГМ путём корректировки задающих воздействий. Такой подход является новым в теории автоматизированного управления процессом движения транспортных машин.

В последнее время для систем, у которых управляемые параметры трудноизмеряемы или зашумлены, разрабатываются Shaping-алгоритмы управления. Одним из их важных преимуществ является простота их настройки, реализации в микропроцессорных системах и системах управления на основе программируемых логических контроллеров.

Принцип работы Shaping-алгоритмов заключается в преобразовании задающих управляющих воздействий сигналов путём их свёртки с последовательностью импульсов в виде дельта-функции Дирака[80]:

$$1(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - t_0) dt \quad (2.9)$$

Эффективность алгоритма определяется количеством импульсов, их длительностью и амплитудой. Суммарное задающее воздействие на объект остаётся равным исходному, но перераспределяется во времени (2.10) (рисунок 2.5). За счёт относительного увеличения переходных процессов системы обеспечивается компенсация колебаний, а сдвиг управляющего воздействия на половину периода собственных колебаний объекта управления обеспечивает в идеальном случае полное их подавление.

$$y(t) = \left[A \frac{\omega_0}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_0(t-t_0)} \right] \sin\left(\omega_0 \sqrt{1-\xi^2} (t-t_0)\right) \quad (2.10)$$

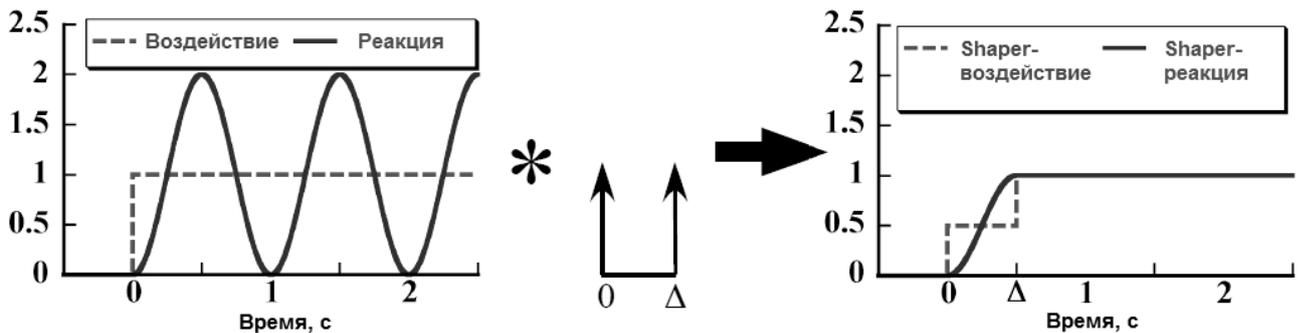


Рисунок 2.5 – Процесс преобразования задающего единичного воздействия

Основными показателями качества работы алгоритмов являются степень подавления колебаний и быстродействие системы. Оценка подавления определяется как отношение остаточных колебаний в системе с shaping-фильтром и остаточных колебаний – без преобразования входного сигнала. Задача повышения быстродействия, определяемого временем последнего импульса, обычно ограничивается максимально возможной амплитудой импульсов.

Двухимпульсный ZV-shaper или фильтр нулевой вибрации (zero-vibration) позволяет свести вибрации системы до нуля. Однако условием его работы является совпадение настроенной частоты с собственной частотой системы. В противном случае могут возникать остаточные колебания высокой амплитуды. Для преодоления данного ограничения применяется трёхимпульсный алгоритм

нулевой вибрации и нулевой амплитуды (zero-vibration and derivative, ZVD). Последовательно увеличивая число производных, равных нулю, можно увеличить робастность алгоритма, однако, это приводит к возрастанию времени его работы и числа создаваемых импульсов.

ZV и ZVD-алгоритмы относятся к классу позитивных (positive input shapers), в которых используются импульсы только одного знака [93]. К негативным фильтрам (negative input shapers), использующим импульсы различного знака, относится трёхимпульсный алгоритм нулевой вибрации и единичной амплитуды (unity-magnitude zero vibration, UM-ZV). UM-ZV-shaper является более быстрым в сравнении с ZV и ZVD-фильтрами [81,95]. Далее приведены выражения для вычисления значений алгоритмов[55].

ZV-shaper:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ \frac{1}{1+K} & \frac{K}{1+K} \\ 0 & 0.5T \end{bmatrix}; \quad (2.11)$$

ZVD-shaper:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2K & K^2 \\ \frac{1}{(1+K)^2} & \frac{2K}{(1+K)^2} & \frac{K^2}{(1+K)^2} \\ 0 & 0.5T & T \end{bmatrix}; \quad (2.12)$$

UM-ZV-shaper (малый коэффициент демпфирования):

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & T/6 & T/3 \end{bmatrix}; \quad (2.13)$$

$$K = \exp\left(\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right); \quad (2.14)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\xi^2}}; \quad (2.15)$$

где A_i – амплитуда i -ого импульса, t_i – время i -ого импульса, ω – частота колебаний, ξ – коэффициент демпфирования, T и K – введённые для упрощения записи коэффициенты.

Используя полученные данные об этом новом информационном подходе к проектированию автоматизированных систем, был произведён расчёт различных Shaper-алгоритмов с целью сравнения их эффективности между собой и с исходной системой управления БГМ.

Расчёт и анализ эффективности применения ZV- и ZVD-shaper-фильтров в процессе управления поворотом

Для расчёта значений коэффициентов фильтров уравнение вращательного движения (2.8) необходимо преобразовать в передаточную функцию. Модель объекта управления задана дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} \cdot I_z + \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n C_{yi} l_i^2}{V} + \varphi(t) \cdot 0.5C_{\text{ПР}} = M_{\text{П}}(t); \quad (2.16)$$

Введём оператор дифференцирования $p = d/dt$ и запишем уравнение (2.16) с производными задающих и управляемых воздействий по времени в операторной форме и формально вынесем за скобки общие части равенства:

$$M_{\text{П}}(t) = \varphi(t) \left(p^2 I_z + p \frac{C_{yi} l_i^2}{V} + 0.5C_{\text{ПР}} \right); \quad (2.17)$$

Теперь преобразуем выражение в передаточную функцию в форме переменной Лапласа:

$$W(p) = \frac{1}{I_z p^2 + \frac{\sum_{i=1}^n C_{yi} l_i^2}{V} p + 0.5C_{\text{ПР}}} \quad (2.18)$$

Для расчёта коэффициентов shaper-фильтров необходимо уравнение (2.18) привести к канонической форме. Для этого из передаточной функции за скобку выносится коэффициент при свободном члене $0.5C_{\text{ПР}}$. При введении численных

значений параметров, соответствующих объекту экспериментального исследования функция приводится к канонической форме:

$$W(p) = \frac{1}{0.315p^2 + 0.576p + 1} \quad (2.19)$$

Далее производится вычисление вспомогательных коэффициентов (2.14) (2.15):

$$K = e^{\frac{-0.513\pi}{\sqrt{1-0.513^2}}} = 0.153 \quad \text{и} \quad T = \frac{2\pi}{2\sqrt{1-0.513^2}} = 3.66$$

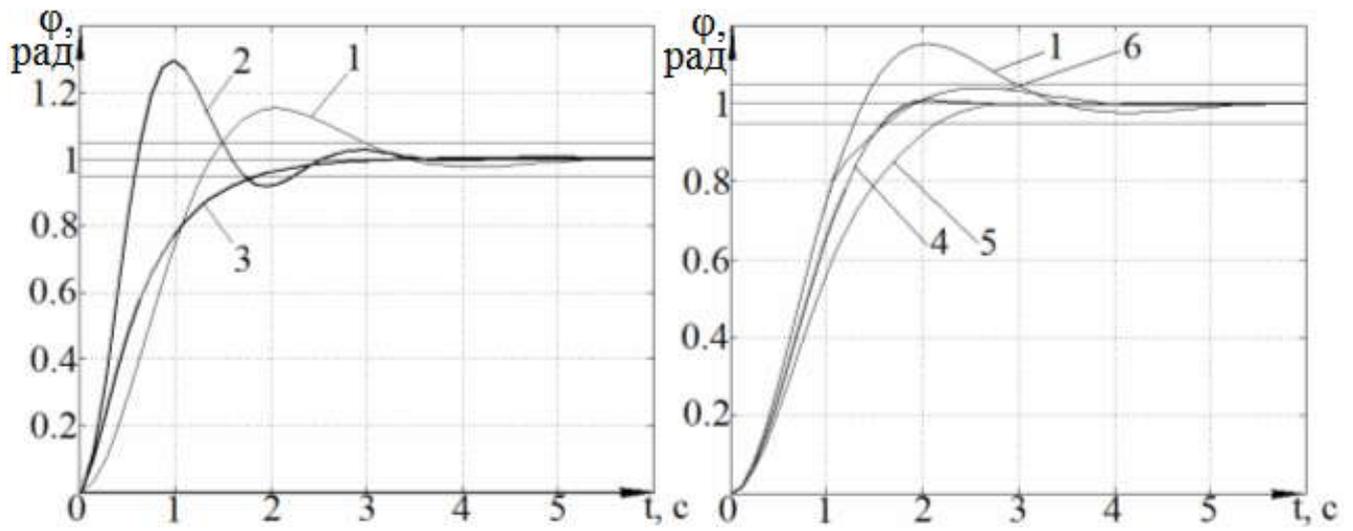
Результаты численных вычислений параметров различных фильтров в соответствии с формулами (2.11), (2.12), (2.13) приведены в таблице 1.

Таблица 2.2 – Значения коэффициентов shaping-фильтров

ZV	A_i	$\begin{bmatrix} 0.867 & 0.133 \end{bmatrix}$
	t_i	$\begin{bmatrix} 0 & 1.83 \end{bmatrix}$
ZVD	A_i	$\begin{bmatrix} 0.752 & 0.23 & 0.018 \end{bmatrix}$
	t_i	$\begin{bmatrix} 0 & 1.83 & 3.66 \end{bmatrix}$
UM-ZV	A_i	$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$
	t_i	$\begin{bmatrix} 0 & 0.61 & 1.22 \end{bmatrix}$

Полученные модели shaping-фильтров сравнивались с исходной системой, системой с ПД- и ПИД-регуляторами [40]. Для оценки их эффективности моделировалось единичное задающее воздействие и реакция модели БГМ на него (рисунок 2.6).

По результатам компьютерного моделирования была построена таблица 2.3 зависимостей характеристик переходного процесса, таких как время ($t_{\text{пн}}$, с) и перерегулирование (σ , %), от типа применяемого автоматизированного управления. Скорость движения была выбрана постоянной и равной 20 м/с.



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

Рисунок 2.6 – Реакция на единичное воздействие системы управления (СУ) с различными регуляторами

Таблица 2.3 – Характеристики переходных процессов различных фильтров и систем

Наименование системы управления	Время переходного процесса $t_{\text{пн}}$, с	Перерегулирование σ , %
Исходная система	3.0	17
ПД-регулятор	2.4	31
ПИД-регулятор	1.8	0
ZV-shaper фильтр	1.6	3
ZVD-shaper фильтр	2.1	0
UM-ZV-shaper фильтр	1.6	5

Из полученных результатов видно, что наименьшее время переходного процесса, равное 1.6 секундам, достигается при использовании ZV- и UM-ZV-shaper фильтров. Применение ПИД-регулятора, рассчитанного на уменьшение перерегулирования по методу Циглера-Никольса [96], или ZVD-shaper фильтра позволяет минимизировать до нуля перерегулирование. Для дальнейших исследований и применения был выбран ZV-shaper фильтр, так как он обладает

наилучшим сочетанием характеристик переходных процессов, среди всех полученных решений.

Недостатки аппарата фильтрации задающих воздействий для решения поставленных задач

При организации управления на основе корректировки (фильтрации) задающих воздействий основным недостатком является отсутствие обратной связи.

Существующий аппарат shaping-алгоритмов фильтрации позволяет с высокой степенью эффективности минимизировать колебания переходных процессов в системах, передаточные характеристики которых определяются параметрами – константами. Проведённые модельные эксперименты показали высокую степень влияния поступательной скорости БГМ на эффективность shaper-фильтров – при снижении скорости в два раза ($V = 10$ м/с) происходит увеличение времени переходных процессов в три и более раза. В связи с этим необходимо дальнейшее исследование возможностей применения аппарата фильтрации и создание дополнительных контрмер, повышающих робастность системы управления к изменениям параметров объекта.

Другим недостатком предлагаемого подхода является невозможность, в исходном виде, повышать динамику переходных процессов, и даже снижению её, так как задающее воздействие подаётся в систему не целиком, а по частям. Частично это преодолевается при помощи UM-ZV-shaper фильтра, который быстрее фильтров позитивного класса, однако, его применение приводит к увеличению перерегулирования. Анализ различных shaper-регуляторов показал, что они позволяют решать либо задачу повышения динамики, либо – минимизации перерегулирования, однако, в случае их применения для БГМ, необходимо совмещать эти свойства – в процессе поворота гусеничной машины важна высокая динамика, в то время как при движении по прямолинейной траектории – гашение возникающих колебаний.

Преодоление данных особенностей shaper-фильтров позволит повысить их универсальность и расширить возможности их применения в задачах повышения

степени реализации потенциальных скоростных качеств быстроходных гусеничных машин.

2.3 Алгоритм идентификации и отдельного регулирования различных типов движения БГМ с применением искусственных нейронных сетей

Аппарат искусственных нейронных сетей в автоматизированных системах управления

Искусственные нейронные сети (ИНС) – это технология в основе которой лежит множество дисциплин: нейрофизиология, математика, статистика, физика, компьютерные науки и техника. Они применяются в таких разнообразных областях, как моделирование, анализ временных рядов, распознавание образов, обработка сигналов и управление, благодаря одному важному свойству – способности обучаться на основе данных при участии учителя или без его вмешательства.

Нейронная сеть – это громадный распределённый процессор параллельного действия, состоящий из элементарных вычислительных единиц, накапливающих экспериментальные данные и предоставляющих их для последующих вычислений.

Ключевые отличия нейронных сетей происходят из распараллеливания обработки информации и способности самообучаться, т.е. создавать обобщения. Под термином «обобщение» понимается способность получать обоснованный результат на основании данных, которые не встречались в процессе обучения. Эти свойства позволяют нейронным сетям решать сложные (масштабные) задачи, которые на сегодняшний день считаются трудноразрешимыми. Однако на практике при автономной работе нейронные сети не могут обеспечить готовые решения. Их необходимо интегрировать в вычислительные системы. В частности, комплексную задачу можно разбить на последовательность относительно простых, часть из которых может решаться нейронными сетями.

В контексте работы полезными для применения свойствами нейронных сетей являются следующие[77]:

1) нелинейность. Искусственные нейроны могут быть линейными и нелинейными. Это даёт возможность строить нелинейные нейронные сети. Данная нелинейность обладает свойством распределения по всей сети. Такая особенность позволяет в процессе работы учесть факторы, формирующие входные сигналы, даже если они также обладают нелинейными характеристиками;

2) единообразие анализа и проектирования. Нейронные сети являются универсальным механизмом обработки информации. Это означает, что одно и то же проектное решение нейронной сети может использоваться во многих предметных областях. Это свойство проявляется несколькими способами.

- Нейроны в той или иной форме являются стандартными составными частями любой нейронной сети.

- Эта общность позволяет использовать одни и те же теории и алгоритмы обучения в различных нейросетевых приложениях.

- Модульные сети могут быть построены на основе интеграции целых модулей.

3) отображение входной информации в выходную. Одной из популярных парадигм обучения является обучение с учителем. Это подразумевает изменение синаптических весов на основе набора маркированных учебных примеров. Каждый пример состоит из входного сигнала и соответствующего ему желаемого отклика. Из обучающего множества случайным образом выбирается пример, а ИНС изменяет веса своих нейронов для минимизации ошибки между желаемым выходным сигналом и сигналом, формируемым сетью, в соответствии с выбранным статистическим критерием. При этом модифицируются свободные параметры нейросети. Примеры из обучающей выборки могут использоваться многократно в различных последовательностях. Обучение производится до тех пор, пока изменения синаптических весов не станут незначительными. Таким образом, нейронная сеть обучается на примерах, составляя таблицу соответствий вход-выход для конкретной задачи. Такой подход заставляет вспомнить непараметрическое статистическое обучение. Это направление статистики имеет дело с оценками, не связанными с какой-либо конкретной моделью, или, с

биологической точки зрения, с обучением с нуля. Здесь термин «непараметрический» используется для акцентирования того, что изначально не существует никакой предопределённой статистической модели входных данных.

4) очевидность ответа. При решении задач классификации входных векторов данных можно разработать нейросеть, обрабатывающую информацию не только для идентификации отдельного класса, но и для увеличения достоверности принимаемого решения. В результате эта информация может быть использована для избежания сомнительных решений, что повысит продуктивность процесса идентификации;

5) отказоустойчивость. Нейронные сети, облечённые в форму электроники, потенциально отказоустойчивы. Это значит, что при неблагоприятных условиях их производительность падает незначительно. Например, если повреждён какой-то нейрон или его связи, извлечение запомненной информации затрудняется. Однако, принимая в расчёт распределённый характер хранения информации в нейронной сети, можно утверждать, что только серьёзные повреждения структуры нейронной сети существенно повлияют на её работоспособность. Поэтому снижение качества работы нейронной сети происходит медленно. Незначительное повреждение структуры никогда не вызывает катастрофических последствий. Это – очевидное преимущество робастных вычислений, однако его часто не принимают в расчёт. Чтобы гарантировать отказоустойчивость работы нейронной сети, в алгоритмы обучения нужно закладывать соответствующие поправки.

6) адаптивность. Нейронные сети обладают способностью адаптировать свои синаптические веса к изменениям окружающей среды. В частности, нейронные сети, обученные действовать в определённой среде, могут быть легко переучены для работы в условиях незначительных колебаний параметров окружения. Расширенной версией данного подхода является решение для работы в нестационарной среде (где статистика изменяется с течением времени). Создаются нейронные сети, изменяющие свои параметры в реальном времени. Естественная для классификации образов, обработки сигналов и задач управления

архитектура нейронных сетей может быть объединена с их способностью к адаптации, что приведёт к созданию моделей адаптивной классификации образов, адаптивной обработки сигналов и адаптивного управления. Однако, чем выше адаптивные способности системы, тем более устойчивой будет её работа в нестационарной среде, но при повышении характеристик адаптивности, она может вызвать обратный эффект по отношению к устойчивости и привести к совершенно противоположному результату. Адаптивная система с параметрами, быстро изменяющимися во времени, может также быстро реагировать на посторонние возбуждения, что вызовет потерю робастности всей системы в целом. Для того чтобы использовать все достоинства адаптивности, основные параметры системы должны быть достаточно стабильными, чтобы можно было не учитывать внешние помехи, и достаточно гибкими, чтобы обеспечить реакцию на существенные изменения среды. Эта задача называется дилеммой стабильности-пластичности.

7) аналогия с нейробиологией. Строение нейронных сетей определяется аналогией с человеческим мозгом, являющимся доказательством того, что параллельные отказоустойчивые вычисления не только физически реализуемы, но и являются высокоскоростным инструментом решения сложных задач из различных областей знаний. Нейробиология рассматривает ИНС в качестве основы для моделирования физических явлений. Вместе с этим, инженеры используют их как базу для новых нестандартных решений, выходящих за рамки традиционных электросхем.

Самым важным свойством нейронных сетей является их способность обучаться на основе данных окружающей среды и в результате обучения повышать свою производительность. Повышение производительности происходит со временем в соответствии с определёнными правилами. Обучение нейронной сети происходит посредством интерактивного процесса корректировки синаптических весов и порогов. В идеальном случае нейронная сеть получает знания об окружающей среде на каждой итерации процесса обучения.

С позиций нейронной сети используется следующее определение понятия “обучения” [76]:

Обучение – это процесс, в котором свободные параметры нейронной сети настраиваются посредством моделирования среды, в которую эта сеть встроена. Тип обучения определяется способом подстройки этих параметров.

Такое определение предполагает следующую последовательность событий:

- 1) в нейронную сеть поступают стимулы из внешней среды;
- 2) в результате этого изменяются свободные параметры нейронной сети;
- 3) после изменения внутренней структуры нейронная сеть отвечает на возбуждения уже иным образом.

Более подробно процесс обучения, основанный на обратном распространении ошибки сети, программируемой «с учителем», представлен далее и состоит из последовательности следующих операций:

- 1) выбрать очередную обучающую пару из обучающего множества; подать входной вектор на вход сети;
- 2) вычислить выход сети;
- 3) вычислить разность между выходом сети и требуемым выходом (целевым вектором обучающей пары);
- 4) подкорректировать веса сети так, чтобы минимизировать ошибку;
- 5) повторять шаги с 1 по 4 для каждого вектора обучающего множества до тех пор, пока ошибка на всем множестве не достигнет приемлемого уровня.

Вышеуказанный список четких правил решения проблемы обучения называется алгоритмом обучения. Универсального алгоритма обучения, подходящего для всех архитектур нейронных сетей не существует. Существует лишь набор средств, представленный множеством алгоритмов обучения, каждый из которых имеет свои достоинства. Алгоритмы обучения отличаются друг от друга способом настройки синаптических весов нейронов.

На основании результатов исследования возможности создания метода применения аппарата нечёткой логики в системах управления быстроходных гусеничных машин для повышения быстроходности и управляемости в процессе

прямолинейного движения и поворота был сформулирован круг задач, которые возможно реализовать на базе искусственных нейронных сетей[25,30]:

- 1) реализация ПИД-регулятора на базе нейронных сетей;
- 2) создание системы подстройки коэффициентов ПИД-регулятора (K_p , $T_{и}$, $K_{и}$, T_d , I_d) в реальном времени;
- 3) введение в систему блока определения типа движения (прямолинейное/поворот) для разделения типов их коррекции [36];
- 4) создание системы индивидуальной настройки управления гусеничной машиной.

Синтез системы идентификации типов задающего воздействия быстроходной гусеничной машины

Как показал первый этап моделирования shaping-алгоритмов фильтрации, их недостатком является невозможность совмещения решения задач повышения управляемости и в повороте и в процессе прямолинейного движения. Однако, дополнение системы управления БГМ блоком интеллектуального распознавания типа движения, на основе ИНС, позволит обойти данное ограничение. Так как появится возможность применения различных наборов shaping-фильтров, в зависимости от решаемой задачи.

Распознавание образов формально определяется как процесс, в котором получаемый образ-сигнал должен быть отнесен к одному из predetermined классов [8]. Чтобы нейронная сеть могла решать задачи распознавания образов, ее сначала необходимо обучить, подавая последовательность входных образов наряду с категориями, которым эти образы принадлежат. После обучения сети на вход подается новый, отличный от выборки обучения, образ, который принадлежит тому же набору категорий, что и обучающее множество, использованных при обучении. Благодаря информации, выделенной в процессе обучения, сеть сможет отнести введенную информацию к конкретному классу. Распознавание образов, выполняемое нейронной сетью, является по своей природе статистическим. При этом образы представляются отдельными точками в многомерном пространстве решений. Все пространство решений разделяется на

отдельные участки, каждый из которых ассоциируется с определенным классом. Границы этих участков как раз и формируются в процессе обучения. Построение этих границ выполняется статистически на основе дисперсии, присущей данным отдельным классам.

Для идентификации типа движения было решено использовать самоорганизующиеся карты Кохонена, которые, среди нейросетей, лучше всего подходят для распознавания при неполном или зашумлённом наборе входных данных.

Обучение Кохонена является самообучением, протекающим без учителя [87]. Поэтому трудно (и не нужно) предсказывать, какой именно нейрон Кохонена будет активироваться для заданного входного вектора. Необходимо лишь гарантировать, чтобы в результате обучения разделялись несхожие входные векторы [57,68].

При обучении сети Кохонена на вход подается входной вектор и вычисляются его скалярные произведения с векторами весов, связанными со всеми нейронами Кохонена. Нейрон с максимальным значением скалярного произведения объявляется “победителем” и его веса подстраиваются. Так как скалярное произведение, используемое для вычисления выходных величин сети, является мерой сходства между входным вектором и вектором весов, то процесс обучения состоит в выборе нейрона Кохонена с весовым вектором, наиболее близким к входному вектору, и дальнейшем приближении весового вектора к входному. Сеть самоорганизруется таким образом, что данный нейрон Кохонена имеет максимальный выход для данного входного вектора [76]. Уравнение, описывающее процесс обучения имеет следующий вид:

$$w_n = w_c + \alpha(x - w_c), \quad (2.20)$$

где w_n – новое значение веса, соединяющего входную компоненту x с выигравшим нейроном; w_c – предыдущее значение этого веса; α – коэффициент скорости обучения, который может варьироваться в процессе обучения.

Каждый вес, связанный с выигравшим нейроном Кохонена, изменяется пропорционально разности между его величиной и величиной входа, к которому

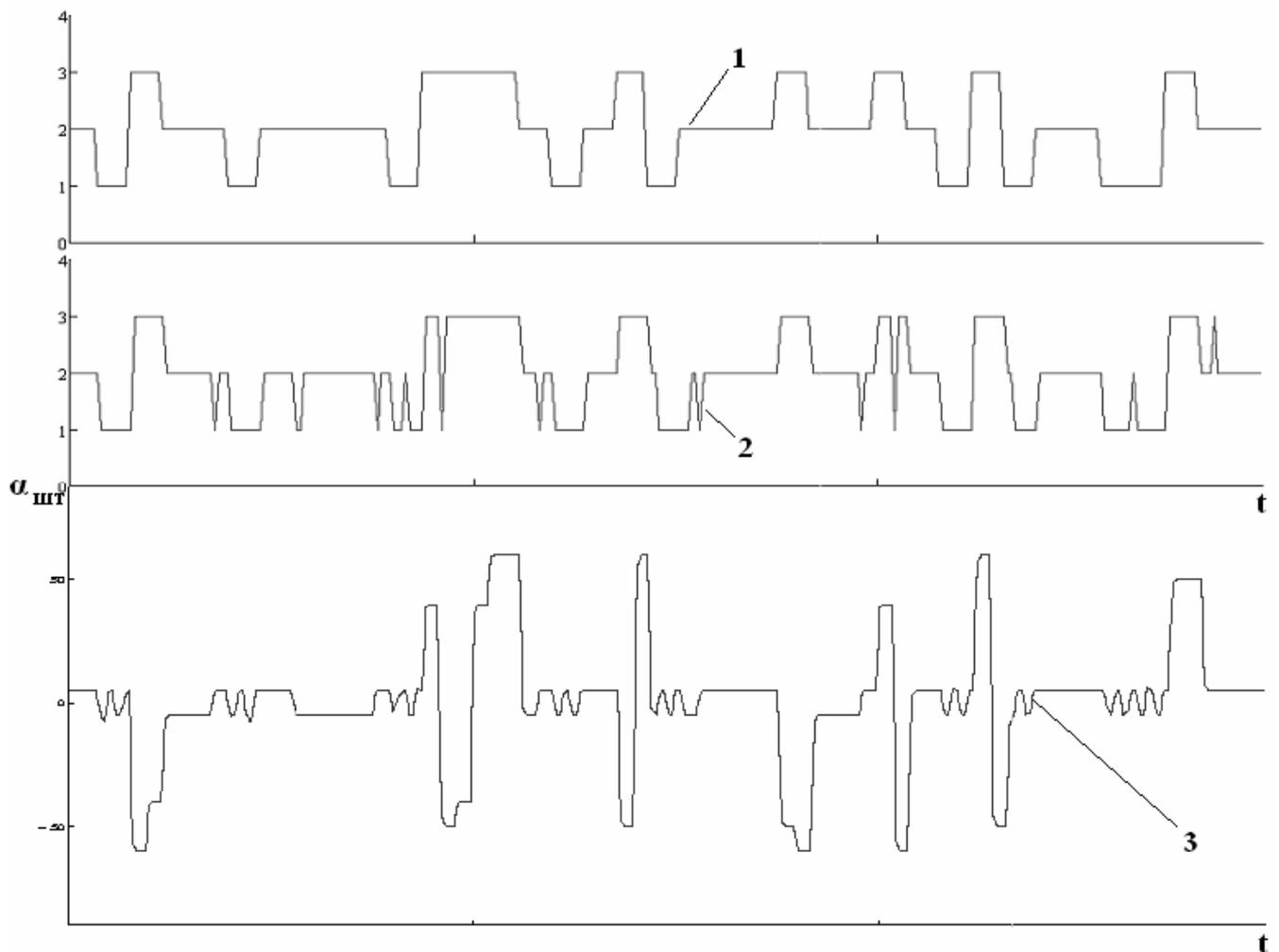
он присоединен. Направление изменения минимизирует разность между весом и его входом.

После обучения классификация выполняется посредством подачи на вход сети входного вектора, вычисления значения для каждого нейрона с последующим выбором того, который обладает наибольшим значением индикатора правильной классификации.

В рамках работы была решена задача по моделированию нейросетевых решений в системе управления движением БГМ, предназначенных для идентификации множества управляющих сигналов с последующим отдельным регулированием различных типов движения.

Для решения задачи классификации воздействия водителя были использованы сигналы и их производные, поступающие с датчика штурвала на вычислительный блок. Для разделения сигналов использованы нейронные сети встречного распространения Кохонена-Гроссберга[10,12]. Обучающее множество для моделирования формировалось таким образом, чтобы в него входили задающие воздействия прямолинейного движения, процесса поворота, различные корректировки[37,91,92], производимые водителем при определении курсового угла. Всего было сформировано две тысячи обучающих векторов, состоящих из данных о величине угла поворота штурвала и том, к какому типу относится это задающее воздействие.

После первого этапа обучения была получена классификационная сеть, которая разделила все поступающие сигналы на 11 классов. На выходе были определены три группы сигналов, соответствующие прямолинейному движению, подруливанию и процессу поворота. На Рисунке 2.7 представлены результаты данного обучения, эффективность которого составила 84%.



1 – исходный тип; 2 – определяемый тип; 3 – форма задающего воздействия

Рисунок 2.7 – Результаты обучения сети классификации задающих воздействий

На втором этапе классификации вынесены в отдельный класс те обучающие наборы, которые были определены неверно в первом случае[8]. Таким образом, в том случае, когда система попадает в подобное состояние, необходимо будет использовать данные о том типе движения, который однозначно определялся в предыдущий момент времени. В результате обучения были получены следующие результаты работы системы, которые представлены в таблице 2.4.

Как видно из таблицы, количество нейронов скрытого слоя возросло более чем на 25%, следовательно, для построения такой сети потребуется либо большее количество компонентов, что усложнит её структуру, либо большее время вычисления её выходов [77]. Так как эффективность идентификации возросла всего на 2%, от второго этапа разделения управляющих сигналов было решено отказаться.

Таблица 2.4 – Параметры обученных нейронных сетей за два этапа

Тип классификации входных данных	Количество нейронов скрытого слоя	Количество определяемых типов управляющих воздействий	Эффективность идентификации
Без учёта неопределённых состояний	11	3	84%
С учётом неопределённых состояний	14	4	86%

Полученная двухслойная нейросеть распознавания была интегрирована в исходную систему. В качестве входов использованы данные с датчика штурвала за пять временных интервалов, в соответствии с общепринятыми обозначениями, синтезированной сети соответствует обозначение «5–11–3» с логистической функцией активации нейронов на скрытом и выходном слоях – значения коэффициентов и величины смещений ИНС приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Смещения и весовые коэффициенты полученной ИНС

№ нейрона в слое	Величины весов и смещений нейронов											
	Внутренний слой											
	Смещение	1	2	3	4	5						
1	1.243	1.072	-6.240	-3.408	1.646	-1.056						
2	5.468	2.556	-3.981	-1.383	-1.452	-2.374						
3	1.394	-1.751	-1.154	-1.815	-1.031	-6.763						
4	2.209	-1.776	8.151	-1.091	-1.923	-2.010						
5	1.993	1.416	3.170	-8.287	-8.850	-2.726						
6	1.279	-6.462	-1.312	-1.424	-7.124	-8.140						
7	2.731	1.814	3.193	-2.149	-5.974	-3.451						
8	-1.191	-4.061	-2.836	2.869	-3.026	8.229						
9	2.768	6.865	6.861	-1.639	-1.307	-2.477						
10	2.954	9.091	-2.542	-2.069	-1.402	-2.902						
11	5.701	-3.898	5.189	2.219	4.003	4.235						
Выходной слой												
	Смещение	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1.845	6.625	-1.135	4.029	1.380	-5.637	2.158	6.911	-4.308	1.170	-1.307	-8.344
2	1.790	-9.854	-6.399	-5.525	-1.312	4.884	6.408	1.795	8.551	-7.658	1.373	-1.471
3	-5.063	1.870	-1.926	5.454	1.052	-5.130	-6.274	-2.143	-1.107	-4.658	-9.936	1.580

Изучение различных искусственных нейронных сетей и последующее их моделирование для поставленной задачи показало, что их применение позволяет

производить разделение процесса регулирования с достаточной степенью достоверности. Возможность построения таких систем распознавания на базе существующих программируемых логических контроллеров делает возможным их быстрое внедрение. Следовательно, применение аппарата ИНС в последующем моделировании и изучении алгоритмов фильтрации и процессов автоматизированного управления движением БГМ с целью повышения степени реализации потенциальных скоростных качеств является перспективным [4,67].

2.4 Расчёт и построение модели адаптивного ZVD–shaper–фильтра системы автоматизированного управления движением БГМ

Организация «быстрой» обратной связи на основе гидрообъёмного механизма поворота

Для повышения степени реализации потенциальных скоростных качеств машины предлагается ввести в систему управления дополнительную обратную связь, организованную так, что реакция на задающее воздействие водителя будет определяться с меньшим запаздыванием по времени и, следовательно, уменьшится время на генерацию корректирующего воздействия регулятора системы автоматизированного управления, что приведёт к повышению динамики и управляемости гусеничной машины. Предлагаемое решение возможно осуществить с помощью Shaping-алгоритмов.

Синтезируемый алгоритм коррекции управляющего воздействия, реализуемый фильтрами должен предотвращать возбуждение и гашение нежелательных колебаний, обеспечить 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 показывает, 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. На рисунке 2.8 показан фрагмент осциллограммы, характеризующий изменение давления в процессе входа быстродвижущейся машины в поворот, движения в повороте и выхода из него. Спектральный анализ колебательного процесса рабочей жидкости в силовых магистралях гидропривода показывает, что он содержит высокочастотные составляющие, формируемые поршневой группой гидропривода, возмущениями на траковой частоте (зацепление ведущих колёс с гусеницами), низкочастотными колебаниями корпуса вокруг вертикальной оси, а так же нелинейностью гидропривода, проявляющейся при переходных процессах[21]. Таким образом, предлагаемый параметр является достаточно информативным. Адаптация фильтра может быть осуществлена на основе измерения и обработки сигналов G-сенсора бокового движения.

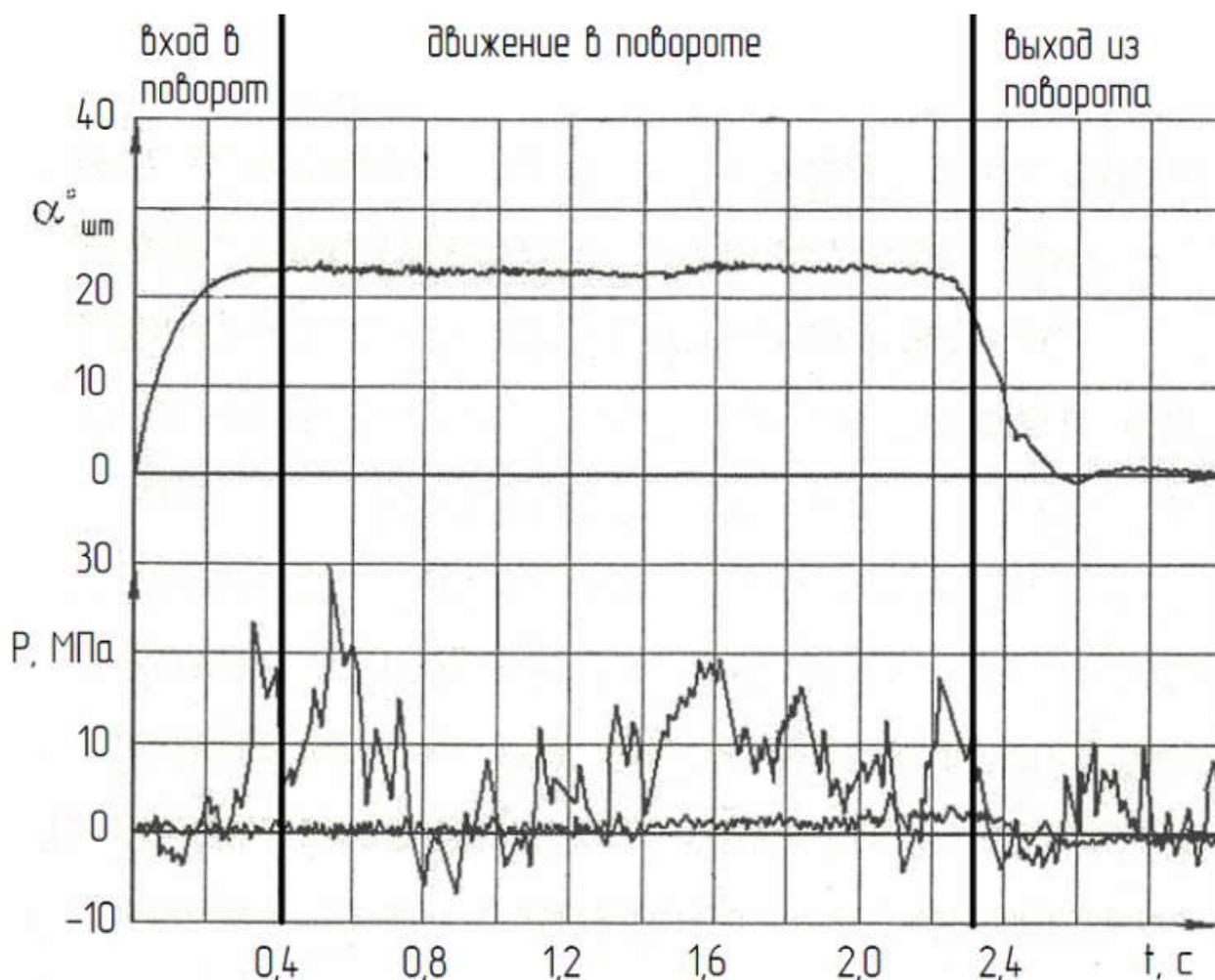


Рисунок 2.8 – Осциллограмма изменения давления в силовых контурах гидрообъёмного привода в процессе поворота

Передаточные свойства гидрообъемной передачи рассматриваются по кинематическим свойствам и по силовым [16]. Кинематические свойства регулируются производительностью насоса при изменении угла поворота люльки с помощью управляющего золотника и исполнительных силовых гидроцилиндров. Малая величина постоянной времени позволяет обеспечивать пропорциональность между углом поворота штурвала $\alpha_{шт}$ и углом поворота люльки γ_l , определяемого размерами дифференциального рычага. Линеаризованное дифференциальное уравнение аксиально-поршневой гидрообъемной передачи без учета вязкого трения и переходных процессов в магистралях низкого давления:

$$T_{MEX} T_{\Gamma} \frac{d^2 \omega_{GM}}{dt^2} + T_{MEX} \frac{d\omega_{GM}}{dt} + \omega_{GM} = K_{\omega} \gamma_l - \frac{M_{GM}}{C_{MEX}} \quad (2.21)$$

при изображении по Лапласу при нулевых начальных условиях приводится к виду

$$(T_{MEX} T_{\Gamma} S^2 + T_{MEX} S + 1) \omega_{GM}(S) = K_{\omega} \omega \gamma_l(S) - \frac{M_{GM}}{C_{MEX}}, \quad (2.22)$$

где T_{MEX} – постоянная времени, учитывающая влияние на переходный процесс инерционных свойств и скольжения системы управления поворотом машины;

T_{Γ} – гидравлическая постоянная времени, характеризующая запаздывание в приводе из-за утечек и сжимаемости рабочей жидкости;

K_{ω} – коэффициент усиления гидрообъемной передачи по скорости;

C_{MEX} – коэффициент жесткости механической характеристики гидропривода, который учитывает сжимаемость рабочей жидкости, в т.ч. рассматриваемой как двухфазная среда (при кипении, вспенивании и др.);

M_{GM} – момент нагрузки на валу гидромотора.

Передаточная характеристика гидрообъемной передачи задаётся аperiodическим звеном второго порядка:

$$W(S) = \frac{1.33}{0.0004S^2 + 0.002S + 1}. \quad (2.23)$$

Перерегулирование исходной системы достигает 90% от установившегося значения, а время перехода при реакции на единичное воздействие – 1.158 секунд. Для улучшения качества переходного процесса рассчитаем и введём в систему дополнительный блок преобразования входного сигнала – Шарп-фильтр различной конфигурации.

Для компьютерного моделирования все построения проводились с помощью интерактивного инструмента моделирования Simulink системы MATLAB[68,91,92], и все фильтры были реализованы с помощью сумматоров, пропорциональных звеньев и звеньев чистого запаздывания. Структурная схема моделирования для сравнения всех фильтров и переходной характеристики системы представлена на рисунке 2.9.

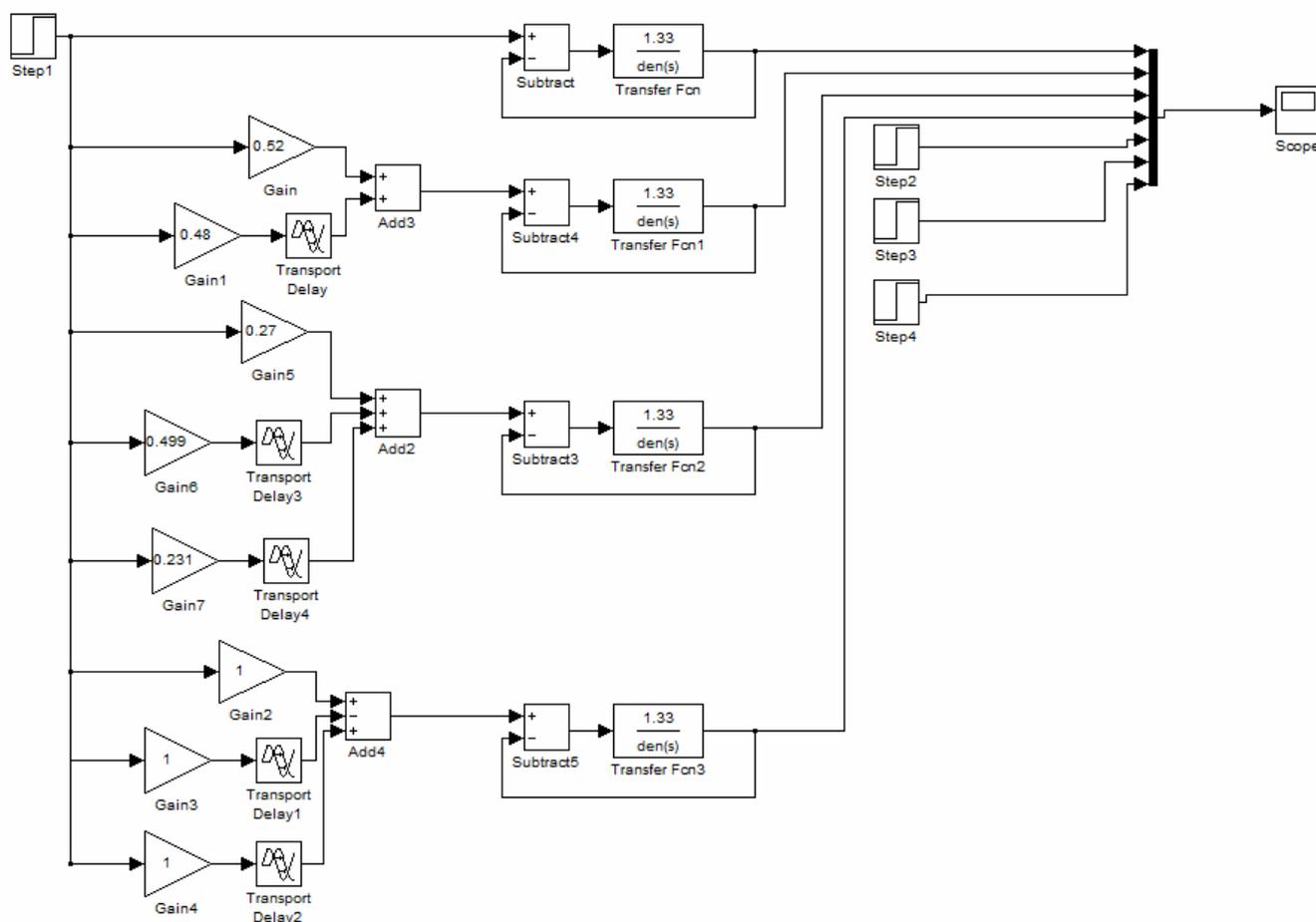
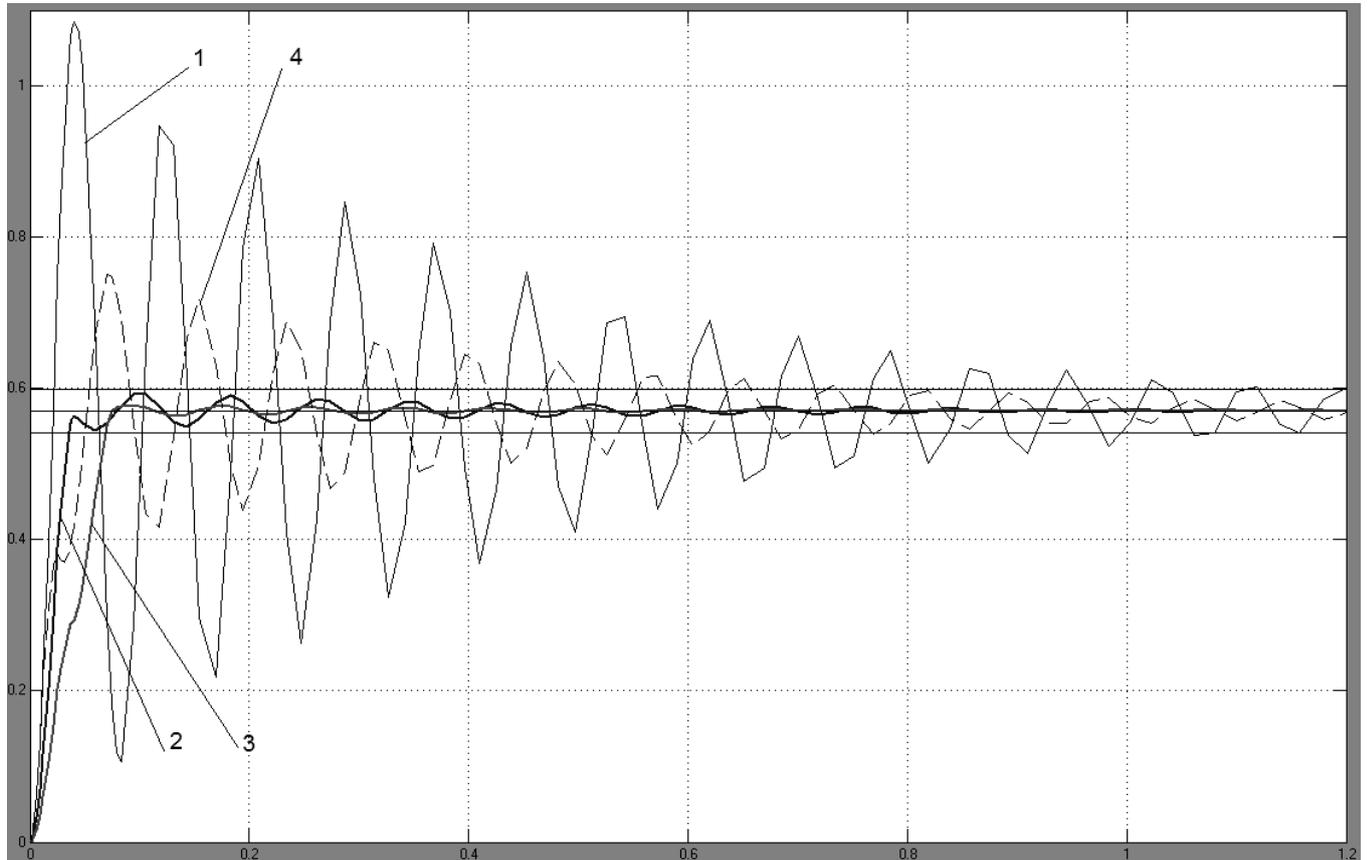


Рисунок 2.9 – Шарп-фильтры регулирования гидрообъемного привода

Исследовалась возможность применения ZV-, ZVD-, UM-ZV-фильтров. На управляющий вход системы с различными регуляторами подавалось единичное ступенчатое воздействие и определялась реакция на него (рисунок 2.10). На

рисунке так же обозначена 5%-зона около установившегося значения для большей наглядности. Результаты сравнения времени переходного процесса и перерегулирования для различных систем представлены в таблице 2.6.



1 – без Шарпег-фильтра, 2 – ZV-Фильтр, 3 – ZVD-фильтр, 4 – UM-ZV-фильтр

Рисунок 2.10 – реакция системы на единичное задающее воздействие

Таблица 2.6 – Качество переходных процессов при использовании различных Шарпег-фильтров

	Без фильтра	ZV- Shaper	ZVD- Shaper	UM-ZV- Shaper
Перерегулирование, %	90	4	1.5	32
Время переходного процесса, с	1.158	0.036	0.069	0.771
Уменьшение времени переходного процесса, %	0	97	94	23

Из полученных результатов можно сделать вывод о высокой эффективности подавления колебаний и возможности применения шарпег-фильтров в системе управления гидрообъемной передачей быстроходной гусеничной машины.

Наилучшие результаты показал ZV-Shaper, однако качественные характеристики данного фильтра сильно зависят от стабильности характеристик объекта, для управления которым он применяется. Характеристики гусеничной машины в процессе движения могут изменяться в широких пределах под влиянием внешних и внутренних условий, в связи с этим правильным решением будет выбор ZVD-фильтра как наиболее подходящего, так как его робастность выше, а, по результатам моделирования, отличия эффективности его работы от ZV-фильтра минимальны.

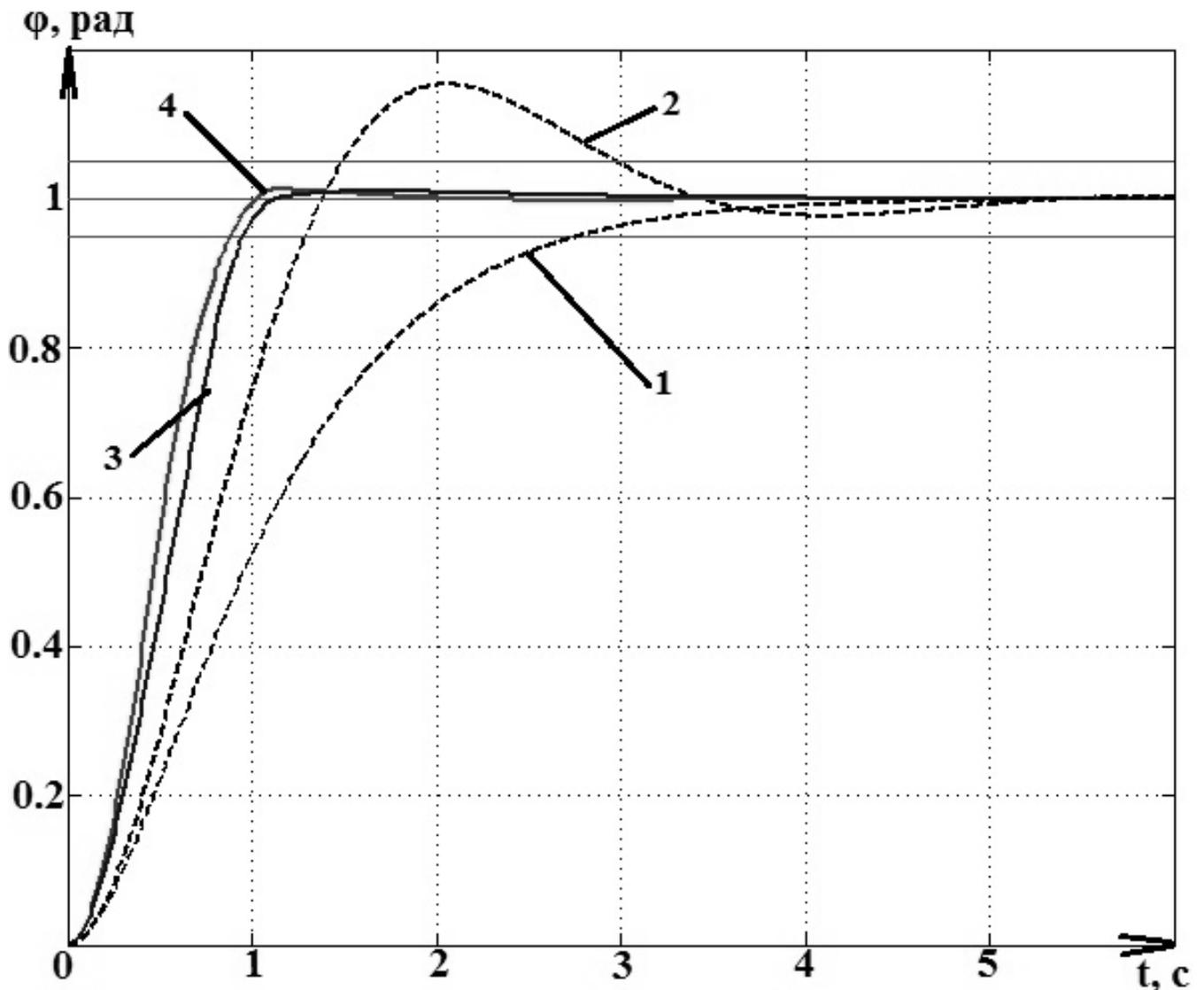
Применение данного алгоритма фильтрации управляющих воздействий в системе управления быстроходной гусеничной машины позволит повысить уровень реализации потенциальных скоростных свойств быстроходной гусеничной машины, снизить требуемый уровень квалификации механика–водителя и степень его утомляемости.

Синтез адаптивного ZVD-shaper-фильтра

Моделирование shaping-алгоритмов фильтрации показало, что при различных скоростях транспортной машины необходимо не только подавлять колебания на высоких скоростях, но и одновременно с этим повышать динамику переходных процессов – на низких, с чем существующие shaping-фильтры не справляются (рисунок 2.11). В связи с этим на основании результатов вычисления коэффициентов фильтрации и анализа позитивных и негативных shaping-алгоритмов было решено синтезировать новый тип фильтра. Возможность оперативно измерять скорость машины во время движения позволяет произвести синтез адаптивного shaping-регулятора (zero-vibration and derivative, нулевой вибрации и амплитуды), основные коэффициенты которого: A_1 , A_2 , A_3 – величина первого, второго и третьего импульса соответственно и t_2, t_3 – время второго и третьего импульсов [54, 55], изменяются соответственно скорости для решения поставленных задач.

Моделированием установлено, что при скорости $V > 15$ м/с необходимо повышать динамику процесса движения и подавление колебаний. Соответственно,

вычислительный блок управления движением должен быть дополнен логическим идентификатором скорости для разделения процесса регулирования.



1, 2 – $V=10$ м/с, $V=20$ м/с, без фильтра; 3, 4 – $V=10$ м/с, $V=20$ м/с, ZVD-shaper

Рисунок 2.11 – Переходные процессы управляемого движения БГМ на разных скоростях

За основу был взят позитивный ZVD- и негативный UM-ZV-фильтры, коэффициенты умножения амплитуды которых были модифицированы. Время запаздывания импульсов рассчитывалось изначально аналогично формулам UM-ZV-shaper'a. Впоследствии анализ данных, полученных при компьютерном моделировании исходной системы с динамически изменяющейся скоростью, позволил установить зависимость времени второго импульса фильтра от неё, а также уточнить время третьего импульса экспертным путём. Полученные

значения модифицированного негативного ZVD-shaping-фильтра приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Значения коэффициентов shaping-фильтров

Номер импульса	ZVD	
	A_i	t_i
1	2	0
2	-1.5	$0.003V^2 -$ $0.125V + 1.75$
3	0.5	1.15 с

Стоит отметить, что в реальной системе существует время чистого запаздывания измерения поступательной скорости, которое может быть учтено в данном фильтре путём вычитания этого запаздывания из результата расчёта t_2 . Тем самым появляется возможность минимизации влияния параметров объекта управления, характеризующихся временными запаздываниями.

Дальнейшим развитием данного направления адаптации фильтров может быть установление зависимостей его коэффициентов от других параметров БГМ, индексирующихся существующим комплексом измерительной аппаратуры G-сенсором, а также зависимостей передаточной характеристики транспортной машины от динамического параметра её массы.

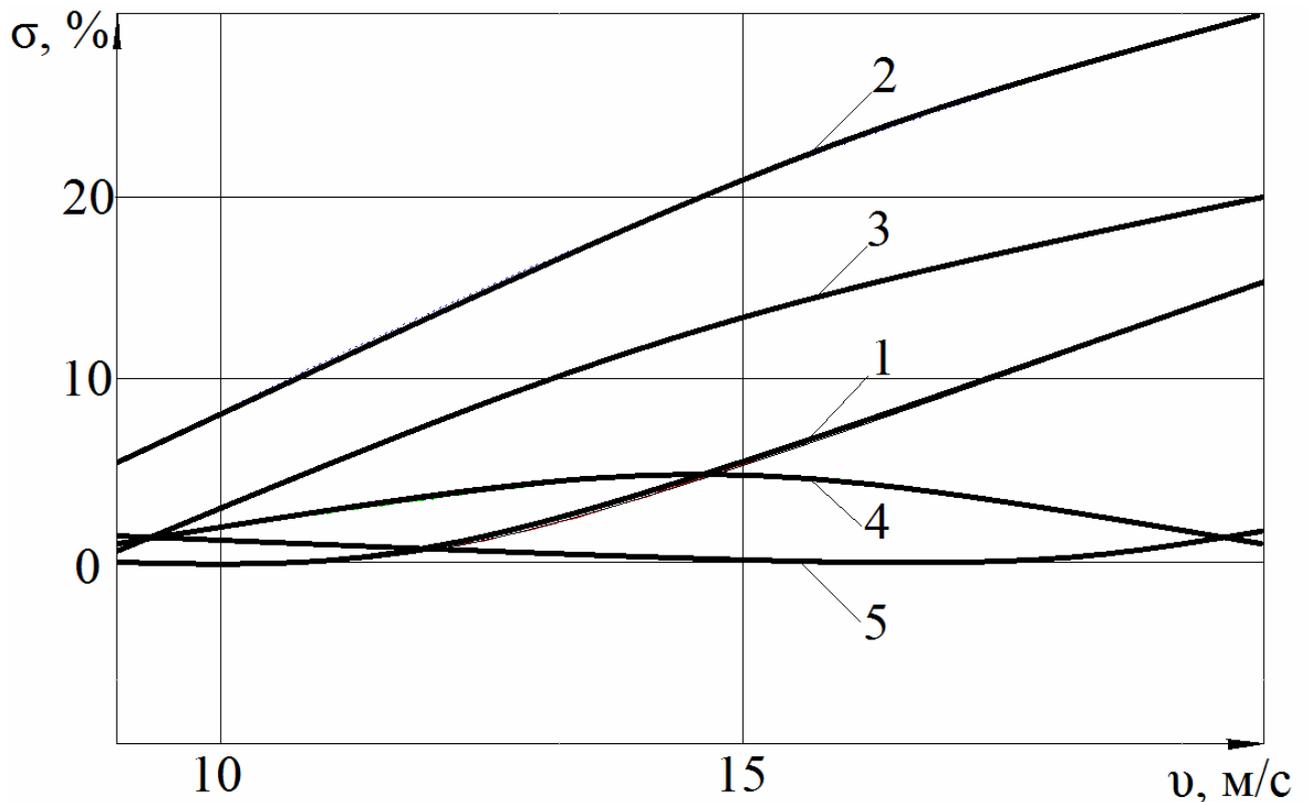
Оценка эффективности полученной автоматизированной системы управления по её переходным и фазово-частотным характеристикам

Для оценки эффективности синтезированной системы управления были проведены модельные эксперименты с целью сбора данных о количественных характеристиках её параметров и параметров исходной системы. Определялись перерегулирование переходных процессов, их время и коэффициент фазовой напряжённости.

В теории управления перерегулирование (определяется величиной первого выброса) — отношение разности максимального значения переходной характеристики (пикового значения сигнала) и ее установившегося значения к величине установившегося значения [88,89]. Измеряется обычно в процентах. В

нашем случае физический смысл данной характеристики заключается в том, на сколько процентов происходит занос корпуса быстроходной гусеничной машины вокруг вертикальной оси и курсового угла движения при реакции её на управляющие воздействия водителя.

На рисунке 2.12 приведена зависимость перерегулирования переходного процесса – 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 [22]. 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%.



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

Рисунок 2.12 – Зависимость перерегулирования от скорости БГМ

При движении БГМ на низких скоростях, когда заноса корпуса не происходит, возникает новая задача по сокращению времени переходных процессов, то есть скорости реакции гусеничной машины на задающие воздействия водителя, определяющая динамику управляемого движения. Как показали результаты сравнения моделирования различных фильтров, автоматизированных регуляторов и исходной системы, синтезированное решение позволяет повысить динамику вращательного движения БГМ и сократить время переходных процессов на низких скоростях с 2.8 секунд до 1 секунды, а на высоких – с 3 секунд до 1 секунды, что характеризует её как высокоэффективную.

В работе выполнено динамическое моделирование реакции системы на гармоническое воздействие [24]. 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 2.13.

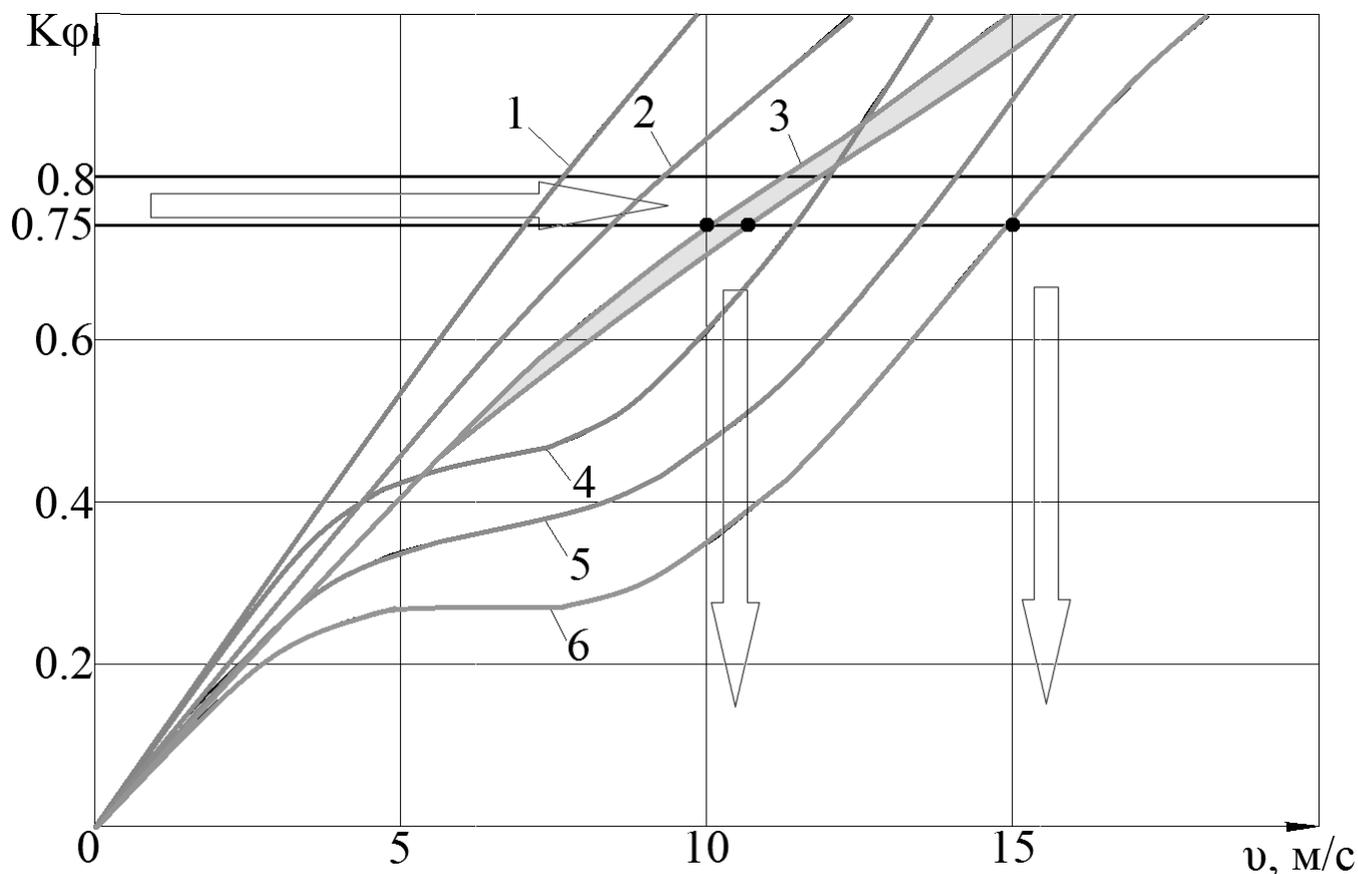
Из графиков рисунка 2.13 видно, что применение ZVD-shaper-фильтров с адаптацией по линейной скорости движения позволяет повысить предельную скорость на 28–50%, при которой сохраняется управляемость движения. Например, при $\Delta S = 40$ м, $V = 10$ м/с (36 км/ч), а при использовании ZVD-shaper-фильтра $V = 15$ м/с (54 км/ч). Этот эффект реализуется при достаточном значении поворачивающего момента и ограничении буксования движителя.

В соответствии с характером нелинейностей объекта управления, принятая в работе компьютерная модель (рисунок 2.2) дополняется соответствующими элементами:

- 1) механизмом динамического изменения скорости;
- 2) возможностью модификации массы машины и коэффициента сопротивления уводу;

3) звено чистого запаздывания в линиях обратной связи и адаптации shaping-алгоритма с переменным временем запаздывания;

4) возможностью задания случайных управляющих воздействий.



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 2.13 – Зависимость коэффициента фазовой напряжённости от скорости движения

Результат синтеза структуры для оценки эффективности различных регуляторов представлен на рисунке 2.14. Помимо адаптивного по скорости ZVD-shaper фильтра, данная система содержит модель ПИД-регулятора с запаздыванием в обратной связи и модель БГМ без регуляторов. Процесс динамического изменения скорости, массы и сопротивления уводу может происходить по предопределённому закону или случайным образом.

Для оценки влияния массы БГМ на переходные процессы управляемого движения было произведено моделирование реакции машины на единичное задающее воздействие. Переменная составляющая массы, определяемая наличием десанта, боекомплекта и топлива, учитывалась через момент инерции вокруг вертикальной оси в его предельных значениях. Результаты моделирования переходного процесса с применением разработанного shaper-фильтра и – без него представлены на рисунке 2.15.

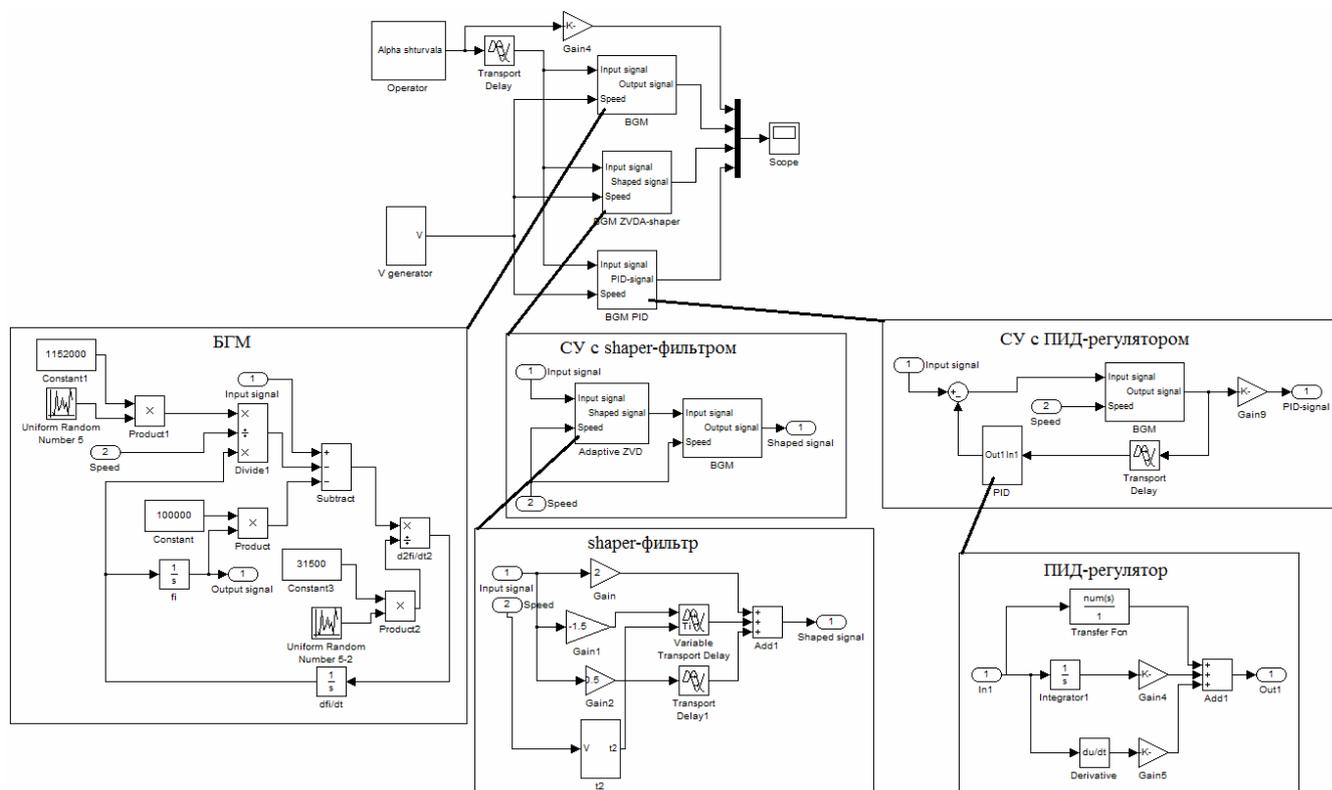
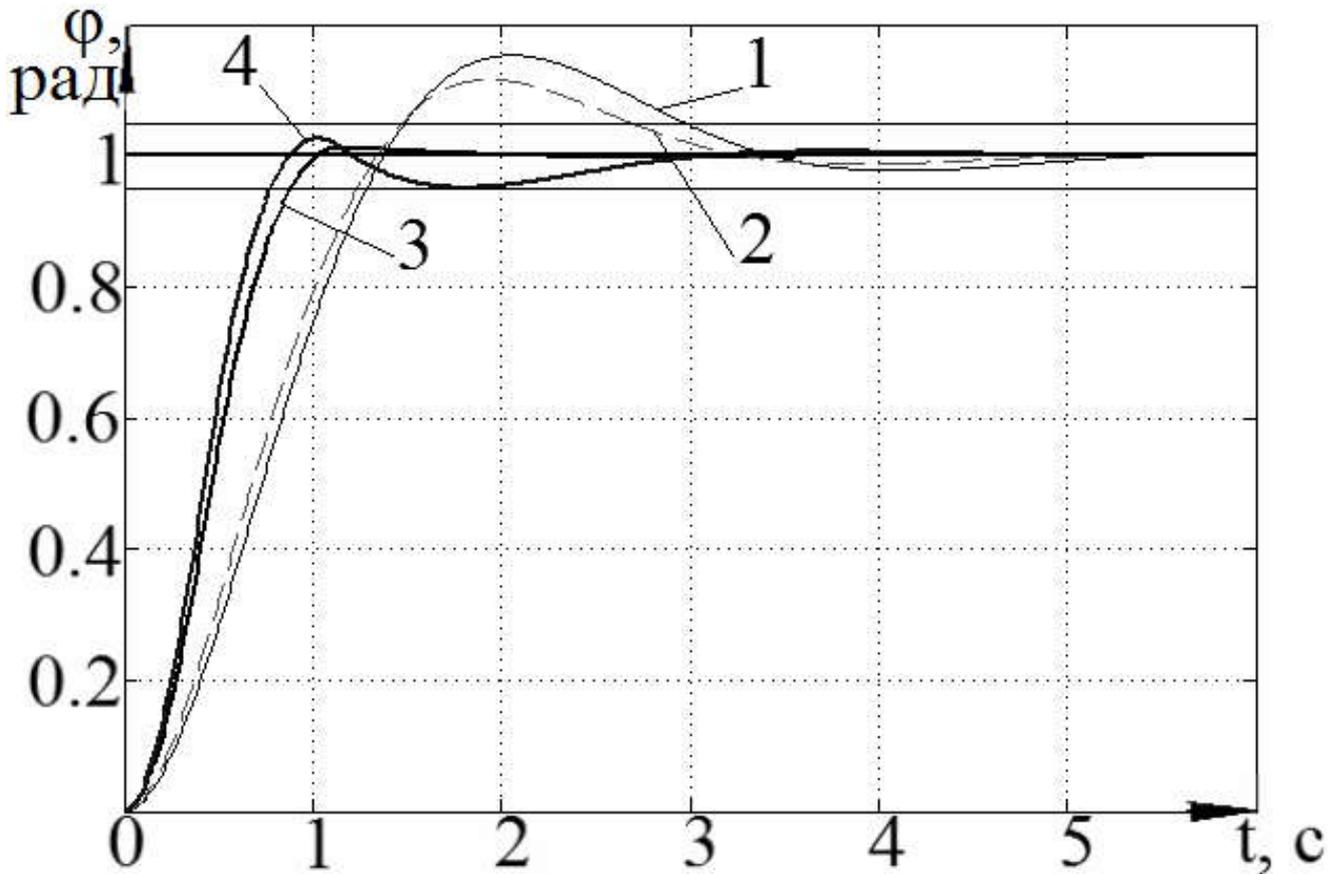


Рисунок 2.14 – Компьютерная модель вращательного движения БГМ с различными регуляторами

Из полученных графиков следует, что уменьшение массы повышает динамику и сокращает время изменения курсового угла транспортной машины, но увеличивает перерегулирование (рисунок 2.15 график 1, 2). Причём эффективность работы адаптивного shaper-фильтра также повышается: $t_{\text{ПП}}(I_{z\text{min}}) < t_{\text{ПП}}(I_{z\text{max}})$ (рисунок 2.15 график 3, 4).



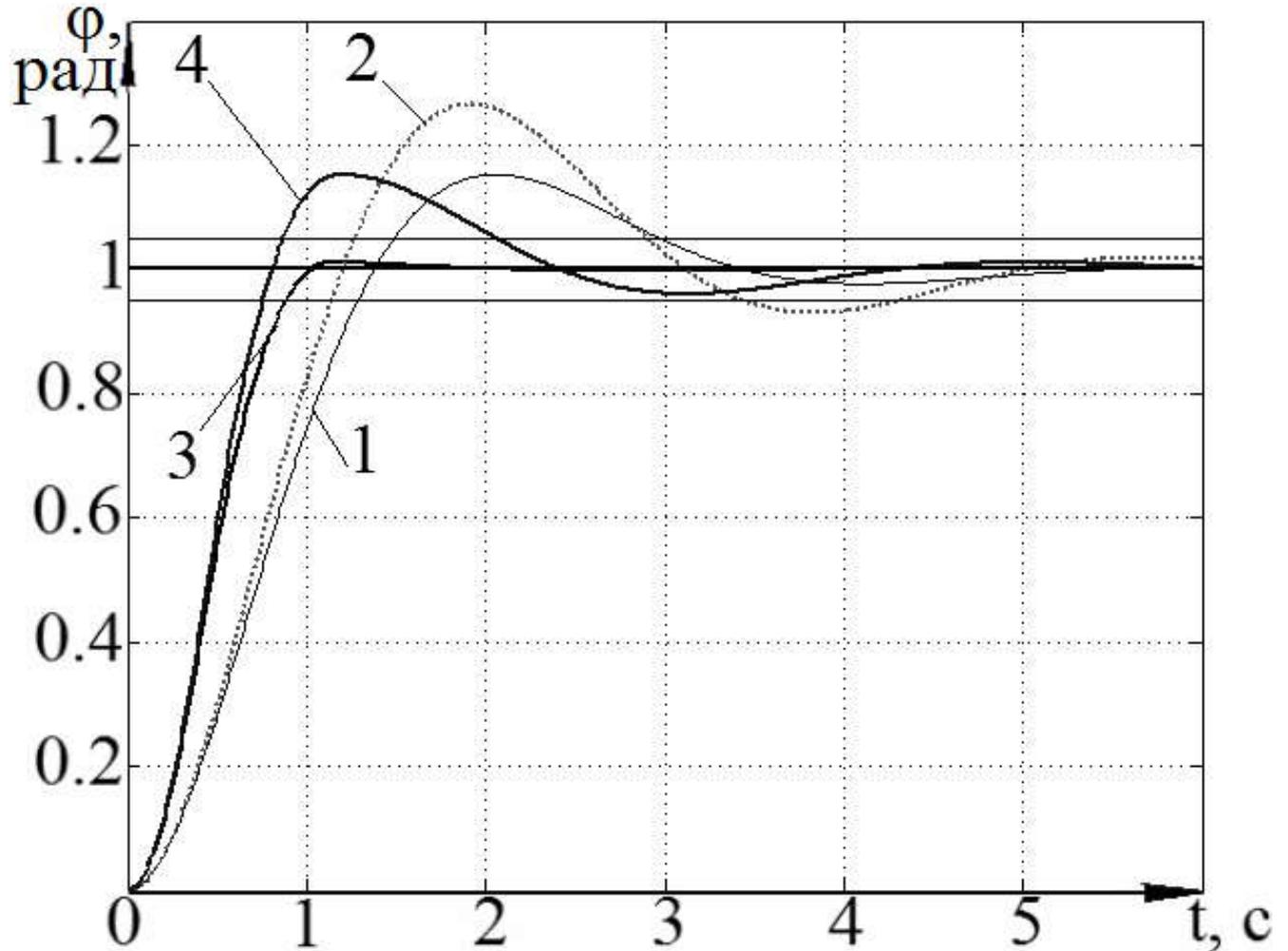
1,2 – I_{zmax} , I_{zmin} без регулятора соответственно; 3,4 – I_{zmax} , I_{zmin} с shaper-фильтром

Рисунок 2.15 – Переходные процессы при предельных значениях момента инерции вокруг вертикальной оси

Воздействие температуры опорных катков БГМ на процесс управляемого поворота определяется через изменение коэффициента сопротивления уводу C_y . Производилось сравнение моделей без учёта температуры с моделями, коэффициент сопротивления уводу которых определяется для температуры, равной 150°C (рисунок 2.16).

Результаты моделирования подтверждают высокую степень влияния температуры на переходные процессы. У БГМ с системой управления поворотом без регулятора, с ростом температуры шин опорных катков, перерегулирование может возрастать с 17% до 28%, а время процесса увеличивается на 50% (рисунок 2.16 график 1, 2). Не смотря на рост динамики, в целом качество переходного процесса в системе с shaper-фильтром так же снижается (рисунок 2.16 график 3, 4), однако эффективность его остаётся высокой в сравнении с исходной системой

– перерегулирование меньше на 10%, а $t_{\text{ПП}}$ в два раза меньше (рисунок 2.16 график 2, 4).

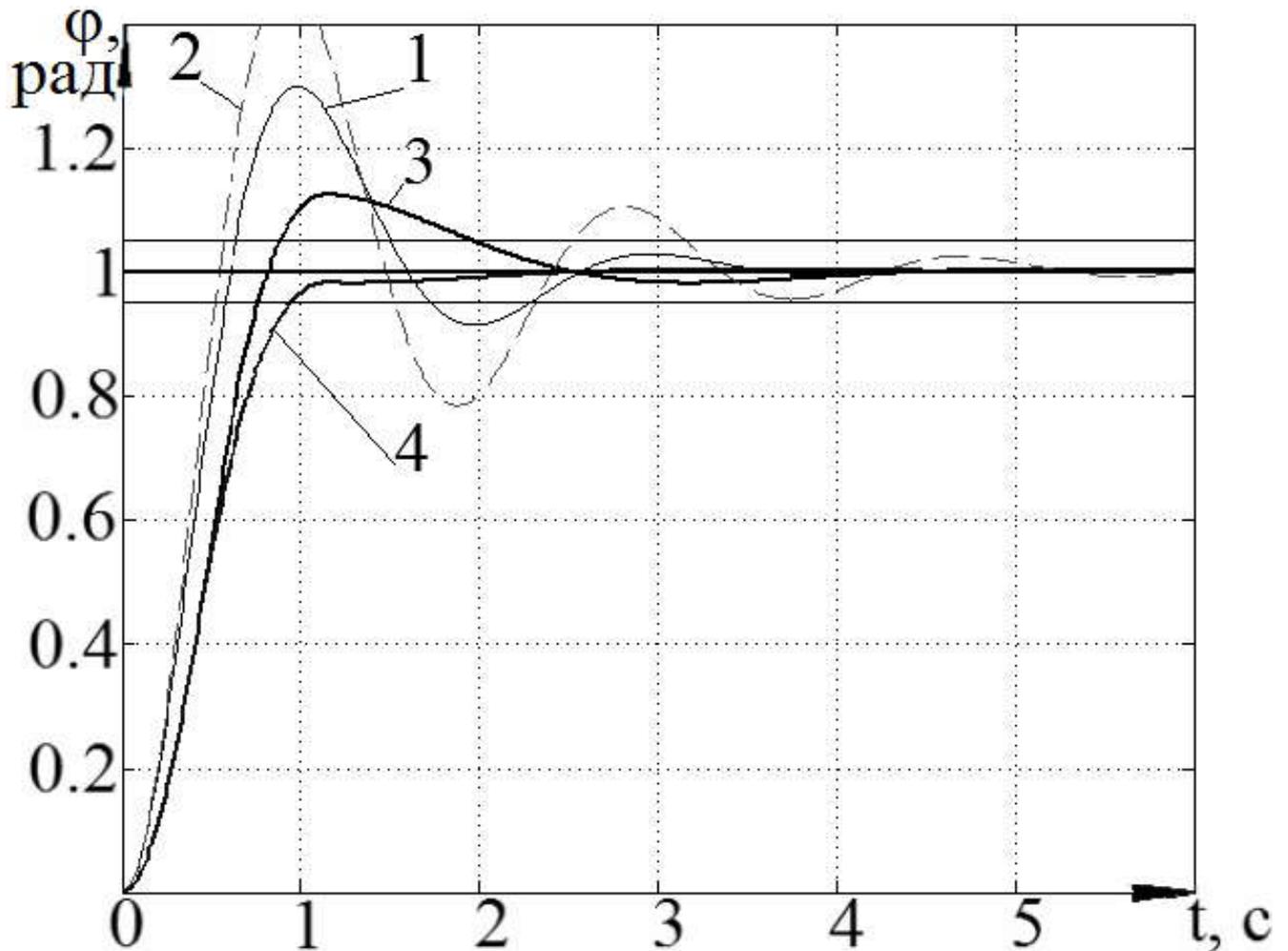


1,2 – $C_{y\max}$, $C_{y\min}$ без регулятора соответственно; 3,4 – $C_{y\max}$, $C_{y\min}$ с shaper-фильтром

Рисунок 2.16 – Переходные процессы при предельных значениях момента инерции вокруг вертикальной оси

Влияние линейной скорости на процесс управляемого поворота, а также соответствующие меры по адаптации синтезированного ZVD-shaper фильтра, были рассмотрены ранее в данной работе (рисунок 2.11). Однако в системе управляемой системы существует время запаздывания, определяемое параметрами БГМ и элементов управления. В частности, процесс измерения линейной скорости датчиком, передача и обработка полученного сигнала. Данное отличие реальной системы от модели может быть учтено введением звена чистого запаздывания $t_{\text{зап}}=0.1$ с в обратную связь ПИД-регулятора и линию

корректировки коэффициентов shaper -фильтра по линейной скорости (рисунок 2.17).



1 – система с идеальным ПИД-регулятором; 2 – система с реальным ПИД-регулятором; 3 – shaper -фильтр без учёта запаздывания; 4 – shaper -фильтр с запаздыванием по линейной скорости

Рисунок 2.17 – Влияние чистого запаздывания на качество переходных процессов управления движением БГМ

В сравнении с идеальным ПИД-регулятором, перерегулирование реального – возрастает на 18%, а время реакции на единичное воздействие увеличивается на 0.9 с (рисунок 2.17 график 1, 2). Эффективность управления посредством shaper -фильтров также снижается (перерегулирование возрастает на 9%, а $t_{\text{ПП}}$ – на 1 с), но, зная фактическое время запаздывания идентификации линейной скорости, можно произвести корректировку формулы расчёта алгоритма адаптации фильтра (Таблица 2.7) и устранить данное влияние (рисунок 2.17 график 3, 4). Вместе с

тем, даже без дополнительных манипуляций, система с реальным ZVD–shaper фильтром быстрее исходной на 1.1 с при меньшем на 6% перерегулировании.

Далее представлены выводы по результатам произведённого компьютерного моделирования расширенной нелинейностями модели:

1) чистое запаздывание в обратной связи влияет на качество автоматизированного регулирования посредством shaper–фильтров гораздо в меньшей степени, чем при использовании обычного регулятора, и может быть минимизировано;

2) адаптивный ZVD–shaper фильтр, полученный в данной работе, более эффективно справляется с задачами повышения качества переходных процессов в системе управления движением быстроходной гусеничной машины, не смотря на изменение параметров, определяющих её передаточную характеристику;

3) реализация адаптации по линейной скорости движения позволила значительно расширить качество регулирования;

4) даже с учётом временных запаздываний в автоматизированной системе управления движением быстроходной гусеничной машины, применение обратной связи для корректировки коэффициентов shaper–фильтров оказывается эффективным. Это связано с тем, что управляющее воздействие распределяется во времени на несколько составляющих, и коррекция второй и третьей частей сигнала поглощает отставание обратной связи и запаздывания, вызванные инерционными элементами БГМ.

2.5 Выводы

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) разработанная компьютерная модель движения БГМ позволяет выполнить имитационное моделирование динамики переходных процессов управляемой системы при вариации её параметров;

2) на основании исследования установлено, что для рассмотренной управляемой системы с варьирующимися параметрами и, для которой трудно

организовать обратную связь, необходимо перераспределять управляющие силовые воздействия на основе shaper-фильтров;

3) применительно к рассматриваемой системе для повышения качества переходных процессов обоснована необходимость синтеза ZV-shaper-фильтра. Его эффективность позволяет на 14% уменьшить перерегулирование и на 50% сократить длительность переходных процессов;

4) для повышения динамических свойств системы и сокращения коэффициента фазового отставания реакции, обоснована необходимость и синтезирован ZVD-shaper-фильтр. Его эффективность заключается в возможности сокращения фазового отставания реакции и повысить предельную скорость управляемого движения до 5 м/с.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

В этом разделе приводятся основные параметры конструкции объекта, цель и задачи экспериментального исследования, основные результаты и их анализ.

3.1 Объект и задачи экспериментального исследования

Объектом экспериментального исследования являлась быстроходная гусеничная машина массой 14 т. с увеличенной удельной мощностью гидрообъемной передачи дифференциального механизма поворота до 24.2 кВт/т, обеспечивающей поворот машины с угловой скоростью до 1.1 рад/с (рисунок 3.1). Основные параметры БГМ указаны в таблице 3.1.

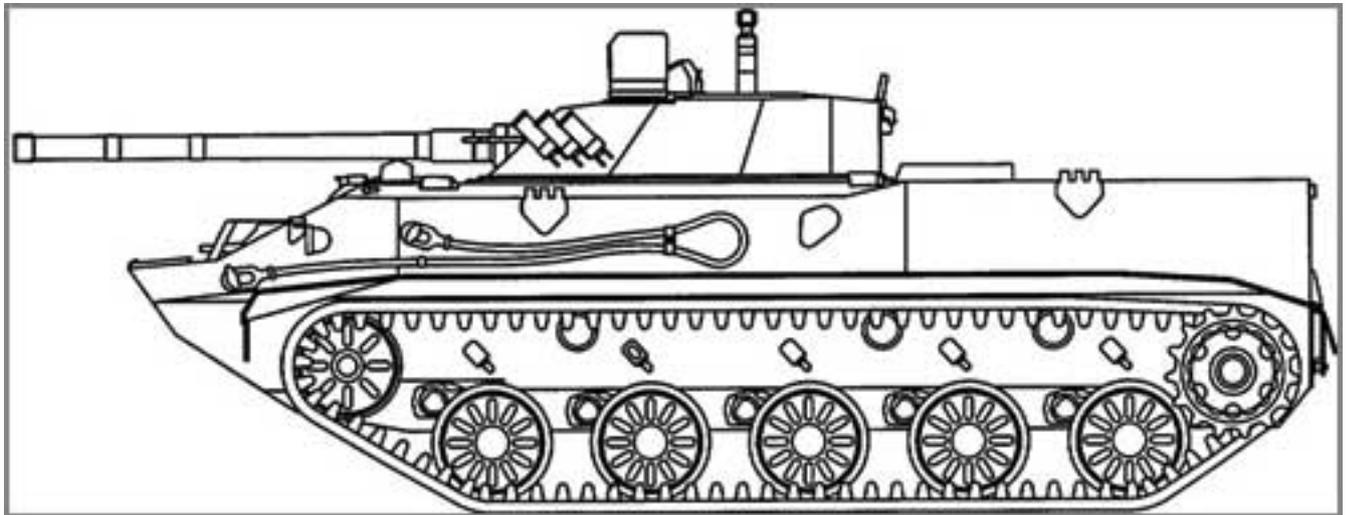


Рисунок 3.1 – Объект эксперимента

Таблица 3.1 – Параметры экспериментальной быстроходной гусеничной машины

Параметр	Значение
Масса	$14 \cdot 10^3$ кг
Удельная мощность	24.2 кВт/т
Угловая скорость поворота вокруг вертикальной оси	1.1 рад/с
Момент инерции вокруг вертикальной оси	$31.5 \cdot 10^3$ кг*м ²
Число осей опорных катков	5 шт.
Максимальная скорость	20 м/с
Сумма продольных координат	6,88 м
Коэффициент сопротивления уводу	240000Н/рад
Тип системы управления поворотом	Дифференциальный гидрообъёмный привод

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.

3.2 Комплекс измерительно–информационной аппаратуры

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 [15]. Регистрация и обработка экспериментальных данных осуществлялась посредством бортового информационно-измерительного комплекса на базе АЦП L-Card E14-440, разработанного на кафедре гусеничных машин ФГБОУ ВПО «КГУ». Комплекс включает:

- 14-разрядный аналого-цифровой преобразователь «L-Card 14-440» с регистрацией данных на notebook;
- тензометрические датчики;
- контактные токосъемники;
- датчики оборотов ИС445;
- датчики давления;
- датчики виброускорений ADXL, АНС, АТ, МП-95;
- датчики линейных и угловых перемещений;
- датчики угловых скоростей MURATA;
- бесконтактное приемо-передающее устройство.

Перечень определяемых параметров и диапазон их измерений приведены в таблице 3.2. Бортовой комплекс информационно-измерительной аппаратуры сертифицирован в установленном порядке.

Испытания проводились в соответствии с требованиями типовой методики № ПМ 806123 экспериментального определения и оценки поворотливости военных гусеничных машин, а также в соответствии с «Методикой проведения испытаний по определению характеристик поворотливости образца БТВТ с учетом особенностей комбинированного механизма поворота с ГОП» (проверки

на соответствие ОСТ ВЗ-6889-97) и методиками дополнительных проверок (разработанными ФГБОУ ВПО «КГУ»).

Таблица 3.2 – Перечень определяемых (регистрируемых параметров)

№	Наименование параметра	Обозначение параметра	Единица измерения	Диапазон измерения
1	Время	t	с	0...2000
2	Угловая скорость поворота	ω	град/с	± 60
3	Линейная скорость перематывания левой гусеницы	$V_{\text{лев}}$	м/с	0...22
4	Линейная скорость перематывания правой гусеницы	$V_{\text{пр}}$	м/с	0...22
5	Номер передачи	N	ед.	H, 1...4
6	Продольное линейное ускорение в носовой части	$g_{\text{прН}}$	м/с ²	$\pm 14,7$
7	Поперечное линейное ускорение в носовой части	$g_{\text{попН}}$	м/с ²	$\pm 14,7$
8	Продольное линейное ускорение в кормовой части	$g_{\text{прК}}$	м/с ²	$\pm 14,7$
9	Поперечное линейное ускорение в кормовой части	$g_{\text{попК}}$	м/с ²	$\pm 14,7$
10	Угол поворота штурвала	$\alpha_{\text{ш}}$	%	± 100
11	Перемещение педали подачи топлива	$S_{\text{пт}}$	%	0...100
12	Частота вращения вала двигателя	$n_{\text{д}}$	об/мин	0...2600
13	Температурный режим:			
14	ОЖ двигателя	$t_{\text{ож}}$	0С	0...120
15	Масла двигателя	$t_{\text{м дв}}$	0С	0...120
16	Масла трансмиссии	$t_{\text{тр}}$	0С	0...120
17	Температура окружающего воздуха	$t_{\text{окр.в}}$	0С	Датчик температуры П-1
18	Давление окружающего воздуха	$P_{\text{атм}}$	мм вод.ст.	Барометр
19	Относительная влажность атмосферного воздуха		%	Гигрометр психрометрический ВИТ-2

Температура окружающего воздуха во время испытаний составляла $t_{\text{окр}} = +5 \dots 8^{\circ}\text{C}$, атмосферное давление 760 мм рт. ст., относительная влажность 80%. Параметры силовой установки: температура ОЖ двигателя $100 \dots 120^{\circ}\text{C}$; температура масла двигателя $95 \dots 115^{\circ}\text{C}$.

Измерительные датчики были установлены в соответствии с требованиями указанных методик.

Испытания проводились при движении машины в типовых дорожно-грунтовых условиях. В частности, движение осуществлялось по укатанному грунту (коэффициент сопротивления повороту $\sim 0,65$), а также по дороге с твердым покрытием (бетон), по тестовой змейке, окружности заданного радиуса и по дороге со случайным изменением кривизны траектории. Поставленные задачи решались на основе статистической обработки осциллограмм.

3.3 Проведение экспериментальных исследований управления движением быстроходной гусеничной машины, статистическая обработка и анализ результатов

Результаты проведённых испытаний и их анализ

Определение параметров динамики управляемого движения осуществлялось при испытаниях машины на тестовой змейке.

Предельные скорости маневрирования объекта определялись при движении по траектории типа «змейка» с длиной полуволны ΔS , равной 20, 30, 40 метров. Фрагменты осциллограмм, характеризующих изменение кинематических параметров при движении по заданным траекториям (угла поворота штурвала, угловой скорости поворота, курсового угла и поперечных и продольных ускорений в носовой и кормовой частях корпуса) приведены на рисунках 3.2, 3.3.

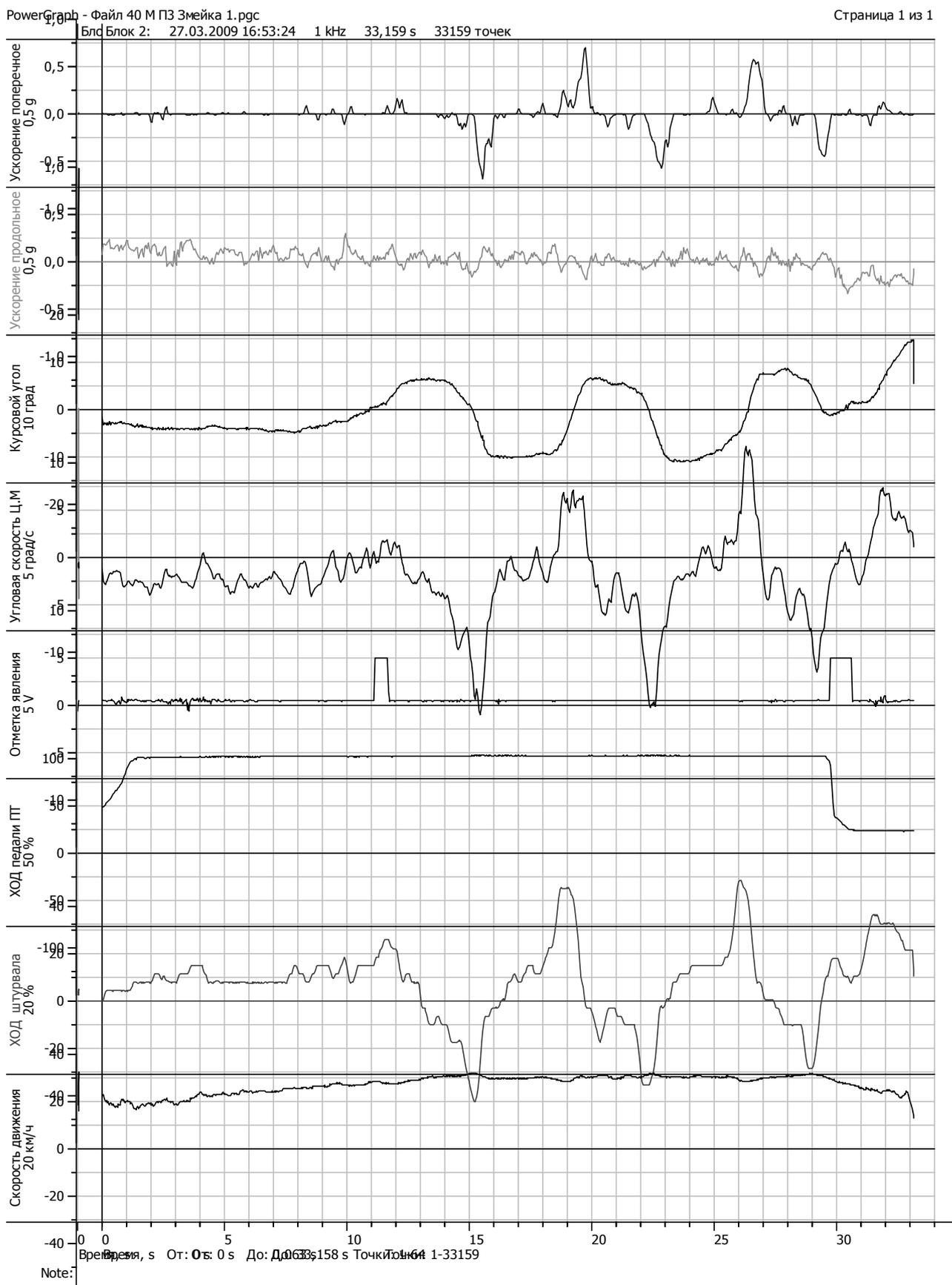


Рисунок 3.2 – Фрагмент осциллограммы с записью изменения кинематических параметров при движении по «змейке» (грунт, $\Delta S=40$ м)

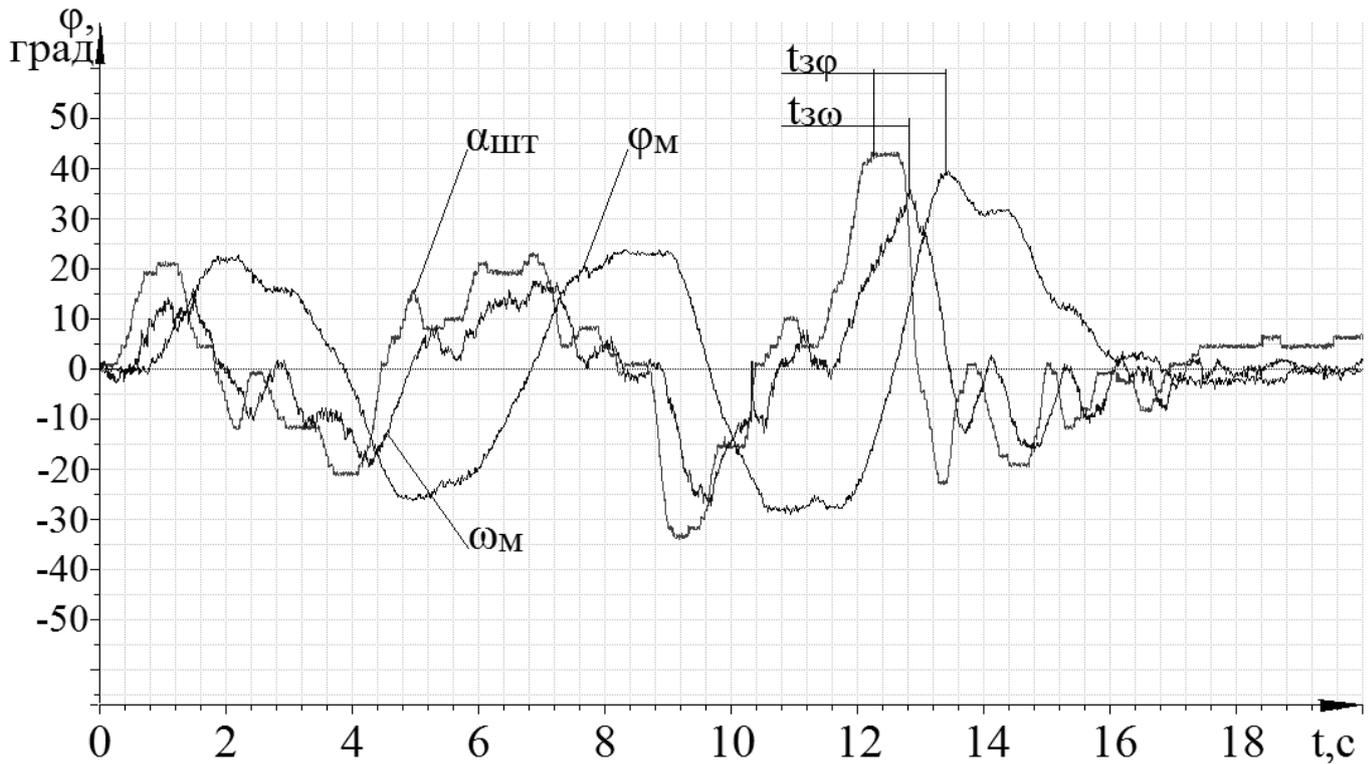


Рис. 3.3 – Фрагмент оциллограммы изменения параметров при движении по тестовой змейке

Из оциллограмм хорошо видно запаздывание реакции по угловой скорости на управляющее воздействие, а также фазовый сдвиг курсового угла на $\pi/2$ относительно угловой скорости. Полученные значения средних скоростей движения по «змейке» приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты определения зависимости средней скорости движения по змейке от длины полуволены траектории

Длина полуволены ΔS , м	Средняя скорость движения, км/ч
20	27.4
30	37.5
40	41.3

Из таблицы видно, что с увеличением длины полуволены траектории от 20 до 40 метров средняя скорость движения возрастает от 27,4 до 41,3 км/ч, что соответствует расчетным данным (35...45 км/ч).

Следует отметить, что скорость движения ограничивается не только в повороте, но и на прямолинейных участках траектории движения из-за быстрых

отклонений не компенсируемых водителем. Фрагмент осциллограмм с регистрацией отклонений угловой скорости и компенсирующего управления водителя, а так же спектры амплитуд колебательных процессов отклонений, приведены на рисунке 3.4. Из рисунка видно, что рост скорости движения приводит к повышению частоты процесса до значений, превышающих предельные возможности водителя.

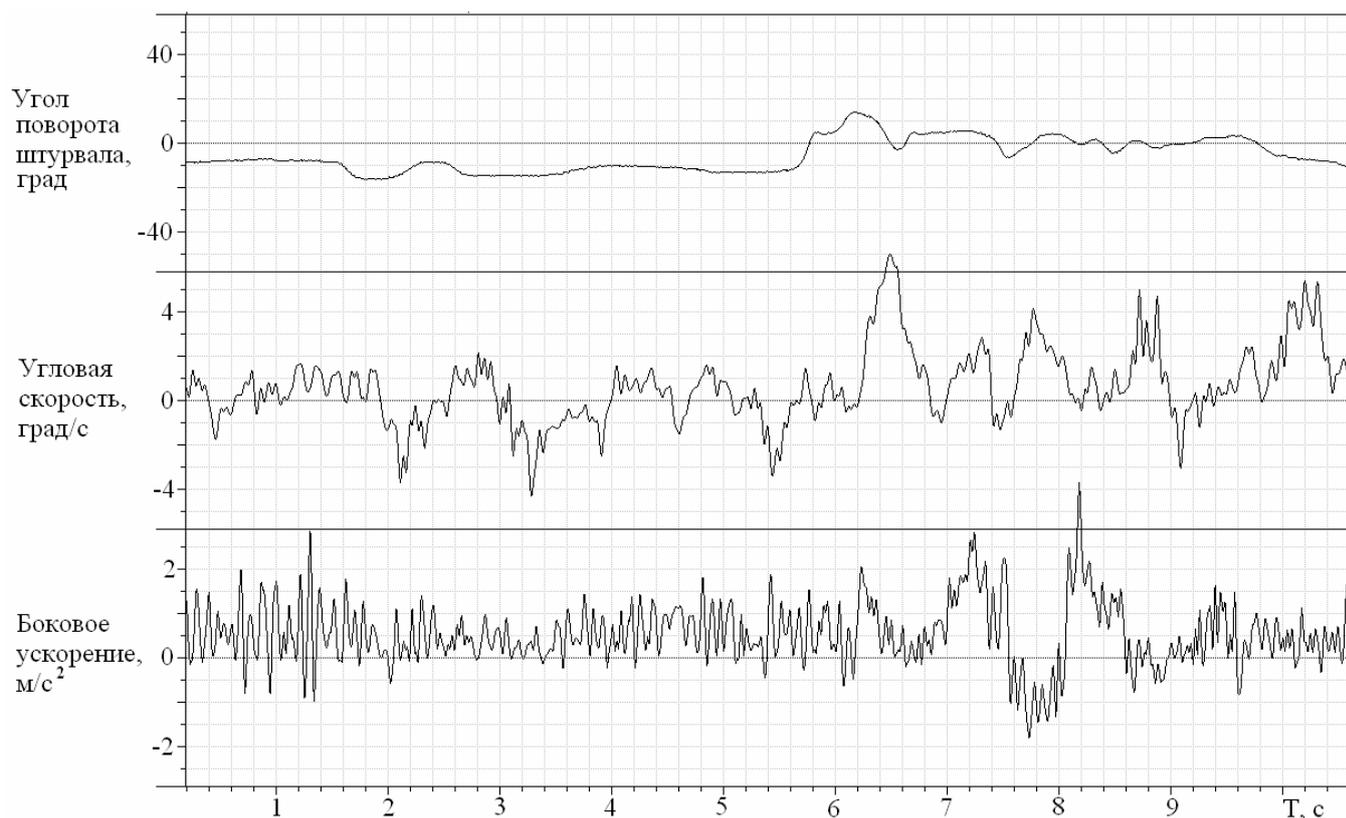


Рисунок 3.4 – Фрагменты реализации (вверху) угловой скорости, соответствующего компенсирующего управления, и спектры амплитуд процессов отклонений (внизу)

Результаты экспериментального исследования показывают, что при движении со скоростью $V > V_{KP}$ (30...32 км/ч) происходит случайное отклонение угловой скорости, которое определяется следующими факторами: собственными колебаниями, компенсирующим управлением водителя и возмущением внешней среды. Взаимная корреляция определяется тем, что возмущения внешней среды через опорные катки воздействует на корпус и зависит от кривизны траектории k , угловой скорости ω , а следовательно, и от управляющего воздействия $\alpha_{шт}$. Этим вызвано совпадение диапазона частот (0...1,0 Гц) локальных экстремумов

спектральных плотностей процессов отклонения S_{ω} угловой скорости и компенсирующего управления S_{α} при прямолинейном движении. При фильтрации спектральной плотности отклонения угловой скорости (исключения составляющей S_{α}) колебания происходят с доминирующей частотой равной собственной (1,6 Гц) и кратной ей (3,2; 7,8; 12,8 Гц). Остальные составляющие спектральной плотности можно рассматривать как «белый шум», формируемый взаимодействием с внешней средой. Энергия этого возмущения и поддерживает автоколебательный процесс.

Учитывая, что водитель компенсирует не отклонения угловой скорости, а интегральную величину отклонения направляющего угла $\Delta\Theta$, которая при сходимости спектра координаты и ее производной, среднеквадратическое отклонение направляющего угла определяется по формуле

$$\sigma^2_{\Delta\Theta} = \frac{1}{\pi\omega^2} \int_0^{\infty} S_{\omega} d\omega \quad (3.1)$$

При большей скорости движения управляющие действия водителя являются ошибочными и приводят к росту отклонения бокового угла и соответствующему снижению скорости движения по условиям вписываемости в ограниченный коридор. Числовые характеристики величины отклонения определяются по экспериментальным данным случайной функции отклонения угловой скорости. Экспериментально установлено, что цикличность включения системы управления поворотом достигает $N^*=48...52$ на километр пути при числе поворотов дороги от 2 до 5.

Оценка сходимости рассчитанных параметров с результатами экспериментов

На основе обрабатываемой осциллограммы (рисунок 3.2) установлено, что длительность запаздывания реакции $t_{3\omega}$, т.е. быстродействие СУП не зависит от скорости движения, а длительность переходного процесса с ростом скорости сокращается (рисунок 3.5), то есть возможен вывод, что с увеличением скорости легче управлять движением транспортной машины[21].

Однако, фактически это не так, и критерием сложности управления необходимо принять коэффициент фазовой напряженности регулирования направлением движения

$$K_{\varphi}(V) = \frac{\Psi_{\varphi}}{\pi} \quad (3.2)$$

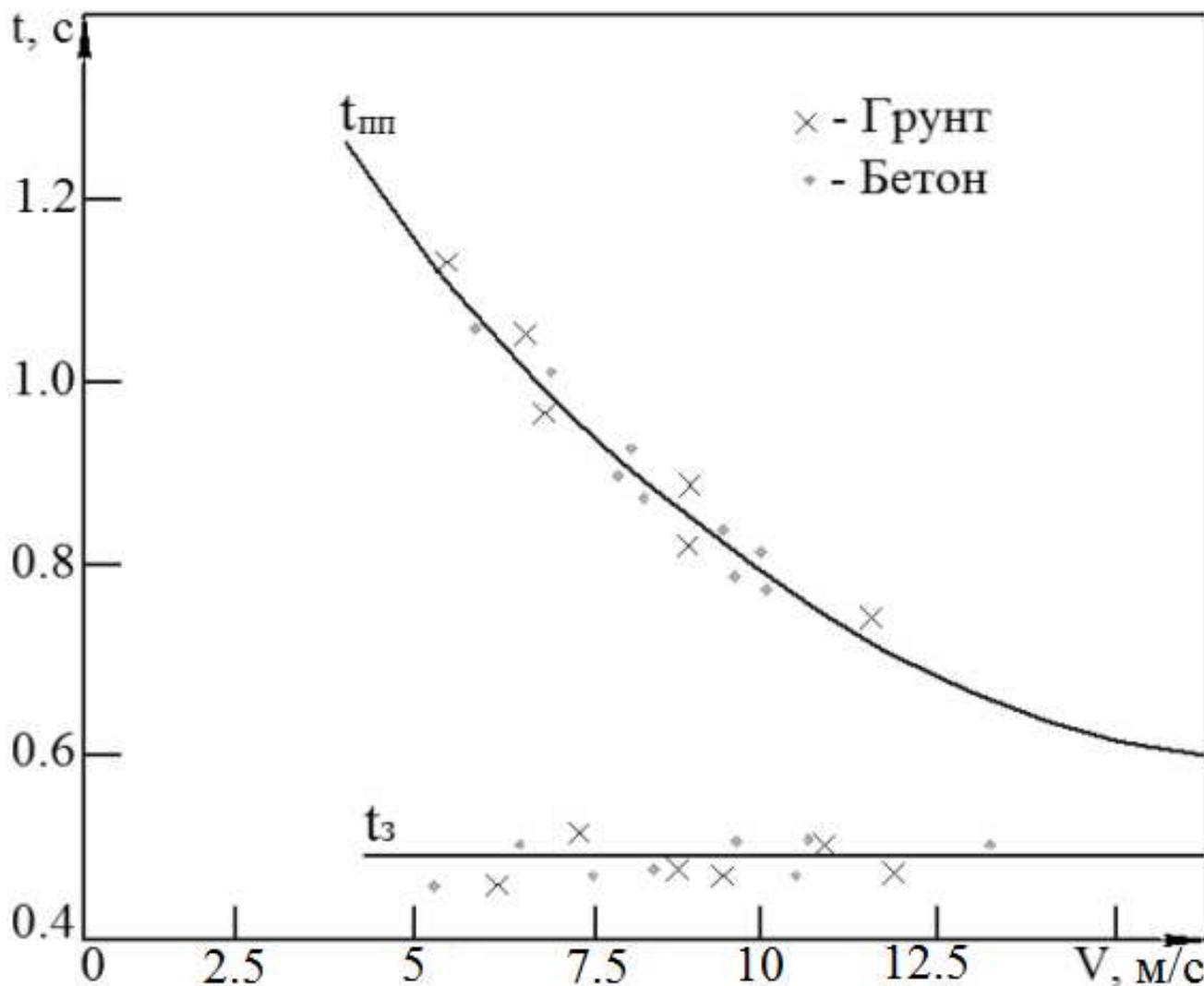


Рисунок 3.5 – Зависимость длительности процессов от скорости движения

Статистическая обработка экспериментальных данных, их сравнение с результатом расчетов позволяет сделать вывод о том, что физический процесс управляемого движения машины, адекватно описывается математической моделью. Однако реальный процесс является более сложным. Экспериментально подтверждено существенное запаздывание реакции машины на управляющее воздействие при переходных процессах входа в поворот и выхода из него (рисунок 3.3) [15]. Основные допущения, принятые при аналитическом

исследовании процессов являются корректными. На основе статистической обработки результатов построена зависимость коэффициента фазовой напряженности от скорости движения $K\phi(V)$ при фиксированных значениях длины волны ΔS приведенная на рисунке 3.6. Предельная скорость движения соответствует значению 0.75, при котором водитель может управлять направлением движения.

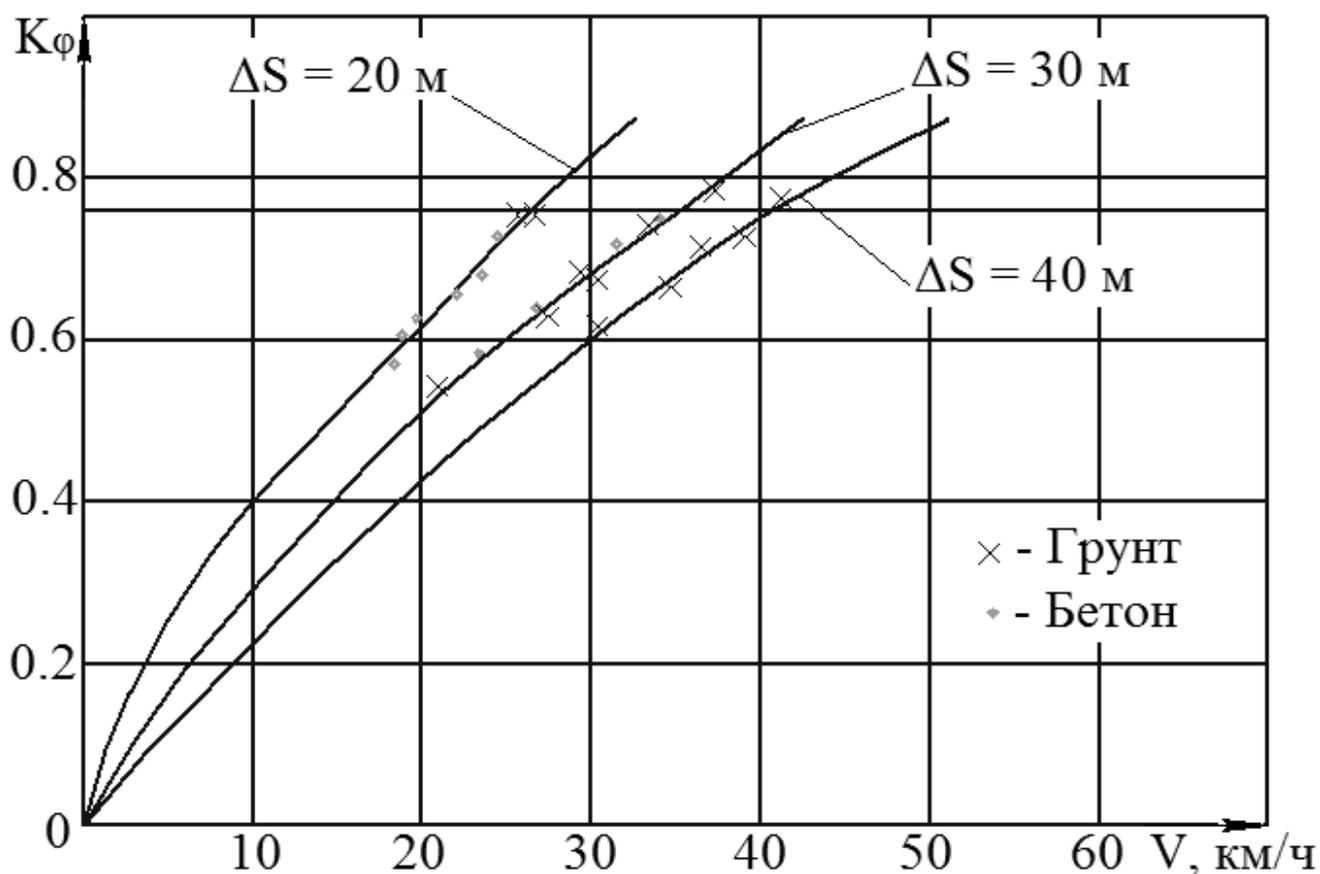
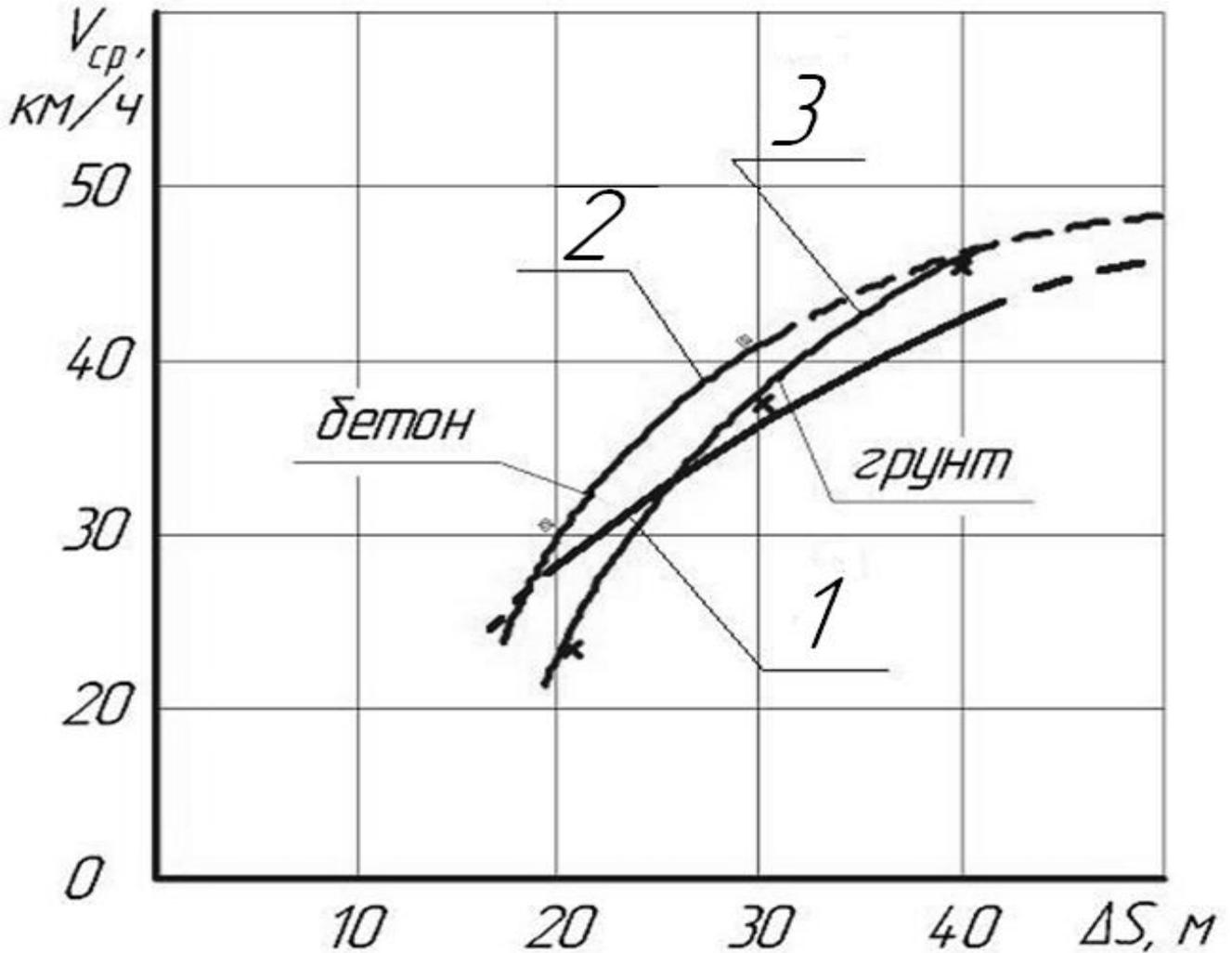


Рисунок 3.6 – Зависимость коэффициента фазовой напряжённости от скорости движения

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 3.7. Как показали эксперименты [15], 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.



1 – расчётная зависимость предельной скорости движения от длины волны тестовой «змейки»; 2, 3 – экспериментальная зависимость при движении по бетону и грунту соответственно

Рисунок 3.7 – Зависимость скорости движения от длины волны тестовой змейки

По этим данным построена зависимость предельной скорости движения от длины волны ΔS тестовой «змейки» (график 1, рисунок 3.7). На этом же рисунке приведены экспериментальные зависимости средней скорости движения от ΔS по бетону (график 2) и по грунту (график 3). Из сравнения данных следует, что

ограничение подвижности машины достаточно точно прогнозируется по коэффициенту фазовой напряженности.

Некоторое превышение ограничений можно объяснить обучаемостью водителя по созданию упреждающего управления при движении по тестовой трассе. При движении по дорогам со случайным изменением направления движения совпадение графиков 1 и 2, 3 может быть более близким.

Из экспериментальных данных следует, что на трассах с интенсивным изменением кривизны траектории, на тестовых «змейках», реализация потенциальных скоростных качеств ограничивается условием вписываемости в заданный коридор. Эти отклонения траектории от заданной, вызваны фазовым отставанием реакции на управляющее воздействие. Для движения без снижения скорости водителю необходимо интуитивно создавать соответствующее упреждающее управление. Поэтому скорость движения при первом проходе «змейки» (без тренировки водителя) составляет 30...40 % средней скорости, определяемой при 4 – 6 заездах.

Предельная скорость движения соответствует значению $K_f(V)=0.75$, при котором водитель в принципе может управлять направлением движения. По этим данным определена зависимость предельной скорости движения от длины волны ΔS тестовой «змейки». Из сравнения этой зависимости с экспериментальными данными средней скорости движения от ΔS по бетону и по грунту следует, что ограничение подвижности машины достаточно точно прогнозируется по коэффициенту фазовой напряженности.

В результате проведенных испытаний среднее значение времени быстрогодействия системы управления поворотом составило 0,19 с, что соответствует требованиям ОСТ ВЗ-6889-97 (не хуже 0,2 с).

Также была проведена оценка длительности переходного процесса, которая определялась от момента достижения штурвалом заданного фиксированного отклонения от нейтрального положения до момента достижения установившегося значения угловой скорости поворота изделия. Отмечено, что с

ростом скорости движения машины длительность переходного процесса уменьшается с 0,6..1,2 с до 0,30...0,35 с.

Оценка влияния динамических эксплуатационных факторов на процесс движения

Анализ результатов экспериментального исследования динамики управляемого движения гусеничной машины показывает, что процесс прямолинейного движения сопровождается существенными колебаниями корпуса машины относительно вертикальной оси. На деформируемом грунте колебания корпуса происходят относительно гусениц без перемещения траков в боковом направлении. При движении по дорогам с малодеформируемым основанием и низкими сцепными свойствами связи гусениц с грунтом становятся неустойчивыми. В этих условиях наблюдаются боковые перемещения траков с существенной амплитудой случайного характера, что приводит к отклонению направляющего угла в диапазоне частот 0 – 12 Гц. Предельные же возможности водителя по компенсации быстрых отклонений не превышают 0.5 – 0.8 Гц [23]. Росту амплитуд угловых отклонений способствует также снижение сцепных свойств при высоком уровне вибронегативности гусеничного движителя в спектре частот до 140 Гц. В связи с этим для вписывания в ограниченный коридор водитель снижает скорость.

Формирование указанных колебаний зависит от множества факторов, в том числе таких, как присущие системе нелинейности, случайные возмущения со стороны дороги, гироскопические моменты, вызванные «шимми» опорных катков, управляющие компенсирующие действия водителя и многое другое.

Наиболее вероятными причинами могут служить повышенная асимметричность линейной податливости гусениц с резинометаллическим шарниром отдельных бортов и флуктуация боковых сил, формируемая параметрическими колебаниями опорных катков и изменением температурного режима шин. При входе машины в поворот асимметричность системы возрастает, так как длина рабочей ветви гусеницы отстающего борта, а соответственно и податливость, увеличиваются. Различия жёсткости элементов механической

системы может возбуждать автоколебания, а при периодически изменяемой жёсткости – и колебания параметрические.

При прямолинейном движении упругая характеристика определяется свойствами валов, соединяющих трансмиссию с бортовыми редукторами. По условиям компоновки трансмиссии эти свойства асимметричны. Асимметричность упругости приводит к развороту машины и появлению автоколебаний угловой скорости корпуса при прямолинейном движении с ограниченной амплитудой. Для компенсации возникающих отклонений водитель создаёт соответствующее компенсирующее управление. При этом ведущее колесо отстающего борта переходит из режима тяги в тормозной. Длина рабочей ветви отстающего борта, а соответственно и податливость, увеличиваются в 6–7 раз, т.е. асимметричность упругой характеристики возрастает, что приводит к увеличению амплитуды автоколебаний.

В принятой модели (2.1) боковые силы определяют демпфирование в системе и устойчивость её движения, а формируются они в соответствии с гипотезой о боковом уводе шин опорных катков. Как показали проведённые эксперименты [31], движение машины по ровной дороге с малодеформируемым основанием (бетон, скальный, мёрзлый грунт) сопровождается параметрическими колебаниями опорных катков из-за переменной жёсткости упругого взаимодействия шин с обрешеченной беговой дорожкой гусеницы (рисунок 3.8). Эти результаты отличаются от известных условий устойчивости движения по критерию Раусса – Гурвица, полученных для линеаризованной модели при определённых значениях боковых сил.

Колебания опорных катков приводят к периодическому изменению нормальной нагрузки вплоть до отрыва катков от опорной поверхности гусеницы. Недостаток нагрузки, как и перегрузка, приводит к вариации коэффициента увода и смещению машины в боковом направлении [3].

Фрагмент результатов определения вертикальных осцилляций первого и среднего опорных катков приведён на рисунке 3.8. Параметрические колебания опорных катков из-за переменной жёсткости упругого взаимодействия шин с

обрезиненной беговой дорожкой гусеницы формируют флуктуацию боковых сил, ограничивающих устойчивость движения машины [19].

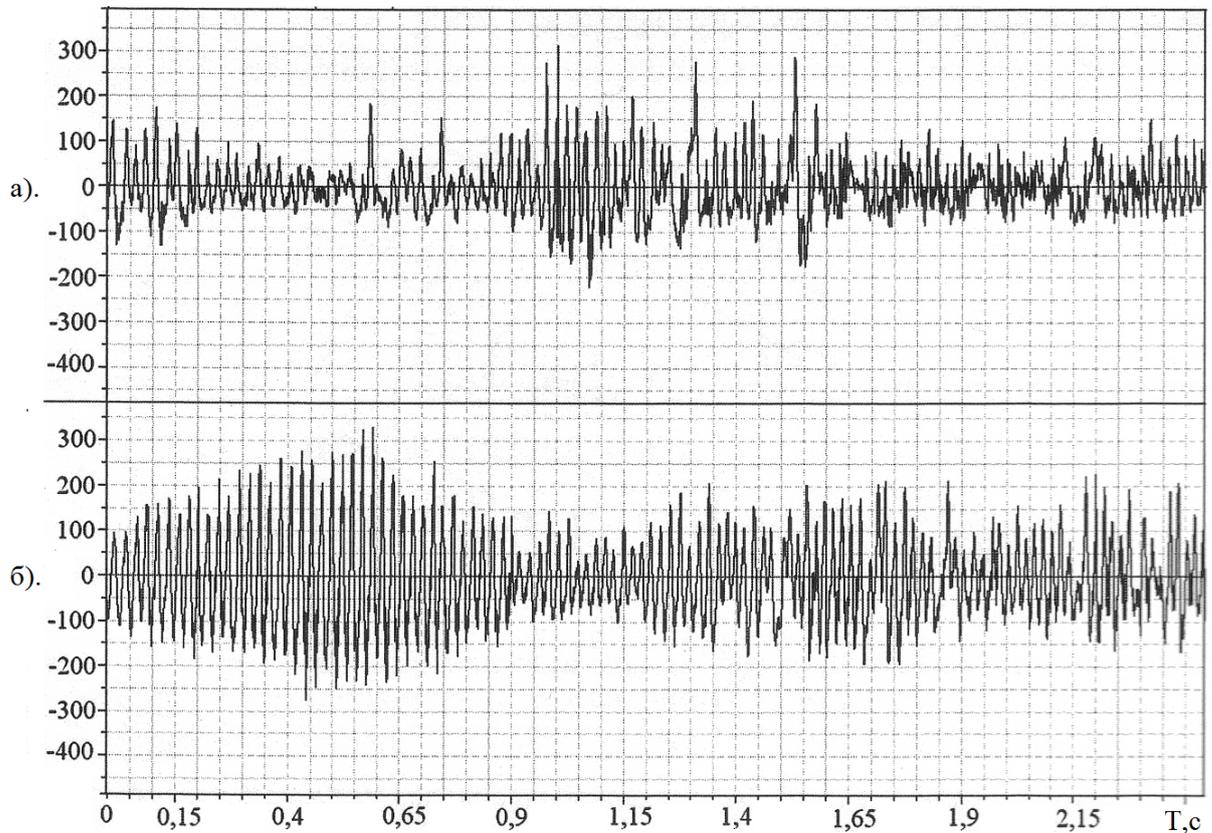


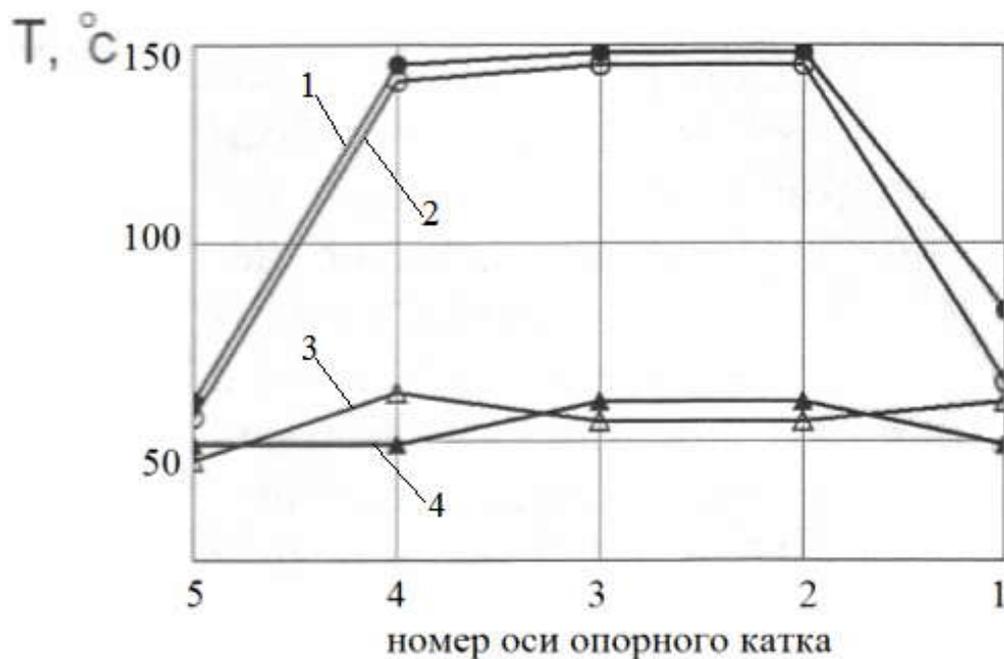
Рисунок 3.8 – Фрагмент осциллограммы изменения виброускорения на балансирах опорных катков: а) первого, б) среднего

Другой эксплуатационный фактор, дестабилизирующий расчётное значение коэффициента сопротивления увода, – существенное изменение температуры шин. Нагрев шин вследствие выделения теплоты от внутреннего трения при упругой деформации зависит от размера шин, свойств упругих материалов, характера крепления к бандажу, а также напряжённости их работы – давления в контакте и скорости. В существующей теории движения гусеничных машин учёту зависимости коэффициента увода от температуры не уделяется должного внимания. Однако, как показано ниже, температурный фактор, перегрев шин, существенно влияют на устойчивость движения.

Температура внутренних слоёв шин измерялась специальным прибором. 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 (рисунок 3.9).

Температура шин отдельных 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 катков одной условной оси достигает 100°C . Неравномерность нагрева шин вызвана характером распределения нагрузки между опорными катками, а также – между шинами двухрядного опорного катка и условиями теплопередачи (условия теплопередачи внутренней шины значительно отличаются от наружной). Повышение температуры шин приводит к изменению их эластичных свойств, а соответственно и к снижению коэффициента увода. Процесс нагрева шин аperiodический и распределён во времени. Так как коэффициенты увода опорных катков существенно отличаются, то в дальнейшем

при расчётах в выражении $\sum_{i=1}^n C_{yi} l_i^2$ коэффициент увода принимаем как функцию температуры, то есть $C_{yi}(\Delta T)$.



1 – левый борт, внутренние шины катков; 2 – правый борт, внутренние шины катков; 3 – левый борт, наружные шины катков; 4 – правый борт, наружные шины катков;

Рисунок 3.9 – Результаты измерения температуры внутренних слоёв шин опорных катков после 66 км пробега

3.4 Выводы

Результаты проведенных экспериментальных исследований динамики управляемого движения быстроходной гусеничной машины, статистической обработки позволяют сделать следующие основные выводы:

1 – Определенные параметры управляемого движения показывают, что действительный процесс движения является более сложным по сравнению с принимаемым при расчете.

2 – Быстродействие системы управления поворотом с ростом скорости повышается с 1,2 с при $V=5...7$ м/с до 0,2 при $V=17...20$ м/с. Наряду с отставанием по фазе реакция машины происходит с запаздыванием. Длительность запаздывания не зависит от скорости и составляет 0,18...0,20 с.

3 – Качество переходных процессов при движении по тестовой змейке соответствует расчетным, т.е. происходит с фазовым отставанием.

4 – Прогнозирование скорости движения по коэффициенту фазовой напряженности дает удовлетворительные результаты – заниженные на 5...7 % при движении по бетону и несколько завышенные при движении по деформируемому грунту.

5 – Параметрические колебания опорных катков из-за переменной жёсткости упругого взаимодействия шин с обрезиненной беговой дорожкой гусеницы формируют флуктуацию боковых сил, ограничивающих устойчивость движения машины.

6 – Повышение температурного режима шин опорных катков существенно повышает их эластичность, что снижает коэффициент увода и ограничивает скорость машины.

4 ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

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

4.1 Сопоставление результатов теоретического и экспериментального исследования

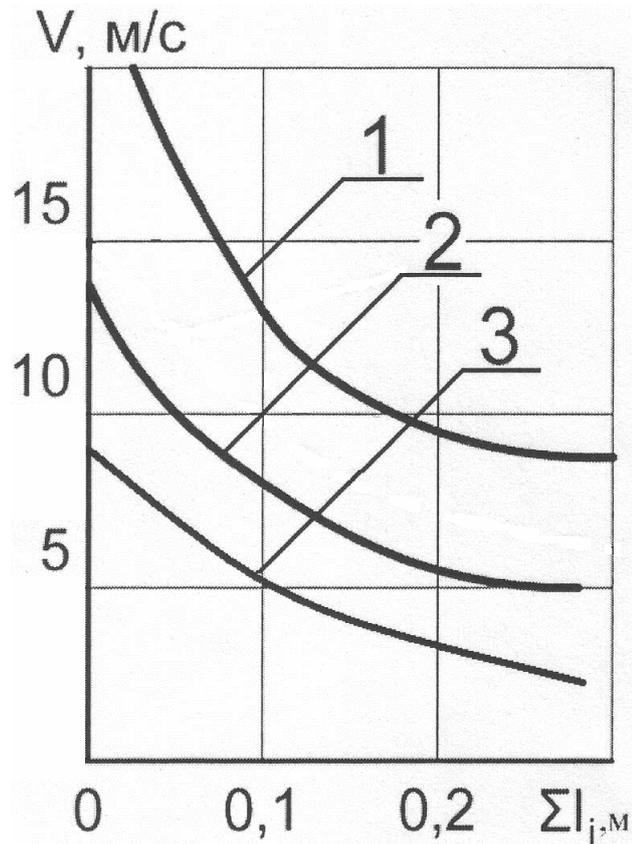
Верификация экспериментально полученных данных и скорректированной математической модели плоскопараллельного движения БГМ

На основе сопоставления теоретического и экспериментального исследования делается вывод о необходимости корректировки математической модели введением динамически изменяющихся параметров. Применительно к системе (2.1) эволюция которой представляет собой диффузионный марковский процесс, обосновано исследование устойчивости на основе применения функции Ляпунова [19].

Повышение температуры шин приводит к изменению их эластичных свойств, а соответственно и к снижению коэффициента увода. Процесс нагрева шин апериодический и распределён во времени. Так как коэффициенты увода опорных катков существенно отличаются, то в дальнейшем при расчётах в выражении $\sum_{i=1}^n C_{yi} l_i^2$ коэффициент увода принимается как функция температуры – $C_{yi}(\Delta T)$. Дифференциальное уравнение вращательного движения машины, применяемое при моделирование в данной работе, приводится к виду:

$$I_z \cdot \ddot{\phi} + \frac{\dot{\phi}}{\nu} \cdot \sum_{i=1}^n C_{yi}(\Delta T) \cdot l_i^2 + 0.5 \cdot C_{ПП} \cdot \phi = M_{П}, \quad (4.1)$$

Влияние температуры шин опорных катков на предельную по устойчивости скорость проиллюстрировано на рисунке 4.1. График 1 функции скорости равномерного движения от суммы продольных координат осей опорных катков относительно поперечной оси – построен по существующему уравнению [6] при одинаковой упругости рабочих ветвей гусениц, без учёта $C_{yi}(\Delta T)$.



1 – симметричная характеристика упругости, 2 – асимметричная характеристика упругости ($\Delta T = 80^\circ\text{C}$), 3 – асимметричная характеристика упругости ($\Delta T = 150^\circ\text{C}$)

Рисунок 4.1 – Зависимость критической по устойчивости скорости движения от суммы продольных координат опорных катков при разных температурах

При асимметричной характеристике упругости и $\sum_{i=1}^n l_i > 0$ и максимальной температуре шин 80°C скорость ограничивается больше, чем известно (график 1, 2 на рисунке 4.1). Также она может ограничиваться при $\sum_{i=1}^n l_i < 0$ в случае с машинами с ограниченной длиной опорной поверхности. График 3 отличается от графика 2 тем, что при расчёте принята максимальная температура шин

$\Delta T=150^{\circ}\text{C}$ (она находится на границе допустимой). Из этого следует вывод, что температура шин опорных катков существенно влияет на устойчивость движения.

Параметрические колебания опорных катков из-за переменной жёсткости упругого взаимодействия шин с обрешеченной беговой дорожкой гусеницы формируют флуктуацию боковых сил, ограничивающих устойчивость движения машины.

Повышение температурного режима шин опорных катков существенно повышает их эластичность, что снижает коэффициент увода и ограничивает скорость машины. При максимальной температуре шин, равной 80°C скорость ограничивается больше на 20%, чем по критерию Раусса-Гурвица. При дальнейшем росте температуры шин, достигающей 150°C , скорость ограничивается ещё в большей степени.

Колебания массы гусеничной машины, достигающие амплитуды 30%, рассмотренные в главе 2, оказывают серьёзное влияние на управляемость, но могут быть учтены в процессе движения посредством их динамического отслеживания и соответствующей корректировки применяемой модели вращательного движения. Для этого момент инерции машины вокруг вертикальной оси принимается как функция массы – $I_z(\Delta m)$. С учётом всех приведённых нелинейностей, вращательное движение транспортной машины вокруг вертикальной оси, представленное дифференциальным уравнением, которое используется при моделировании в данной работе, приводится к виду:

$$I_z(\Delta m) \cdot \ddot{\phi} + \frac{\dot{\phi}}{\nu} \cdot \sum_{i=1}^n C_{yi}(\Delta T) \cdot l_i^2 + 0.5 \cdot C_{ПП} \cdot \phi = M_{П}, \quad (4.2)$$

Компьютерная модель системы позволяет учесть эти нелинейности. Для этого её можно дополнить модулями, изменяющими параметр массы и температуры опорных катков в процессе моделирования.

Анализ компонентного состава перспективной системы управления движением быстроходной гусеничной машины

По результатам проведённых исследований, с учётом предыдущих изысканий [41,43,44,46,47,48], были определены перспективные направления

автоматизации системы управления движением быстроходной гусеничной машины:

1) реализация регулятора, способного корректировать свои коэффициенты в соответствии с изменяющимися характеристиками БГМ и условиями внешней среды, повышающего свою эффективность в процессе применения;

2) разработка блока идентификации, предназначенного для определения управляемости БГМ и типа задающего воздействия;

3) Определение того, является ли движение управляемым или же – нет, и, в том случае, если движение не является управляемым, произвести его автоматической коррекции.

Создание программно-аппаратного комплекса, реализующего решения данных задач, позволит повысить быстроходность и управляемость в процессе прямолинейного движения и поворота БГМ.

Необходимость создания системы классификации управляющих воздействий водителя БГМ обусловлена тем, что, в зависимости от того, какой тип движения необходимо обеспечивать в конкретный момент времени, переходная характеристика системы должна быть определена для высокой скорости процессов или же – для отсутствия перерегулирования [42], в зависимости от типа предлагается производить программное переключение контроллера между регуляторами, подобная структурная схема приведена на рисунке 4.2.

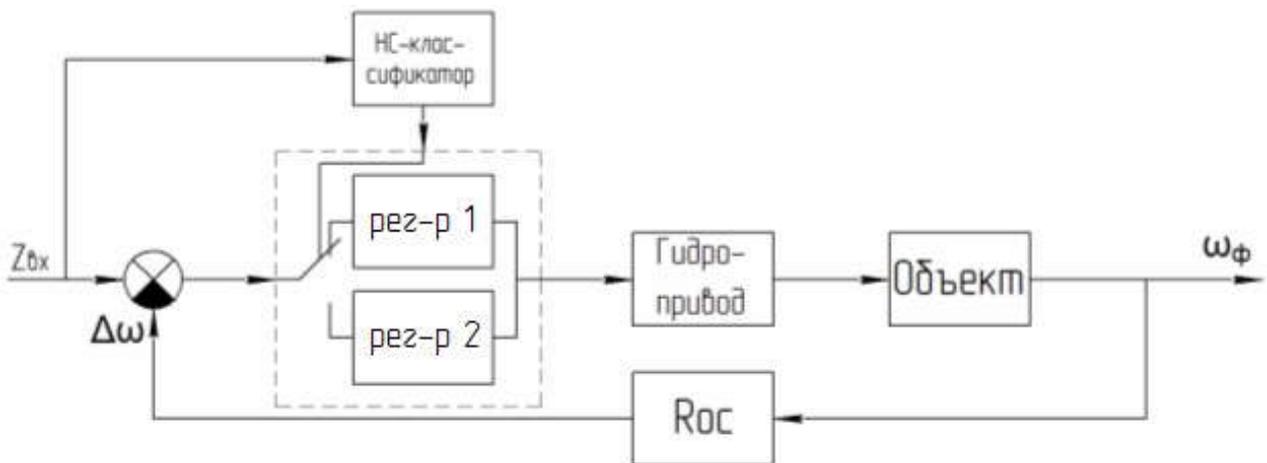


Рисунок 4.2 – Схема системы управления, содержащей блок НС-классификации

Для решения задачи классификации воздействия водителя были использованы сигналы и их производные, поступающие с датчика штурвала на вычислительный блок. Для разделения сигналов использованы нейронные сети встречного распространения Кохонена-Гроссберга[3]. Обучающее множество для моделирования формировалось таким образом, чтобы в него входили задающие воздействия прямолинейного движения, процесса поворота, различные корректировки, производимые водителем при определении курсового угла. Всего было сформировано две тысячи обучающих векторов, состоящих из данных о величине угла поворота штурвала и том, к какому типу относится это задающее воздействие.

После первого этапа обучения была получена классификационная сеть, которая разделила все поступающие сигналы на 11 классов[4]. На выходе были определены три группы сигналов, соответствующие прямолинейному движению, подруливанию и процессу поворота. Эффективность обучения составила 84%.

Важным перспективным компонентом является предложение по повышению робастности системы управления движением быстроходной гусеничной машины введением в неё анализатора реакции на воздействия и корректировки параметров регулирования [26]. Основная идея заключается в том, чтобы, по данным об управляющем воздействии и реакции машины на него, производить корректировку основных коэффициентов существующего регулятора для повышения эффективности системы. ИНС была выбрана в качестве основы для решения этой задачи по ряду причин. Во-первых, в общем случае зависимости реакций машины от управляющих воздействий водителя являются нелинейными, как и связи системы «машина – внешняя среда». Во-вторых, динамика процесса движения требует высокой скорости вычисления параметров регулирования, так как исходные данные сохраняют свою актуальность малый временной интервал. Нейронные сети, а, в данном случае, двухслойный персептрон, обладает необходимыми характеристиками. Предлагается модель системы с shaper-фильтром и строится структурная схема адаптивной системы (рисунок 4.3), причём на вход её нейросети подаются информация о задающем

воздействии и реакция БГМ на него. Было также предусмотрено звено чистого запаздывания для устранения временного рассогласования между сигналами, образованное собственными характеристиками машины.

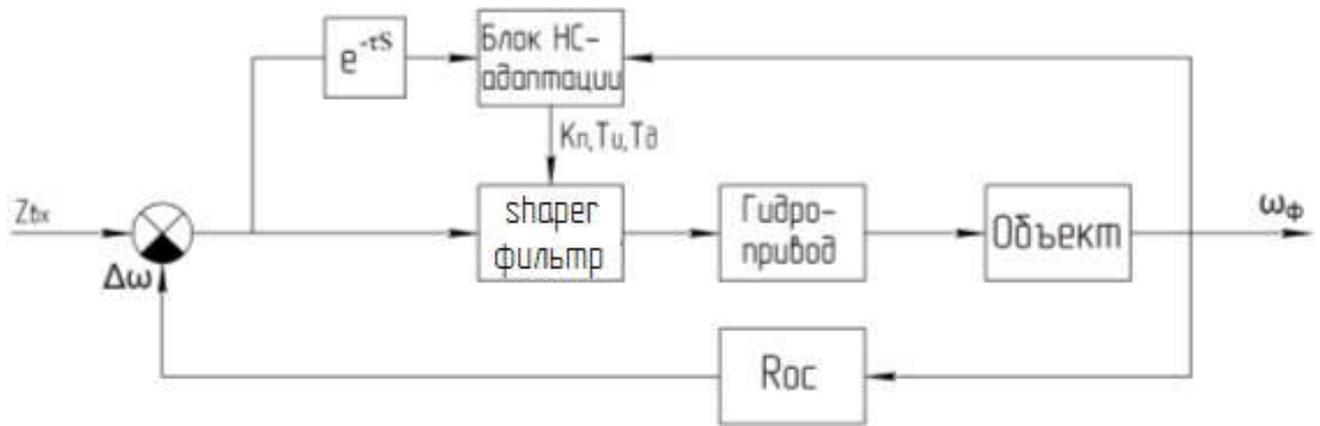
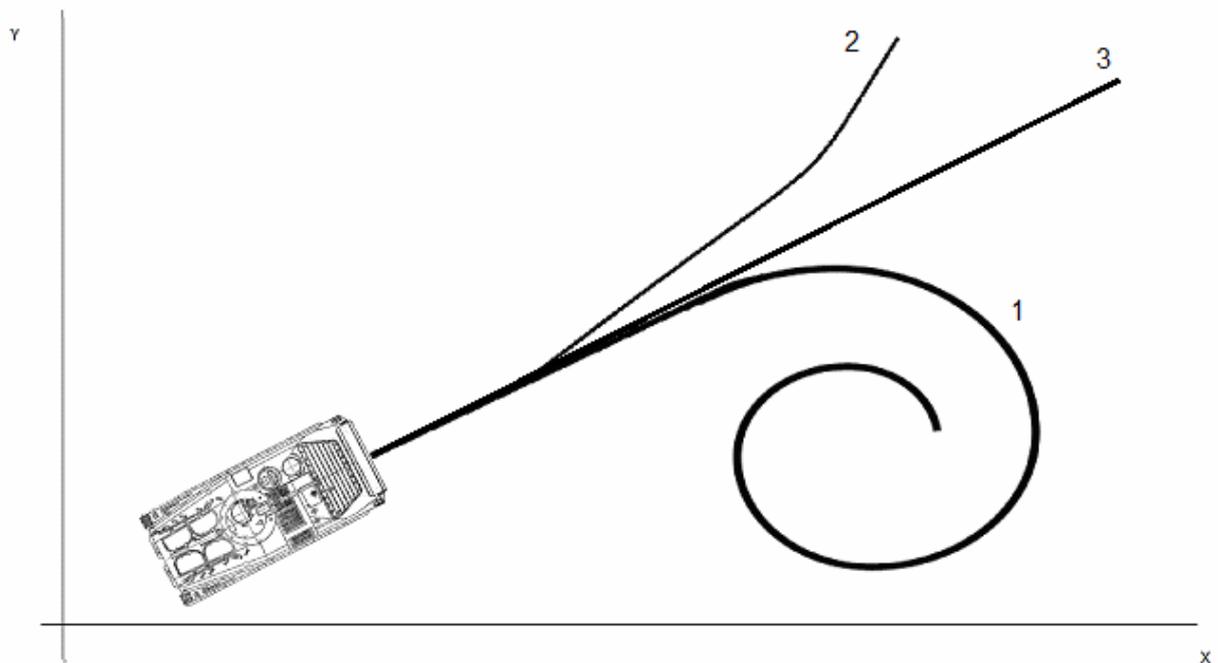


Рисунок 4.3 – Схема системы управления, содержащей блок нейросетевой адаптации

В процессе поворота, гусеничная машина может попасть в занос или снос (рисунок 4.4), то есть произойдёт потеря управляемости, в том случае, если угол поворота машины и её скорость были определены неверно для данной кривизны траектории. Задание этих параметров является сложной задачей, решаемой в динамическом режиме, и получение верных значений, не требующих дополнительных управляющих воздействий, возможно только водителями высокого уровня подготовки. В связи с этим, перспективным представляется решение задачи идентификации и восстановления управляемости в автоматическом режиме.

Для решения предлагается построение нейронной сети Кохонена-Гроссберга, определяющей типы неуправляемого движения по управляющему воздействию и реакции БГМ на него. В том случае, если будет идентифицирован снос или занос, управление будет передано блоку восстановления управляемости, программно реализованному в вычислительном комплексе. Алгоритм предполагается реализовать однозначным образом на основе жёсткой логики. После перехода машины в управляемый режим, контроль будет передаваться водителю. Структурная схема подобной системы приведена на рисунке 4.5.



неуправляемые – 1 – занос, 2 – снос; 3 – управляемое, прямолинейное

Рисунок 4.4 – Виды движения

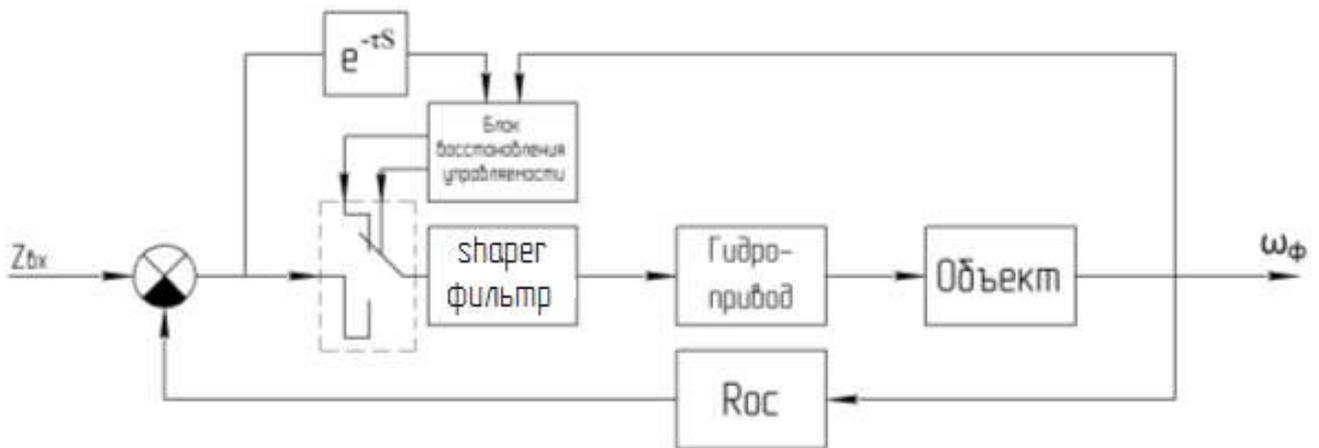


Рисунок 4.5 – Схема системы управления, содержащей блок восстановления управляемости

Произведённое определение отдельных компонентов перспективной системы управления движением быстроходной гусеничной машины позволит, в дальнейшем, проработать каждое из направлений и скомпоновать информационную систему управления нового поколения на основе инновационных подходов. Представлены промежуточные результаты по их реализации и перспективные направления для их дальнейшего синтеза.

Прогнозирование подвижности и оценка скоростных характеристик БГМ при движении по тестовой змейке

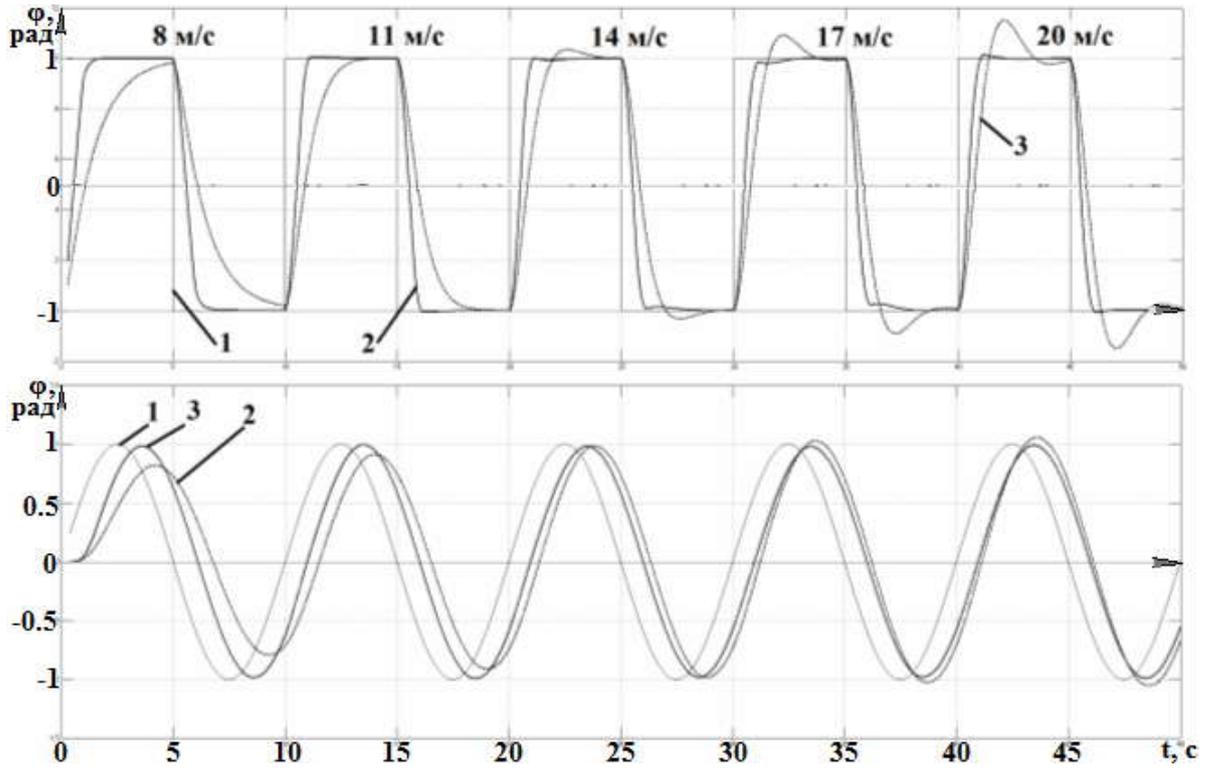
Моделированием установлено, что при скорости $V > 15$ м/с необходимо повышать динамику движения и подавление колебаний. Соответственно, вычислительный блок управления движением должен быть дополнен логическим идентификатором скорости для обеспечения нелинейного закона регулирования.

Модель процесса вращательного движения машины вокруг вертикальной оси дополнена чистым запаздыванием между задающим воздействием водителя и реакцией гусеничной машины на него для приближения модели к реальному объекту [27]. На полученную систему подавались единичные ступенчатые воздействия – для определения перерегулирования и гармонические колебания – для оценки фазового отставания. Влияние скорости на алгоритм автоматизированного управления оценивалось путём её изменения от 8 м/с до 20 м/с с шагом в 3 м/с. Результаты моделирования приведены на рисунке 4.6.

На участках низкой скорости запаздывание системы сокращается на 39% относительно исходного значения. Время переходного процесса меньше в два раза, а перерегулирование отсутствует. На высокоскоростных участках происходит уменьшение фазового запаздывания в системе с shaper-фильтром, одновременно с этим, перерегулирование также уменьшается с 17% до 1% и время, за которое сигнал попадает в пятипроцентную зону около итогового значения так же уменьшается в два раза.

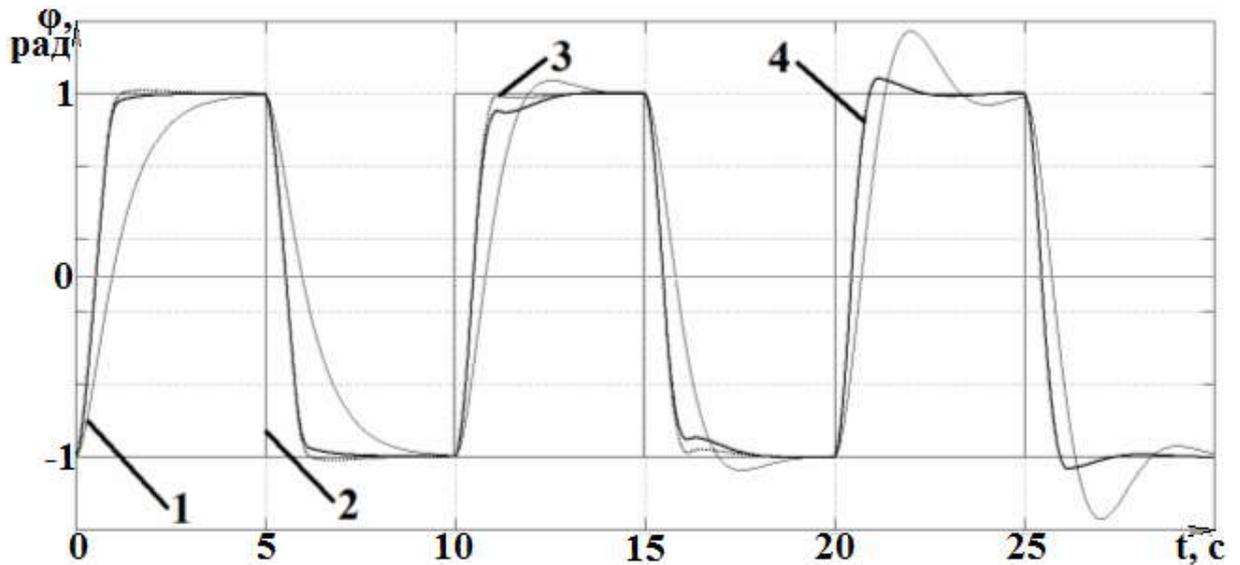
Так как измерения скорости в процессе движения быстроходной гусеничной машины могут сопровождаться ошибками, вызванными недетерминированностью поверхности движения, была произведена оценка качества функционирования адаптивной системы с ZVD-shaper-фильтром при моделировании отклонения измеряемой скорости от фактической [17]. Целью данного опыта было определить влияние на применяемый алгоритм ошибок измерения исходной информации. Был взят диапазон скоростей от 10 до 20 м/с, а величина ошибок измерения составляла до 20% от фактической скорости. Процесс моделирования представлен на рисунке 4.7 – исследовалось влияние

ошибок на трёх скоростях движения машины: 10, 15 и 20 м/с.



1 – задающее воздействие, 2 – реакция исходной системы, 3 – реакция системы с sharp-фильтром

Рисунок 4.6 – Зависимость перерегулирования и фазового запаздывания от скорости БГМ

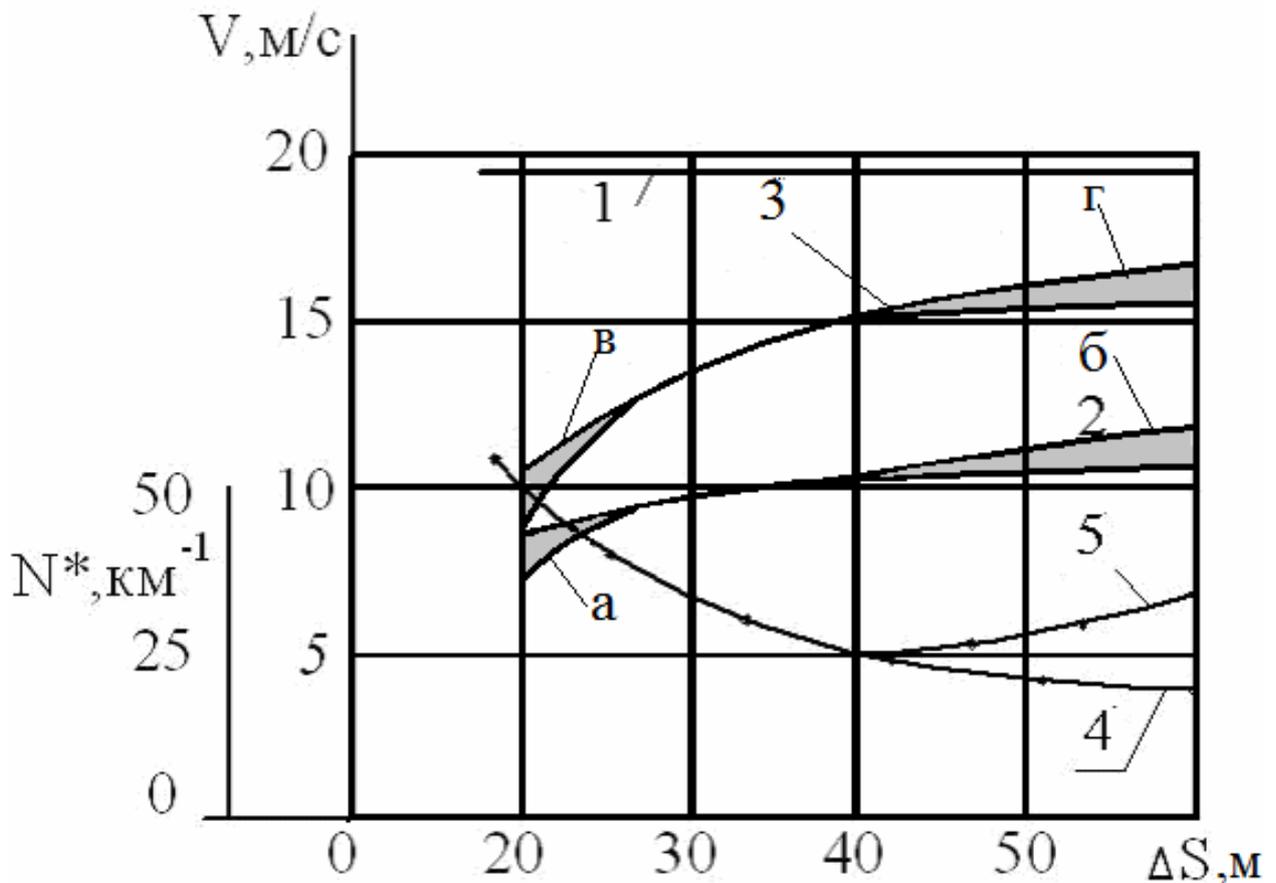


1 – задающее воздействие, 2 – реакция системы без фильтра, 3 – реакция sharp-фильтра без ошибок измерения скорости, 4 – реакция фильтра с ошибками измерения до 20% от величины сигнала

Рисунок 4.7 – Влияние ошибок измерения на качество переходных процессов

Как видно из полученных графиков – ошибки измерения данных скорости оказывают влияние на эффективность алгоритма фильтрации, однако, даже при 20% отклонении фактической величины от измеряемой, такая система управления с ZVD-shaper-фильтром оказывается эффективнее исходной системы.

По результатам расчётов строятся графики изменения кинематических параметров при движении по «тестовой змейке» (рисунок 4.8). На основе этих данных и имитационного моделирования движения машины производится расчёт скорости движения как наименьшей по вышеприведённым ограничениям [31].



1 – кинематически возможная скорость по двигателю; 2 – предельная скорость по фазовой частотной характеристике с ПИД-регулятором; 3 – предельная скорость с применением shaper-фильтров; 4 - расчетное значение цикличности включений

СУП; 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 4.8 – Анализ результатов исследования

Линия 1 соответствует кинематически возможной скорости движения, в соответствии с тяговой характеристикой составляет 20 м/с. График 2 характеризует предельную скорость движения при ограничении по фазовой частотной характеристике (как функция скорости от длины полуволны направляющей синусоиды ΔS , когда число включений СУП соответствует числу поворотов дороги (график 4). При движении гусеничной машины со скоростью свыше 11...14 м/с действительное число включения СУП возрастает (график 5). В связи с этим, экспериментальная зависимость $V(\Delta S)$ проходит ниже расчетной кривой 2, образуя зоны (а) и (б). График 3 соответствует данным, полученным при моделировании с предлагаемым регулятором перераспределения управляющих силовых воздействий и идентификатором типа движения, с учётом зон (в) и (г). Зоны (а,в) ограничивают скорость по тяговым свойствам двигателя и СУП, а зоны (б,г) ограничивают скорость по динамическим свойствам СУП с учетом действительного числа включений.

Из графиков рисунка 4.8 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 движителя.

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

- на основании исследования установлено, что для рассмотренной управляемой системы с варьирующимися параметрами и, для которой трудно организовать обратную связь, необходимо синтезировать алгоритмы управления на основе shaper-фильтров;

- применительно к рассматриваемой системе для повышения качества переходных процессов обоснована необходимость синтеза ZV-shaper-фильтра. Его эффективность позволяет на 14% уменьшить перерегулирование и на 50% сократить длительность переходных процессов;

– для повышения динамических свойств системы и сокращения коэффициента фазового отставания реакции, обоснована необходимость и синтезирован ZVD-shaper-фильтр. Его эффективность заключается в возможности сокращения фазового отставания реакции и повысить предельную скорость управляемого движения на 50%.

4.2 Алгоритм коррекции управляющих воздействий

Система управления движением быстроходной гусеничной машины

По результатам проведённого исследования была разработана система управления движением для быстроходных гусеничных машин, оснащённых гидромеханической трансмиссией (ГМТ) и дифференциальным механизмом поворота с гидрообъемным приводом [62].

Известна система управления поворотом БМП Marder [11], которая содержит гидропривод, включающий гидронасос кинематически через редуктор соединённый с двигателем, а гидромотор соединён с дифференциальным механизмом, ведомые элементы которого соединены с солнечными шестернями суммирующих планетарных рядов трансмиссий. Параллельно гидроприводу включена гидромуфта с регулируемым в процессе поворота наполнением – это обеспечивает высокую управляемость движения гусеничной машины в том числе при входе в поворот и в процессе движения в повороте. Основным недостатком этой системы является недостаточное быстродействие, особенно при выходе из поворота, большая длительность переходных процессов, приводящая к режиму эволюционного движения.

Наиболее близкой по технической сути и достигаемому результату является автоматизированная система управления движением [16], реализующая адаптивное оптимальное управление, которая содержит измерители управляющих воздействий (угол поворота штурвала, перемещений педалей подачи топлива), а также угловой скорости вала двигателя, скорости движения, которые электрически соединены через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с

бортовой микроЭВМ, формирующей заданную угловую скорость поворота. Этот сигнал с выхода бортовой микроЭВМ подаётся на электромагнит гироскопического датчика «угловая скорость - ускорение». Выходы гироскопического датчика измеряющие отклонение угловой скорости, продольное, и боковое ускорения, соединены через АЦП с бортовой микроЭВМ, а выходы, измеряющие заданную угловую скорость (управляющее воздействие) и отклонения угловой скорости от заданной, соединены с двухканальным анализатором спектра, который на основе быстрого преобразования Фурье определяет спектральные плотности управляющего воздействия и отклонения угловой скорости, которые вводятся в бортовую микроЭВМ через АЦП.

При движении без бокового заноса бортовая микроЭВМ формирует оптимальное управление и передаёт сигнал к электрогидравлическому усилителю, который через дифференциальный рычаг перемещает орган управления гидрообъёмным приводом и компенсирует отклонение. При возникновении бокового заноса и допустимости движения по приближённой траектории на основе решения обратной задачи динамики бортовая микроЭВМ формирует параметры (курсовой угол и угловую скорость), обеспечивающие движение без заноса. Величина этого сигнала передаётся к блоку управления электрогидравлического усилителя. При недопустимости движения по приближённой траектории сигнал с бортовой микроЭВМ передаётся к серводвигателю для автоматического снижения скорости.

Основной недостаток существующей системы состоит в том, что реакция отклонения траектории и условие возникновения бокового заноса формируется по данным о боковых скоростях и ускорениях от датчиков, установленных на корпусе машины, в то время как разность во времени между появлением этих ускорений и задающим воздействием водителя велика, то есть в системе имеется время чистого запаздывания, которое оказывает влияние на общую динамику гусеничной машины и её управляемость.

Другой недостаток заключается в том, что ПИД-регулятор, применяемый в ней работает наиболее эффективно в том случае, если задающие воздействия

являются гармоническими. Однако в действительности управляющие воздействия водителя даже при движении на тестовых змейках не являются таковыми. Они приводят к дополнительным нежелательным колебаниям реакции машины как объекта управления с упруго-инерционными свойствами. Кроме того недостаточная эффективность ПИД-регулятора во многом объясняется тем, что его структура должна обеспечивать выполнение двух противоречивых требований: высокое быстродействие в процессе управления поворотом и в тоже время - минимизацию или снижение колебаний корпуса при прямолинейном движении. Последнее достигается введением в регулятор интегрирующего звена, которое снижает устойчивость системы и увеличивает запаздывание реакции машины в процессе поворота. Эффективность ПИД-регулятора снижается также вследствие вариации параметров конструкции гусеничной машины, входящих в математическую модель и определяющих собственную частоту системы, в соответствии с которой синтезирован регулятор. Кроме того колебания корпуса машины в горизонтальной плоскости и в системе управления движением - существенно изменяют параметры конструкции машины, приводя к вариации собственной частоты системы и её демпфирующих свойств. Таким образом известная система не обладает робастностью, то есть не обеспечивается её приспособляемость к изменению параметров объекта. Учитывая противоречивость требования по обеспечению быстродействия системы при управлении поворотом, а при прямолинейном режиме движения - интенсивность гашения колебаний корпуса, в систему необходимо ввести идентификатор требуемого режима движения и распараллелить алгоритмы управления движением. В виду существенной вариации параметров конструкции объекта управления, входящих в математическую модель и скоростного режима движения, приводящих к вариации собственной частоты и демпфирующих свойств, необходимо обеспечить робастность системы управления.

В последнее время для систем у которых управляемые параметры зашумлены или трудноизмеряемы разрабатываются Shaping-алгоритмы управления. Одним из их важных преимуществ является простота их реализации

в микропроцессорных системах и системах управления на основе программируемых логических контроллеров.

Для устранения основного недостатка автоматизированной системы управления движением, состоящей из измерителей управляющих воздействий (угол поворота штурвала, перемещений педалей подачи топлива), а также угловой скорости вала двигателя, скорости движения, которые электрически соединены через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с бортовой микроЭВМ, формирующей заданную угловую скорость поворота, гироскопического датчика, двухканального анализатором спектра, электрогидравлического усилителя, который через дифференциальный рычаг перемещает орган управления гидрообъемным приводом, дополнительно вводятся идентификатор типа задающего воздействия, два Shaper-фильтра, электрически соединённые с гидроприводом датчиками давления через анализатор спектра, регуляторы подавления колебаний и быстрогодействия, сигнал с которых поступает на гидропривод, через аддитивный сумматор и формирователь сигнала управления.

Принцип работы Shaping-алгоритмов заключается в формировании управляющего сигнала путём свёртки задающего управляющего воздействия с последовательностью импульсов в виде дельта-функции Дирака. Количество импульсов, период их следования и амплитуда каждого из них определяет эффективность алгоритма. Алгоритм их работы основан на перераспределении во времени силового воздействия на объект управления при сохранении неизменной величины суммарного воздействия. За счёт относительного увеличения времени перехода системы из одного состояния в другое обеспечивается компенсация возникающих колебаний, а сдвиг управляющего воздействия на половину периода вычисленных колебаний объекта управления обеспечивает в идеальном случае полное их подавление.

Синтезируемый алгоритм коррекции управляющего воздействия, реализуемый фильтрами должен предотвращать возбуждение и гашение нежелательных колебаний, обеспечить 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 показывает, 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. На рисунке 2.10 показан фрагмент осциллограммы, характеризующий изменение давления в процессе входа быстро движущейся машины в поворот, движения в повороте и выхода из него. Спектральный анализ этого колебательного процесса рабочей жидкости в силовых магистралях гидропривода показывает, что он содержит высокочастотные составляющие, формируемые поршневой группой гидропривода, возмущениями на траковой частоте (зацепление ведущих колёс с гусеницами), низкочастотными колебаниями корпуса вокруг вертикальной оси, а так же нелинейностью гидропривода, проявляющейся при переходных процессах. Таким образом, предлагаемый параметр является достаточно информативным. Адаптация фильтра может быть осуществлена на основе измерения и обработки сигналов G-сенсора бокового движения.

Вводимый в систему Фильтр класса ZV-Shaper (с так называемой нулевой вибрацией, zero-vibration, ZV) обеспечивает эффективное гашение колебаний при вариации параметров объекта управления, но обладает пониженным быстродействием. Для повышения быстродействия параллельно ZV-Shaper вводится дополнительно фильтр UM-ZV-Shaper (единичного модуля и нулевой вибрации, unity-magnitude zero-vibration, UM-ZV) повышает быстродействие, но снижает эффективность подавления колебаний.

Схема предложенной системы приведена на рисунке 4.9. Система управления состоит из командного органа управления поворотом - штурвала 1, который соединён с сенсором 2 перемещения командного органа управления, а так же кинематически через систему тяг соединён с механическим каналом управления регулируемого гидронасоса ГН гидропривода 3. Гидромомтор

гидропривода 3 кинематически через дифференциальный механизм поворота соединён с ведущими колёсами объекта управления 4. С силовой магистралью гидропривода гидравлически соединены датчики давления 8, электронные выходы которых соединены с анализатором спектра 9 и фильтром режекторным 10. Выход фильтра соединён с фильтром ZV-Shaper 11 и UM-ZV-Shaper 12. Выходы фильтров 11 и 12 соединены с регулятором подавления колебаний 13 и с фильтром регулирования быстродействия 14 соответственно. Выходы обоих регуляторов 13 и 14 соединены со входом аддитивного сумматора 6, который подключён к формирователю сигнала управления 15. Выход G-сенсора 7 через блок адаптации алгоритма 16 соединён со входом фильтров ZV 11 и UM-ZV 12.

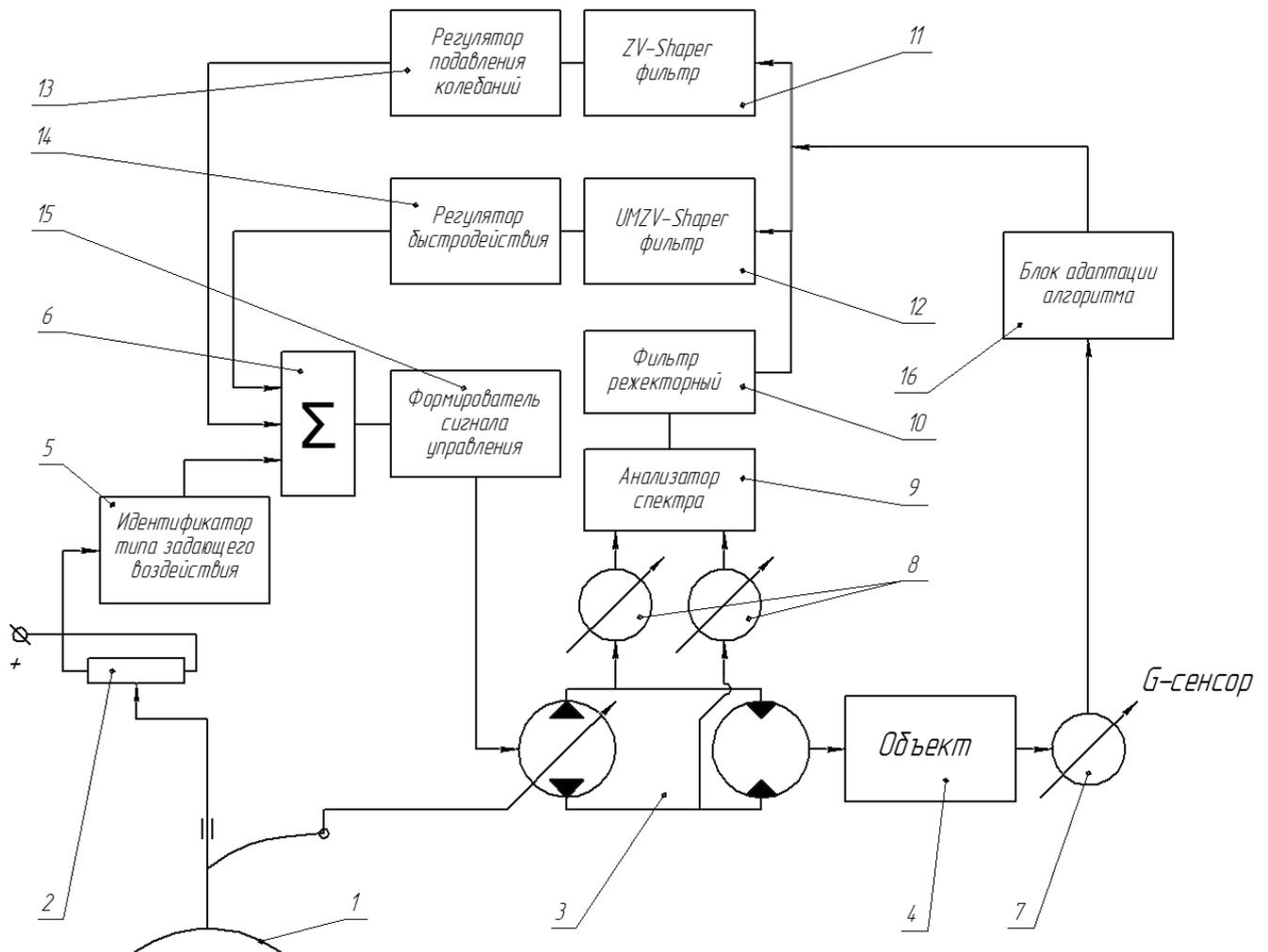


Рисунок 4.9 – Система управления движением быстроходной гусеничной машины.

Схема структурная

Работает предлагаемая система, в зависимости от требуемого режима движения в повороте или - прямолинейно, следующим образом. В том случае, если водитель, посредством командного органа управления поворотом – штурвала 1, воздействует на гидропривод 3, изменяя режим его работы, возникают продольные и боковые ускорения корпуса 4. Такие ускорения находятся в зависимости от параметров транспортной машины – инерционных, коэффициентов сопротивления увода, вязкостно-упругих свойств элементов и др., варьирующихся в широких пределах.

Так как давление жидкости в силовой магистрали гидропривода 3 находится в сложной зависимости от ускорений корпуса, то после его регистрации датчиками давления 8 и последующей обработки полученных данных анализатором спектра 9 и режекторным фильтром 10, они поступают на входы Shaper-фильтров 11 и 12. Далее раздельно формируются корректирующие воздействия, направленные на подавление колебаний 13 и повышение динамики 14. Одновременно с этим управляющее воздействие водителя, поступающее на штурвал 1, через сенсор перемещения командного органа 2 поступают в блок идентификации типа задающего воздействия 5. В том случае, если угол поворота штурвала $\alpha_{шт} > 0$, то задающее воздействие определяется как "Поворот". В противном случае - "Прямолинейное движение". Электронные выходы блоков 13, 14, 5 подаются на вход аддитивного сумматора 6 и формирователя сигнала управления 15. Итоговое корректирующее воздействие поступает на вход канала управления гидронасоса гидропривода 3. Таким образом в предлагаемой системе реализована "Быстрая" обратная связь. Параллельно этому информация о продольных и боковых скоростях и ускорениях объекта 4, регистрируемая G-сенсором 7, поступает на блок адаптации алгоритма 16. По этим данным определяется разность между расчётными скоростями и ускорениями для конкретного управляющего воздействия и фактическими ускорениями и скоростями. Информация об этом также поступает на входы Shaper-фильтров 11 и 12, тем самым реализуя ещё одну обратную связь системы. Благодаря всему этому, повышается скорость формирования корректирующих воздействий,

повышается управляемость и динамика за счёт отдельного регулирования эффектов, вызываемых колебаниями корпуса и повышается динамика гусеничной машины.

Эффективность предложенного решения заключается в повышении степени реализации потенциальных скоростных качеств машины за счёт введения в систему управления дополнительной обратной связи, организованной так, что реакция БГМ на задающее воздействие водителя определяется с меньшим запаздыванием по времени и, следовательно, уменьшается время на генерацию корректирующего воздействия регулятора системы автоматизированного управления, что приводит к повышению динамики и управляемости гусеничной машины.

Блок-схема алгоритма автоматизированного управления движением быстроходной гусеничной машины

На основании полученных результатов научного исследования предлагаются блок-схемы алгоритма идентификации задающих воздействий водителя и типа движения, а также алгоритма комплексного отдельного управления при различных типах движения с применением адаптивных преобразователей задающих воздействий [28,29].

Блок-схема алгоритма идентификации воздействий представлена на рисунке 4.10. В основе метода лежит применение искусственных нейронных сетей распознавания. Исходными данными для определения типа задающего воздействия водителя является информация с датчиков угла поворота руля и величин нажатия педалей подачи топлива и торможения. Эта информация поступает на входы вычислительного блока транспортной машины, проходит преобразование и подаётся на входы нейросети Кохонена-Гроссберга. Все типы управляющих сигналов подразделяются на две группы – процесса поворота и прямолинейного движения. В том случае, если происходит ошибка распознавания, то контроллер определяет тип воздействия в соответствии с ранее распознанным. Одновременно с этим процессом собираются данные о реакции быстроходной гусеничной машины на управляющие воздействия – данные с G-

воздействиями и реакцией машины. Распараллеливание алгоритма на две нейросети позволяет решать одновременно две задачи, что значительно ускоряет время его исполнения.

Последовательность действий второго циклического алгоритма комплексного раздельного управления при различных типах движения с применением адаптивных преобразователей задающих воздействий (рисунок 4.11) представлена ниже. После опроса датчиков задающих воздействий происходит идентификация типа движения бортовым вычислительным блоком (при необходимости – принудительная).

В случае прямолинейного движения, автоматизированная система управления оценивает курсовое направление и корректирует возникающие боковые ускорения за счёт быстрой обратной связи силовых контуров гидрообъёмного механизма поворота и ZV-shaping-фильтров. Если идентифицируется процесс поворота, то производится уточнение коэффициентов адаптивных shaper-фильтров и повышение динамики БГМ в соответствии с информацией о реакции машины на задающие воздействия.

На последнем этапе цикла оценивается управляемость транспортной машины и применяются контрмеры в случае её потери. После этого алгоритм начинает исполняться сначала.

Применение данных алгоритмов позволит повысить степень реализации потенциальных скоростных качеств перспективных быстроходных гусеничных машин, а также снизит нагрузку на человека-оператора и, следовательно, уменьшит его утомляемость.

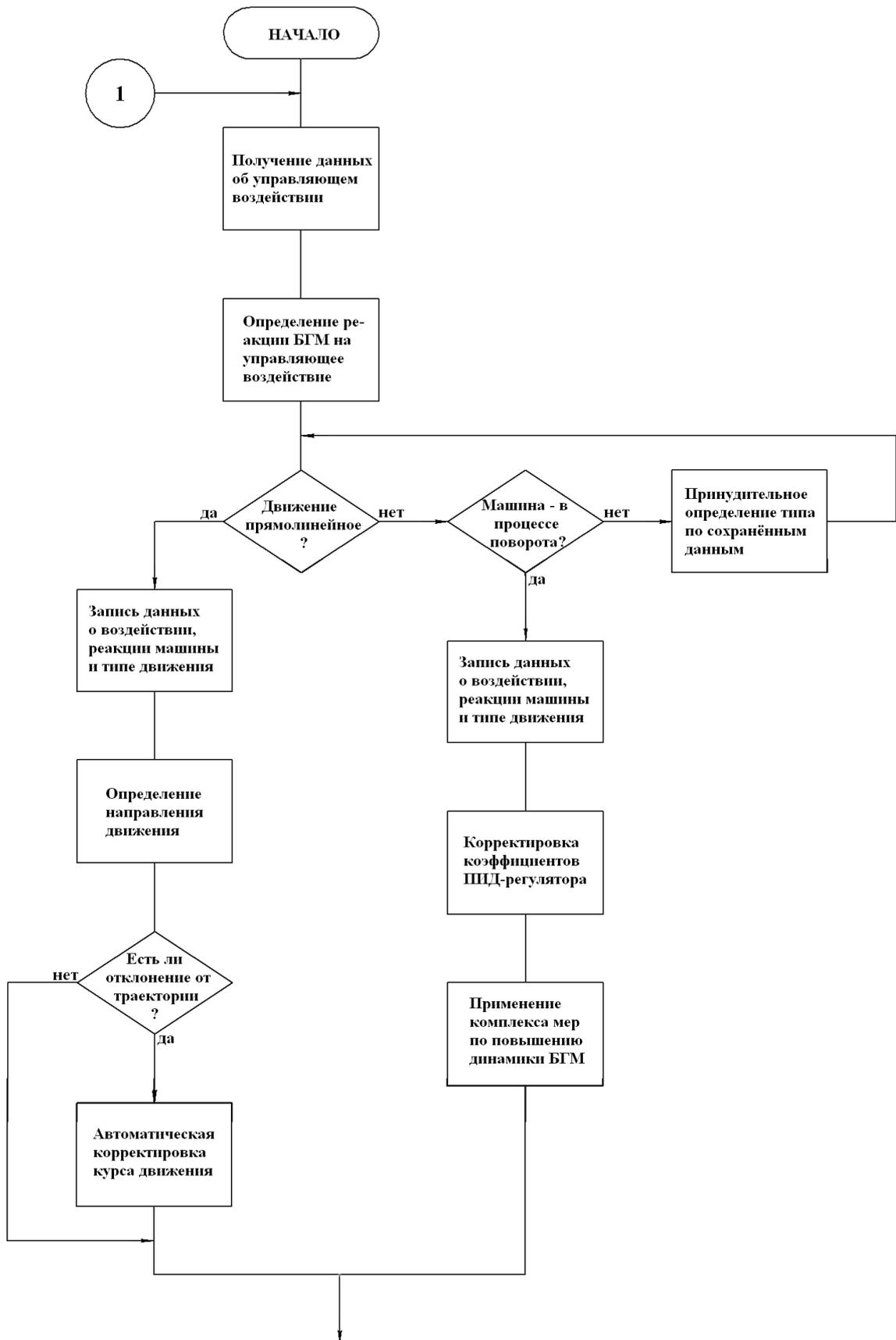


Рисунок 4.11 а – Алгоритм комплексного раздельного управления при различных типах движения с применением адаптивных преобразователей задающих воздействий. Блок-схема

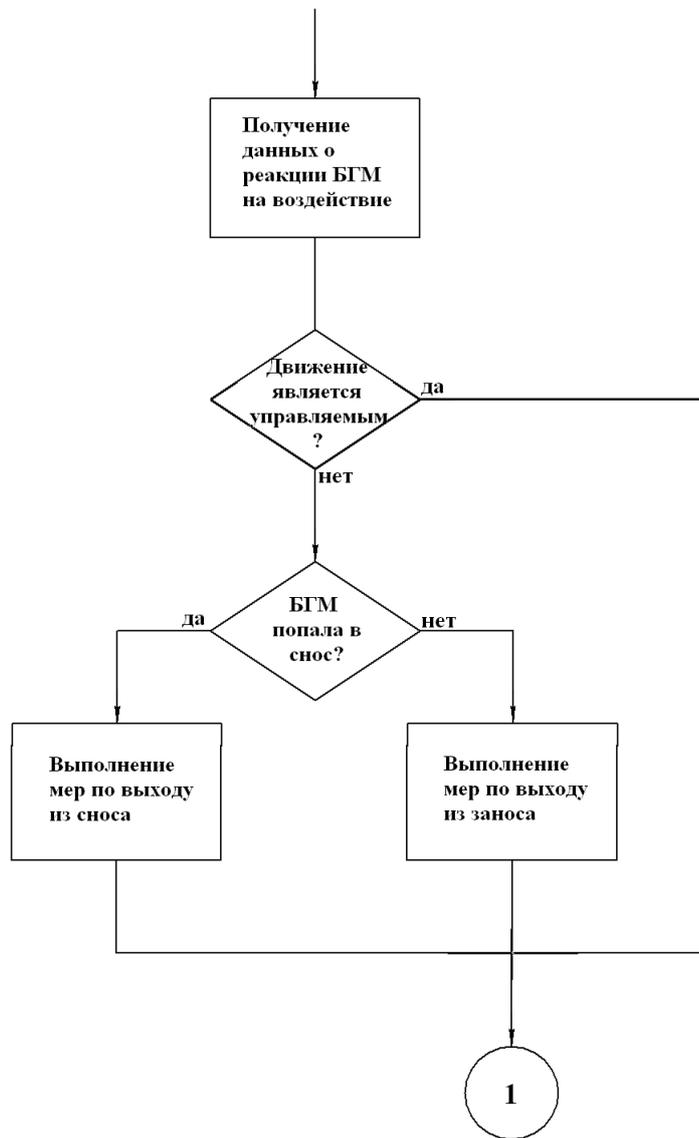


Рисунок 4.11 б – Алгоритм комплексного раздельного управления при различных типах движения с применением адаптивных преобразователей задающих воздействий. Блок-схема

4.3 Расширение функциональности и оптимизация разработанной автоматизированной системы

Мехатронная система управления поворотом быстроходной гусеничной машины

Для расширения функциональных возможностей системы управления движением и повышения качества управления была предложена разработка мехатронной системы управления поворотом быстроходной гусеничной машины

[61]. Она может быть использована при синтезе систем управления поворотом БГМ, оснащенных гидромеханической трансмиссией (ГМТ) и дифференциальным механизмом поворота с гидрообъемным приводом.

Известна система управления поворотом БМП Marder [11], которая содержит гидропривод, включающий гидронасос кинематически через редуктор соединённый с двигателем, а гидромотор соединён с дифференциальным механизмом, ведомые элементы которого соединены с солнечными шестернями суммирующих планетарных рядов трансмиссий. Параллельно гидроприводу включена гидромуфта с регулируемым в процессе поворота наполнением – это обеспечивает высокую управляемость движения гусеничной машины в том числе при входе в поворот и в процессе движения в повороте. Основным недостатком этой системы является недостаточное быстродействие, особенно при выходе из поворота, большая длительность переходных процессов, приводящая к режиму эволюционного движения.

Наиболее близкой по технической сути и достигаемому результату является система управления поворотом БМП-3 [9], которая содержит управляемый командным органом (штурвалом) гидрообъемный привод, ведущий вал гидронасоса которого соединен с двигателем, а ведомый вал гидромотора соединен с валом дифференциального механизма поворота. На валу расположены шестерни, кинематически соединенные с солнечными шестернями СПР одного борта БГМ через промежуточную шестерню, а второго борта – непосредственно.

Водитель, воздействуя посредством приводов управления на гидропривод, изменяет режим его работы и тем самым изменяет направление движения машины. При этом контроль за поведением машины осуществляет водитель. Для компенсации возникающих отклонений траектории он воздействует на органы управления, пытаясь реализовать требуемую траекторию движения с необходимой для безопасности точностью. Однако вследствие ограниченности психофизиологических свойств водителя, его утомляемости в процессе длительного движения, принятые решения и реализуемое им управляющее воздействие характеризуется большим количеством ошибок. В связи с этим, в

ряде технических решений, предложено ввести систему дополнительного автоматического управления наклонной шайбой управления насоса гидропривода. Для этого в систему управления дополнительно включается бортовой компьютер, сенсоры положения и перемещения штурвала, педали подачи топлива, числа оборотов двигателя, номера включённой передачи, а также гироскопического датчика угловой скорости, соединённого с бортовым компьютером. При отклонении параметров траектории, организованная обратная связь управления наклонной шайбой насоса ГОП обрабатывает разность между управляющим воздействием и управляемым параметром, подавая сигнал на второй канал (электронный) управления гидронасосом [20].

Основной недостаток этой системы состоит в том, что жёсткая кинематическая связь солнечной шестерни суммирующего ряда через гидропривод с двигателем приводит к тому, что в такой системе угловая скорость поворота гусеничной машины зависит не только от угла поворота штурвала, но и от частоты вращения вала двигателя (положение педали подачи топлива). При движении гусеничной машины на высших передачах на твёрдых дорогах с незначительным сопротивлением повороту угловая скорость является функцией двух управлений – угла поворота штурвала и педали подачи топлива, не зависит от номера включённой передачи. Передаточные числа определяются из условия движения без бокового заноса на грунтах с высокими сцепными свойствами на максимальном скоростном режиме. При этом расчётная угловая скорость поворота принимается равной 1 рад/с. Это обеспечивает высокие скоростные качества машины на дорогах с интенсивным изменением кривизны. Однако при движении машины со скоростью ниже максимальной при вращении вала двигателя на режиме максимального момента угловая скорость поворота снижается в 1,5...2 раза и может быть недостаточной. Для вписывания в требуемую траекторию при движении по окружности с радиусом 20 м по сухой бетонной дороге со скоростью предельной по заносу, равной 12,6 м/с, угловая скорость должна составлять 0,63 рад/с. Если двигатель работает на режиме максимального момента, то расчётная угловая скорость составляет 0,5 рад/с. При

юзе и буксовании гусениц фактическая угловая скорость поворота ещё меньше и не превышает $0,33 \dots 0,38$ рад/с (принято, что на установившемся режиме коэффициент буксования гусениц определяется отношением длины опорной поверхности к ширине колеи). Следовательно, передаточное число привода дифференциального механизма от гидромотора ГОП должно быть регулируемым для обеспечения необходимой угловой скорости поворота машины при работе двигателя не на максимальной угловой скорости.

Для устранения основного недостатка системы управления поворотом, состоящей из объёмного гидропривода, включающего гидронасос и гидромотор, гидронасос которого кинематически через механический редуктор соединён с двигателем машины, а первый канал управления – с задающим (командным) органом управления поворотом (штурвалом), бортовой компьютер, сенсоры положения и перемещения: $\alpha_{шт}$ штурвала, $\alpha_{пт}$ педали подачи топлива, числа оборотов двигателя, номера включённой передачи, дифференциального механизма, ведомые элементы, которого кинематически соединены с солнечными шестернями суммирующего планетарного ряда трансмиссии, дополнительно вводится двухступенчатый планетарный редуктор, соединяющий гидромотор гидропривода с дифференциальным механизмом поворота и управляемый двумя фрикционными элементами.

Схема предложенной системы приведена на рисунке 4.12. Система управления состоит из объёмного гидропривода – 1, включающего управляемый гидронасос – 2 с двумя каналами управления и гидромотор – 3. Гидропривод – 1 кинематически через механический редуктор – 4 соединён с двигателем машины – 5. Первый канал управления гидропривода – 1 соединён с задающим (командным) органом управления поворотом – 6 (штурвалом). С бортовым компьютером соединены сенсоры положения и перемещения штурвала – 8 ($\alpha_{шт}$), педали подачи топлива – 9 ($\alpha_{пт}$), частоты вращения вала двигателя – 10 (n_d) и номера включённой передачи – 11 (m_j). Ведомые элементы дифференциального механизма – 12 кинематически соединены с солнечными шестернями 13 и 14 суммирующих планетарных рядов (СПР). Механический привод от гидромотора

– 3 к дифференциальному механизму – 12 осуществляется через двухступенчатый планетарный редуктор – 15. Редуктор – 15 состоит из водила – 16, солнечной шестерни – 17 и эпицикла – 18 и управляется двумя фрикционными элементами через серводвигатели 19 и 20. Серводвигатели гидравлически соединены с управляемыми клапанами – 21, 22, которые соединены с бортовым компьютером – 7.

Работает предлагаемая система следующим образом. Включение системы происходит при движении БГМ с большой скоростью на высоких передачах ($V > 35 \text{ км/ч}$). Водитель, анализируя характер изменения траектории дороги и прогнозируя реакцию машины на управляемое воздействие, при отклонении дороги от выбранного ранее направления движения, создает в соответствии с навыками вождения упреждающее управляющее воздействие – поворачивает штурвал 6 на некоторый угол $\alpha_{шт}$. Соответствующий сигнал сенсора 6, как и положение педали подачи топлива $\alpha_{пт}$ 9, частоты вращения вала двигателя n_d 10 и номера включенной передачи m_j 11 поступают в бортовой компьютер 7. На основе этих сигналов определяется параметр управляемого движения: расчетная угловая скорость поворота $\omega_p(\alpha_{шт}, \alpha_{пт})$. Если движение машины осуществляется на одной из высших передач и значение расчётной угловой скорости меньше 0,75...0,80 максимально возможной, то соответствующий сигнал бортового компьютера 7 поступает на вход пропорционального клапана 21 и 22 клапанной коробки, и серводвигатели 19 и 20 осуществляют выключение фрикциона и включение тормоза дополнительно введённого редуктора 15. Солнечная шестерня – 17 при этом останавливается и, тем самым происходит снижение передаточного числа дополнительно введённого редуктора, а угловая скорость его эпицикла – 18 возрастает. Благодаря этому возрастает и угловая скорость солнечных шестерней 13 и 14 суммирующих планетарных рядов, соответственно, и угловая скорость поворота машины.

может быть использована в конструкциях систем управления поворотом быстроходных гусеничных машин (БГМ), оснащенных гидромеханической трансмиссией (ГМТ), электронным приводом управления башни (стабилизатором наведения в горизонтальной плоскости) и дифференциальным механизмом поворота с гидрообъемным приводом с двумя каналами управления.

Известна система управления движением гусеничной машины с гидромеханической трансмиссией [16], реализующая адаптивное оптимальное управление, которая содержит измерители управляющих воздействий (угол поворота штурвала, перемещений педалей подачи топлива), а также угловой скорости вала двигателя, скорости движения, которые электрически соединены через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с бортовой микроЭВМ, формирующей заданную угловую скорость поворота. Этот сигнал с выхода бортовой микроЭВМ подаётся на электромагнит гироскопического датчика «угловая скорость - ускорение». Выходы гироскопического датчика измеряющие отклонение угловой скорости, продольное, и боковое ускорения, соединены через АЦП с бортовой микроЭВМ, а выходы, измеряющие заданную угловую скорость (управляющее воздействие) и отклонения угловой скорости от заданной, соединены с двухканальным анализатором спектра, который на основе быстрого преобразования Фурье определяет спектральные плотности управляющего воздействия и отклонения угловой скорости, которые вводятся в бортовую микроЭВМ через АЦП. Основным недостатком этой системы является необходимость установки на БГМ дополнительного электронно-измерительного и вычислительного оборудования, что приводит к усложнению уже существующей конструкции.

В то же время на боевых машинах пехоты широко применяются стабилизаторы вооружения – контур горизонтального наведения стабилизатора 2Э52 орудия [9]. В её состав входит пульт управления наводчика-оператора (ПЛ-88), электрически соединённый с бортовым компьютером. С него сигналы поступают по каналу управления к электродвигателю с редуктором башни и вооружения гусеничной машины. В состав контура обратной связи входят

следующие основные приборы: G-сенсор, регистрирующий скорость поворота орудия ω_0 и угол поворота орудия φ_0 , вычислительный блок. Также в конструкции системы управления поворотом гусеничной машины включён гидропривод с двумя каналами управления.

Недостатком данной системы можно считать то, что она применяется только в диапазонах скоростей от 0 до 30 км/ч, а на больших скоростях - отключена. В то время как на этих скоростях необходима автоматическая корректировка управляющих воздействий водителя и системы управления движением гусеничной машины. Для чего обычно применяется отдельная автоматизированная система, включающая в себя датчики, вычислительный блок и исполнительные элементы.

Таким образом, на определённых скоростных режимах можно использовать компоненты существующей системы стабилизации вооружения в горизонтальной плоскости в процессе автоматизированного управления направлением движения БГМ. Для этого контур стабилизации в горизонтальной плоскости дополняется необходимым оборудованием и реализуется возможность переключения процесса регулирования поворота орудия и башни на управление поворотом гусеничной машины. Одновременно с этим появляется возможность создания дублирующего управления для других членов экипажа машины помимо водителя.

Схема предложенной системы приведена на рисунке 4.13. Перед штурвалом управления поворотом 14 устанавливается пульт управления водителя 1 со всеми органами управления, аналогичный - 2 устанавливается у командира. Потенциометры горизонтального наведения пультов включаются в электрическую сеть параллельно штатному. Пульты снабжаются электромагнитами блокировки 3 и электрически соединяются с бортовым компьютером 4. К его входам так же подключены датчик частоты вращения вала двигателя 5 и измерительные преобразователи данных от сенсора положения педали подачи топлива 6 и информации о продольных и поперечных скоростях и ускорениях, регистрируемых G-сенсором 7. Поворот башни и орудия осуществляется при помощи электродвигателя 8, электрически соединённого с выходом бортового

компьютера 4, через редуктор 9. Башня также оборудована системой электромагнитной блокировки 10. Объемный гидропривод 11 включает в себя гидромотор 12 и гидронасос 13, первый канал управления которого является двухкаскадным усилителем. Первый каскад выполнен в виде гидроусилителя "сопло-заслонка" с электромеханическим преобразователем позиционного типа. Второй каскад усилителя - плоский золотник с пружинами механической обратной связи от люльки гидронасоса. Второй канал управления является гидроусилителем золотникового типа с управлением от механического входа - валика управления, кинематически соединённого со штурвалом. Угол поворота люльки пропорционален алгебраической сумме сигналов от электрического и механического входов (на рисунке 4.13 не показано). Механический канал управления соединён с командным органом управления поворотом - штурвалом 14, оснащённым электромагнитной блокировкой 15. Электрический канал управления гидронасосом 13 соединён с выходом бортового компьютера 4, ко входу которого подключён избиратель режима управления 16.

Работает предлагаемая система следующим образом. В том случае если скорость БГМ меньше 30 км/ч избиратель 16 переключает систему в режим контроля прицеливания, пульта управления водителя 1 и командира 2 находятся в заблокированном состоянии, а система «электродвигатель-редуктор-привод башни» – разблокирована и регулируется в горизонтальной плоскости сигналами от бортового компьютера 4, с которым она соединена по электронному каналу.

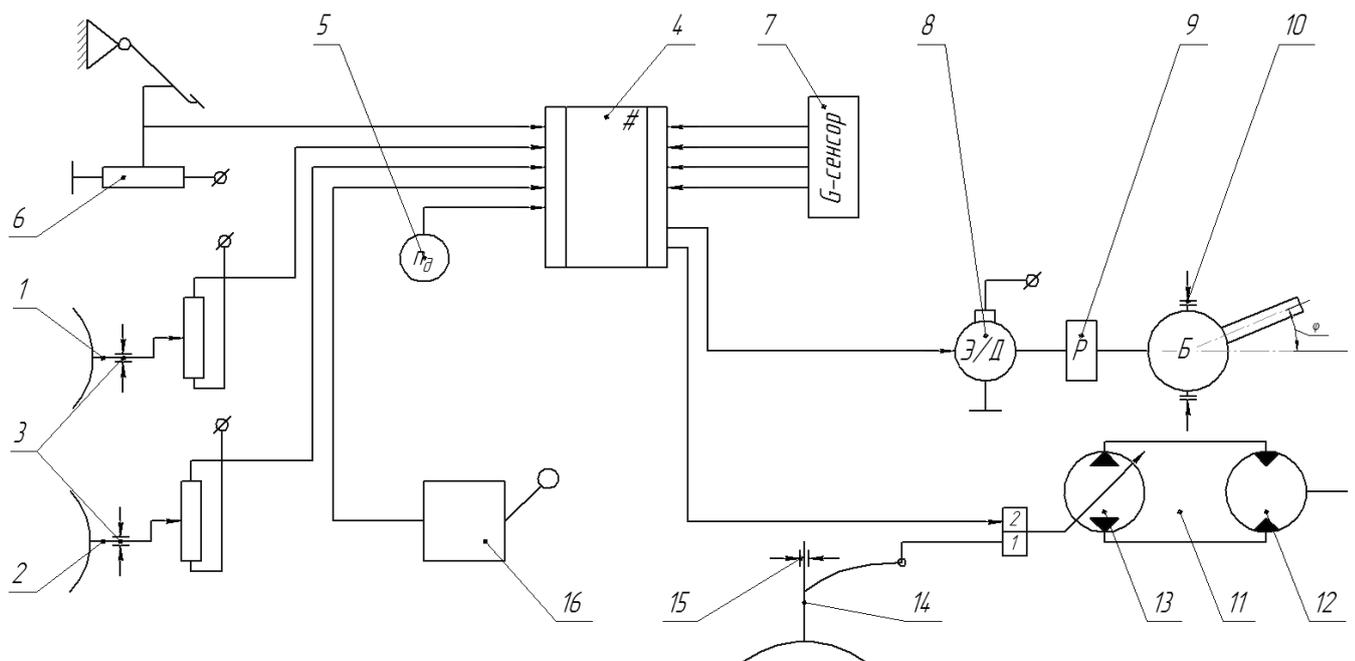


Рисунок 4.13 – Комбинированная система управления движением БГМ

G-сенсор 7 предназначен для выработки электрических сигналов, пропорциональных угловой скорости поворота машины. Бортовой компьютер 4 предназначен для суммирования и усиления сигналов управления привода горизонтального наведения, а также для переключения алгоритмов, реализующих стабилизацию орудия, в том случае если скорость машины меньше 30 км/ч, и траекторию движения, в противном случае. Управление переключением алгоритмов осуществляется при помощи избирателя 16. При движении в режиме стабилизации траектории происходит электромагнитная блокировка башни и разблокируются пульта управления командира и водителя. По каналу управления бортового компьютера, соединённым с электромеханическим входом управления гидрообъёмной передачи, осуществляется автоматизированное управление движением. При повороте корпуса пульта вокруг вертикальной оси в процессе движения машины сигнал управления поступает через бортовой компьютер, к каналу управления гидрообъёмной передачи, а также на магнит наведения гироскопических датчиков. При этом задаётся угловая скорость поворота машины и скорость прецессии G-сенсора. Направление поворота машины совпадает с направлением поворота корпуса пульта от нулевого положения. Величина скорости поворота плавно возрастает с увеличением угла поворота корпуса

пульта в пределах от минимальной до максимальной. При проходе корпуса пульта к упору скачкообразного изменения скорости поворота до максимальной ("переброс") не происходит, т.к. стабилизатор работает в режиме стабилизации траектории.

Эффективность предложенного решения заключается в возможности создания автоматизированного управления направлением (кривизной) движения при ограниченной сложности системы за счёт использования существующих частей. Кроме того представляется возможным создать дублирующее управление другим членам экипажа машины.

4.4 Оценка эффективности результатов исследования

В рамках работы синтезирован алгоритм коррекции управляющего воздействия и функциональная схема, его реализующая (Патент 3). 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 движением быстроходной гусеничной машины, основанный на фильтрации задающих 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 отдельного регулирования конкретных типов движения. Данный процесс

реализован посредством алгоритма распознавания задающих воздействий и скоростного режима транспортной машины, реализованный на основе аппарата искусственных нейронных сетей. 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 движения решение 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

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 отдельного 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%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абызов, А.А. Применение методики имитационных ресурсных испытаний для оценки ресурса тяжело нагруженных элементов движителя быстроходных гусеничных машин [Текст] / А.А. Абызов, И.Я. Березин, В.И. Бывальцев, И.А. Тараторкин // Инженерная защита окружающей среды в транспортно–дорожном комплексе: Сб. науч. тр. МАДИ (ГТУ); УФ МАДИ (ГТУ). – М. – 2002. – С. 114 – 126.
2. Александров, Е.Е. Синтез и разработка автоматизированных систем управления технологическими процессами для самоходных гусеничных машин с бесступенчатыми трансмиссиями [Текст] / Е.Е. Александров. – Харьков. – 1986. – 45 с.
3. Антонов, Д.А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей [Текст] / Д.А. Антонов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2003.
4. Аюев, В.В. Распределённое нейросетевое решение задачи классификации на основе выборочной кластеризации данных [Текст] / В.В. Аюев // Нейрокомпьютеры. Разработка. Применение. М.: Радиотехника. – 2010. – №11. – С. 45 – 53.
5. Бекетов, С.А. Теория передвижения по суше [Текст] / С.А. Бекетов. – М.: Машиностроение. – 1968. – 294 с.
6. Благодоров, А.А. Динамика управляемого движения [Текст] / А.А. Благодоров, В.Б. Держанский. – Курган: Издательство Курганского машиностроительного института. – 1995. – 162 с.
7. Блох, З.Ш. Динамика линейных систем автоматического регулирования машин [Текст] / З.Ш. Блох. – М.: Государственное издательство технико–теоретической литературы. – 1952. – 492 с.
8. Богословский, А.В. Обнаружение и определение параметров образов объектов. Методы и алгоритмы [Текст] / А.В. Богословский, Е. А. Богословский, И.В. Жигулина [и др.]; Под ред. А.В. Коренного. – М.: Радиотехника. – 2012. – 112 с.

9. Боевая машина пехоты БМП-3. Руководство по эксплуатации. Ч.1. Техническое описание [Текст]. – Ростов-на-Дону: Изд-во ООО БелРусь. – 2010. – С. 327–329.
10. Боровиков, В.П. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных [Текст] / В.П. Боровиков. – М.: Телеком. – 2008. – С. 62.
11. Бурцев, С.Е. Основы применения гидрообъёмных вариантов типовых трансмиссий [Текст] / С.Е. Бурцев. – Киев: Киевское ВТИУ. – 1983. – С. 200.
12. Гаврилов, А.И. Методы робастного, нейро-нечёткого и адаптивного управления [Текст] / А.И. Гаврилов, Н.Д. Егупов, В.Ю. Зверев [и др.]; под ред. Проф. К.А. Пупкова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2002. – 744 с.
13. Гамынин, Н.С. Гидравлический привод систем управления [Текст] / Н.С. Гамынин. – М.: Машиностроение. – 1972. – 376 с.
14. Гамынин, Н.С. Динамика быстродействующего гидравлического привода [Текст] / Н.С. Гамынин, Ю.К. Жданов. – М.: Машиностроение. – 1979. – 89 с.
15. Гизиатулин, Ю.Н. Метод прогнозирования быстроходности гусеничных машин по их динамическим свойствам [Текст] / Ю.Н. Гизиатулин // Курган. – 2010. – 128 с.
16. Держанский, В.Б. Алгоритмы управления движением транспортной машины: Монография [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. – 2010. – 142 с.
17. Держанский, В.Б. 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. (издание из перечня ВАК).
18. Держанский, В.Б. Динамические свойства элементов систем автоматического управления. Методические указания к выполнению

лабораторных работ по дисциплине «Управление техническими системами» для студентов специальности 190202.65 [Текст] / В.Б. Держанский, Е.К. Карпов. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. – 2013. – 23 с.

19. Держанский, В.Б. Ограничение подвижности Быстроходных гусеничных машин при флуктуации боковых сил [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин // Тракторы и сельхозмашины. – М.: Редакция журнала "ТСМ". – 2011. – Вып. 6.2011.

20. Держанский В.Б. Прогнозирование динамической нагруженности трансмиссий транспортных машин [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. – 2008. – С. 145.

21. Держанский, В.Б. Прогнозирование динамической нагруженности гидромеханических трансмиссий транспортных машин [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2010. – 176 с.

22. Держанский, В.Б. 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. (*издание из перечня ВАК*).

23. Держанский, В.Б. Механика и устойчивость колебательных процессов гусеничной машины при прямолинейном движении [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин // Механика машин, механизмов и материалов. Международный научно–технический журнал. – 2010. – №3(12).

24. Держанский, В.Б. Синтез системы управления движением быстроходной гусеничной машины с применением *shaping*-алгоритмов фильтрации [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, Е.К. Карпов // Актуальные вопросы машиноведения. Сборник научных трудов. Выпуск 2. – Минск: Объединённый институт машиностроения НАН Беларуси. – 2013. – 83 с.

25. Держанский, В.Б. Нечёткая логика в мехатронной системе управления движением быстроходной гусеничной машины [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, Е.К. Карпов // Безопасность транспортных средств в эксплуатации. – Сборник материалов 79-й Международной научно-технической конференции. – Нижний Новгород: Уч.-изд.л. – 2012. – С. 119-124

26. Держанский, В.Б. Построение нейросетевых моделей классификации и адаптации системы управления движением быстроходной гусеничной машины [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, Е.К. Карпов // Материалы 16-й Всероссийской научно-практической конференции РАРАН «Актуальные проблемы защиты и безопасности», секция «Бронетанковое вооружение и техника». – Петербург: НПО «Спецматериалы». – 2013. Т.3. С. 209-218.

27. Держанский, В.Б. Применение shaping-алгоритмов в гидрообъёмном приводе быстроходной гусеничной машины [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, Е.К. Карпов // Вестник сибирского отделения Академии военных наук №23 (Приложение к Вестнику Академии Военных Наук). – Омск. – 2013. – С. 53-60.

28. Держанский, В.Б. Синтез комбинированной системы идентификации управляющих воздействий водителя быстроходной гусеничной машины [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, Е.К. Карпов // XXIV Международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов «Актуальные проблемы машиноведения» (МИКМУС–2012): Труды конференции (Москва, 24–26 октября 2012 г.). – М.: Изд-во ИМАШ РАН. – 2012. – С. 79-82.

29. Держанский, В.Б. Синтез системы идентификации управляющих воздействий водителя быстроходной гусеничной машины [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, Е.К. Карпов // XXIV Международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов «Актуальные проблемы машиноведения» (МИКМУС–2012): материалы конференции (Москва, 24-26 октября 2012 г.). – М.: Изд-во ИМАШ РАН. – 2012. – С. 47.

30. Держанский, В.Б. Синтез структуры адаптивной системы управления движением быстроходной гусеничной машины с применением нейросетевых компонентов [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, Е.К. Карпов // Вестник Курганского государственного университета. – Серия “Технические науки”. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. – 2012. – Вып. 7. – С. 25-31.

31. Держанский, В.Б. Формирование высокочастотного динамического нагружения элементов ходовой части гусеничной машины [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин // Механика машин, механизмов и материалов. Международный научно–технический журнал. – 2010. – №2(11).

32. Держанский, В.Б. Анализ управляемости быстроходной гусеничной машины с нелинейной системой управления поворотом [Текст] / В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин // Известия вузов. Машиностроение. – 2008. – № 12. – С. 34 – 40.

33. Держанский, В.Б. Прогнозирование подвижности быстроходных гусеничных машин при криволинейном движении [Текст] / В.Б. Держанский, В.Н. Наумов, И.А. Тараторкин, Е.Б. Сарач // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2008. – № 2(71). – С. 76 – 96.

34. Дмитриев, А.А. Статистическая динамика транспортных и тяговых машин [Текст] / А.А. Дмитриев, В.А. Савочкин. – М.: Машиностроение. – 1993. – 320 с.

35. Душин, С.Е. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов [Текст] / С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев [и др.]; Под ред. В.Б. Яковлева. – М.: Высшая школа. – 2003. – 567 с.

36. Евдокимов, А.А. Модулярный ПИД–нейроконтроллер с расширенными функциональными возможностями [Текст] / А.А. Евдокимов, В.Ф. Лубенцов, М.А. Оспищев и др. // Нейрокомпьютеры. Разработка. Применение. – М.: Радиотехника. – 2009. – №7. С. 9 – 22.

37. Исаков, П.П. Теория и конструкция танка [Текст] / П.П. Исаков. – М.: Машиностроение. – 1982. – Т.2. – 252 с.

38. Исаков, П.П. Теория конструкции танка [Текст] / П.П. Исаков. – М.: Машиностроение. – 1985. – Т.5. – 367. с.

39. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей [Текст] / Р. Каллан; пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”. – 2001. – С. 14 – 15.

40. Карпов, Е.К. Адаптивная система фильтрации задающих воздействий системы управления движением быстроходной гусеничной машины [Текст] / Е.К. Карпов // Юбилейная XXV Международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС – 2013): материалы конференции (Москва, 13–15 ноября 2013 г.). – М.: Изд-во ИМАШ РАН. – 2013. – С. 66.

41. Карпов, Е.К. Анализ современных методов синтеза систем управления движением гусеничных машин на основе нечёткой логики [Текст] / Е.К. Карпов // Сборник научных трудов аспирантов и соискателей курганского государственного университета. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. – 2012. – Вып. XIV. – С. 9–10.

42. Карпов, Е.К. Компонентный состав перспективной системы управления движением быстроходной гусеничной машины [Текст] / Е.К. Карпов // Инновации и исследования в транспортном комплексе: Материалы первой международной научно–практической конференции. – Курган: типография «ПринтЭкспресс». – 2013. – С. 241-245.

43. Карпов, Е.К. Методы синтеза перспективной системы управления движением быстроходной гусеничной машины [Текст] / Е.К. Карпов // Сборник научных трудов аспирантов и соискателей курганского государственного университета. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. – 2013. – Вып. XV. – С. 12–13.

44. Карпов, Е.К. Перспективные направления автоматизации системы управления движением быстроходной гусеничной машины [Текст] / Е.К. Карпов // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Тюмень: ТюмГНГУ. – 2013. Т.2. – С. 282–284.

45. Карпов, Е.К. Построение нейросетевой модели ПИД-регулятора системы управления движением быстроходной гусеничной машины [Текст] / Е.К. Карпов // Актуальные проблемы науки и практики: Материалы международной научно-практической конференции, посвящённой Дню науки и 20-летию Уральского Межрегионального Отделения Российской Академии транспорта. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та.– 2012. – С.61–64.

46. Карпов, Е.К. Разработка автоматизированной адаптивной системы управления движением быстроходной гусеничной машины [Текст] / Е.К. Карпов // Молодёжь Зауралья III тысячелетия: Сборник тезисов докладов Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (Курган, 05-06 декабря 2013 г.). – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. – 2013. – С. 15.

47. Карпов, Е.К. Синтез системы управления движением быстроходной гусеничной машины [Текст] / Е.К. Карпов // Сборник научных трудов по материалам регионального конкурса на лучшую работу среди студентов, аспирантов и молодых учёных высших учебных заведений и научных учреждений Курганской области. – Курган: ФГБОУ ВПО “Курганская ГСХА”. – 2012. – С. 41–45.

48. Карпов, Е.К. Разработка программно-аппаратного комплекса адаптивного управления движением быстроходной гусеничной машины [Текст] / Е.К. Карпов // Молодёжь Зауралья III тысячелетия: Сборник тезисов докладов Региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (Курган, 24-25 апреля 2014 г.). – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. – 2014. – С. 24.

49. Красненьков, В.И. Основы теории управляемости гусеничных машин [Текст] / В.И. Красненьков. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана. – 1977. – 82 с.

50. Красненьков, В.И. Взаимодействие гусеничного движителя с грунтом [Текст] / В.И. Красненьков, Ю.И. Ловцов, А.Ф. Данилин // Труды МВТУ им. Н.Э.Баумана. – М.: МВТУ. – 1984. – № 411. – С. 108–130.

51. Красеньков, В.И. Математическая модель криволинейного движения транспортной гусеничной машины по деформируемому основанию [Текст] / В.И. Красеньков, С.А. Харитонов, А.В. Шумилин // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – М.: МВТУ. – 1989. – №11. – С. 94–99.

52. Красеньков, В.И. О давлении гусеничного движителя на грунт [Текст] / В.И. Красеньков, В.В. Егоркин, В.И. Хекако // Изв. вузов. Машиностроение. – М.: МВТУ. – 1973. – № 8. – С. 94–99.

53. Красеньков, В.И. Основы теории управляемости. Учебное пособие [Текст] / В.И. Красеньков. – М.: МВТУ. – 1977. – 68 с.

54. Красеньков, В.И. Динамика криволинейного движения транспортных гусеничных машин [Текст] / В.И. Красеньков, С.А. Харитонов // Труды МВТУ им. Н.Э.Баумана. – М.: МВТУ. – 1984. – N 339. – С. 367–369.

55. Кузнецов, А.П. Shaping-алгоритмы подавления колебаний объектов управления [Текст] / А.П. Кузнецов [и др.] // Доклады БГУИР. – 2011. – №7(61). с.5–11.

56. Кузнецов, А.П. Интеллектуальные алгоритмы управления подъёмно-транспортными механизмами [Текст] / А.П. Кузнецов, А.В. Марков, М.К. Хаджинов [и др.] // OSTIS-2011 (Open Semantic Technologies for Intelligent Systems). – 2011. – С. 493 – 504.

57. Медведев, В.С. Нейронные сети. MATLAB 6 [Текст] / В.С. Медведев, В.Г. Потёмкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ. – 2002. – 496 с.

58. Нейрокомпьютеры в интеллектуальных технологиях XXI века. Монография [Текст] / Под общей редакцией доктора технических наук, профессора Заслуженного деятеля науки РФ Ю.И. Нечаева. – М.: Радиотехника. – 2012. – 352 с.

59. Пантелеев, А.В. Теория управления в примерах и задачах: Учеб. пособие [Текст] / А.В. Пантелеев, А.С. Бортаковский. – М.: Высш. шк. – 2003. – 583 с.

60. 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 [Текст] / 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.

61. 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.

62. 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.

63. Позин Б.М. Новое в теории поворота гусеничного самохода [Текст] / Б.М. Позин. – Рук. деп. в ЦНИИТОИтракторосельмаш, №331. – 1982. – 98 с.

64. Ротач, В.Я. К расчёту оптимальных параметров ПИД–регуляторов по экспертным критериям [Текст] / В.Я. Ротач // Промышленные АСУ и Контроллеры. – 2005. – №11.

65. Ротач, В.Я. К расчёту оптимальных параметров реальных ПИД–регуляторов по экспертным критериям [Текст] / В.Я. Ротач // Промышленные АСУ и Контроллеры. – 2006. – №02.

66. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов [Текст] / В.Я. Ротач. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2008. – 396 с.

67. Рудакова, Т.А. Сравнение алгоритмов обучения нейросетевой модели управления динамическими системами [Текст] / Т.А. Рудакова, Н.И. Червяков, С.Ю. Щербина // Нейрокомпьютеры. Разработка. Применение. М.: Радиотехника. – 2008. – №1 – 2. С. 57 – 63.

68. Семейкин, В.Д. Моделирование искусственных нейронных сетей в среде MATLAB [Текст] / В.Д. Семейкин, А.В. Скупченко // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – №1. С. 159 – 164.

69. Сергеев, Л.В. Теория танка [Текст] / Л.В. Сергеев. – М.: Изд. ВАБТВ. – 1973. – 493 с.

70. Сергеев, Л.В. Быстроходность танков [Текст] / Под ред. Л.В.Сергеева. – М.: Изд. ВАБТВ. – 1965. – 188 с.

71. Сергеев, Л.В. Динамика быстроходного танка [Текст] / Л.В.Сергеев. – М.: Изд. ВАБТВ. – 1968. – 505 с.

72. Тарасик, В.П. Технологии искусственного интеллекта в диагностировании автотранспортных средств [Текст] / В.П. Тарасик, С.А. Рынкевич. – Могилев: Белорус.-Рос.ун-т. – 2007. – 280 с.

73. Тараторкин, И.А. Динамическая нагруженность гидромеханических трансмиссий транспортных машин: Монография [Текст] / И.А. Тараторкин. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. – 2009. – 211 с.

74. Таузов, А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации [Текст] / А.Л. Таузов. – М.: Радиотехника. – 2009. – 432 с.

75. Тюкин, И.Ю. Адаптивное управление нелинейными динамическими объектами с применением нейронных сетей [Текст] / И.Ю. Тюкин, В.А. Терехов // Нейрокомпьютеры. Разработка. Применение. М.: Радиотехника. – 2006. – №6. С. 3 – 21.

76. Уоссермен, Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика [Текст] / Ф.Уоссермен; Пер. с англ.: Ю. А. Зуев, В. А. Точенов. – 1992. – С. 63 – 64.

77. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание [Текст] / С. Хайкин. – М.: Издательский дом “Вильямс”. – 2006. – 1104 с.

78. Черных, И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений [Текст] / Под общ. ред. к.т.н. В.Г. Потёмкина. – М.: ДИАЛОГ–МИФИ. – 2003. – 496 с.
79. Шапиро, Д.И. Виртуальная реальность и проблемы нейрокомпьютинга [Текст] / Д.И. Шапиро. – М.: РФК-Имидж Лаб. – 2008. – 454 с.
80. Blackburn, D. Radial–Motion Assisted Command Shapers for Nonlinear Tower Crane Rotational Slewing [Текст] / D. Blackburn, J. Lawrence, J. Danielson [etc.]. – Atlanta, Georgia: Georgia Institute of Technology. – 2010. – 22 с.
81. Bradley, T. Command Shaping Under Nonsymmetrical Acceleration and Braking Dynamics [Текст] / T. Bradley, J. Danielson, J. Lawrence [etc.] // Journal of Vibration and Acoustics. – 2008. – №130.
82. Derzhanskii, V. Stabilization of Linear Motion of the Tracked Vehicle [Текст] / V. Derzhanskii, I. Taratorkin // SAE Technical Paper of the SAE 2013 Commercial Vehicle Engineering Congress. – 2013. – DOI: 10.4271/2013-01-2363. SCOPUS.
83. Gurleyuk, S.S. Archive of Applied Mechanics [Текст] / S.S. Gurleyuk/ – 2007. Vol. 77. – №1. P. 63–71.
84. Kagure, B. Shearing properties of sand under a rapented representing the ground pressure distribution of a tracked vehicle [Текст] / B. Kagure, T. Kudo // Journal of Terramechanics. – 1977. – Vol. 14. – № 4. – P. 237-248.
85. Kitano, M. An theoretical analysis of tracked vehicles [Текст] / M. Kitano, M. Juosari // Journal of Terramechanics. – 1976. – Vol. 13. – № 4. – P. 241–248.
86. Kitano, M. An analysis of horizontal plane motion of tracked vehicles [Текст] / M. Kitano, M. Kuma // Journal of terramechanics. – 1977. – Vol. 14. – № 4. – P. 211–226.
87. Kohonen, T. Self–organizing maps [Текст] / T. Kohonen – 3. ed. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo: Springer. – 2001. – 501 с.

88. Lawrence, J. Robustness of Input Shaping to Non-linear Crane Dynamics [Текст] / J. Lawrence, W. Singhose // . – Atlanta, Georgia: Woodruff School of Mechanical Engineering Georgia Institute of Technology. – 2008. – 30 c.
89. Lawrence, J. Invention Disclosure Description: Command Shaping to Compensate for Crane Dynamics [Текст] / J. Lawrence. – 2004.
90. Minsky, M. Perceptrons [Текст] / M. Minsky, S.Papert. – MIT Press, Cambridge, MA. – 1969. – C. 231–232.
91. Neural Network Toolbox. User's Guide [Текст] // Natick, Massachusetts: The MathWorks, Inc. – 2013. – 422 c.
92. Nonlinear Control Design Blockset. User's Guide [Текст] // Natick, Massachusetts: The MathWorks, Inc. – 2002. – 108 c.
93. Poty, A. ZV and ZVD shapers for explicit fractional derivative systems [Текст] / A. Poty, P. Melchior, B. Orsoni [etc.] // Proceedings of ICAR 2003 – The 11th International Conference on Advanced Robotics. – 2003. – C. 399 – 404.
94. Singhose, W.E. Trajectory Planning for Flexible Robots. Robotics and Automation Handbook [Текст] / W.E. Singhose; edited by Prof. Tom Kurfess. – CRC Press, In-Press. – 2004.
95. Vaughan, J. Performance Comparison of Robust Negative Input Shapers [Текст] / J. Vaughan, A. Yano, W. Singhose. – American Control Conference. – 2008. – C. 3257 – 3262.
96. Ziegler, J.G. Optimum settings for automatic controllers [Текст] / J. B. Ziegler and N. B. Nichols. – ASME Transactions, v64. – 1942. pp. 759-768.