4848244

УДК 629.1.02.075.(043.3)

Поддубный Владимир Иванович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЛЕСНЫХ МОБИЛЬНЫХ МАШИН В АПК НА ОСНОВЕ УЛУЧШЕНИЯ ИХ УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ

Специальность: 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

доктора технических наук

2 ИЮЧ 2011

Барнаул – 2011

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор А.С. Павлюк (ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им.И.Ползунова»)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор В.С. Красовских (ФГОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет»)

доктор технических наук, профессор В.Н. Тарасов (ГОУ «Сибирская государственная автомобильно - дорожная академия»)

доктор технических наук, профессор, Г.М. Крохта (ФГОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет»).

Ведущее предприятие: Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Сибирского отделения РАСХН

Защита состоится « 23 » июня 2011 г. в 10^{00} на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова по адресу: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина 46, тел/факс (8-3852) 36-71-29, htpp://www.altstu.ru, e-mail: elnis@inbox.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И.Ползунова.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью Вашего учреждения просим направлять в адрес ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан: « 20 » мая 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор Л.В. Куликова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Важнейшей задачей сельскохозяйственного производства является обеспечение дальнейшего роста производительности труда на всех операциях по возделыванию сельскохозяйственных культур при сохранении высокого качества выполнения работ.

Возмущения со стороны микрорельефа опорной поверхности, действие сил инерции при криволинейном движении, продольный и поперечный наклоны опорной поверхности вызывают отклонение колесных мобильных машин от задаваемого направления движения. При этом ухудшается качество почвообработки вследствие образования огрехов, при междурядной обработке повреждаются растения, при опрыскивании гербицидами увеличивается их расход из-за перекрытия зон опыления и происходит отравление растений при передозировке. Отклонение от задаваемой траектории движения вызывает увеличение пройденного пути при почвообработке или уборке урожая, происходит образование клиньев в конце обработки поля. Повышение скорости движения вызывает увеличение отклонений от задаваемого направления движения, водитель не успевает реагировать должным образом на возмущения, и вынужден снижать скорость, что ведет к снижению производительности труда.

При колебаниях происходит отклонение вектора скорости рабочих органов от их продольной оси, вследствие чего происходит увеличение тягового сопротивления и расхода топлива. Проведенные с участием автора испытания рабочего органа КПГ-2,2 при отклонении продольной оси от направления движения на 6 градусов показали увеличение на 5-8 % продольной и поперечной составляющих главного вектора сил почвенного воздействия.

Вышеперечисленные негативные моменты, вызванные отклонениями машинно-тракторных агрегатов от задаваемой траектории движения, увеличивают расход топлива, время выполнения работ, психомоторные затраты водителя.

Эффективность использования колесных машин может быть повышена путем улучшения их устойчивости и управляемости. Эта цель может быть достигнута за счет выбора рациональных конструктивных и эксплуатационных параметров, применением тягово-сцепных устройств улучшенной конструкции, снижением уровня вертикальных колебаний. Результаты полевых испытаний и контрольных смен трактора Т-150К с культиватором КТС-10-01 при использовании тягово-сцепного устройства Алтайского политехнического института, проведённые Поспелихинской МИС, показали, что происходит снижение среднеквадратичных отклонений курсовых углов трактора на 15-26 % и культиватора на 18-34 %. Это повышает скорость движения на 2, 8 %, производительность труда за час основного времени на 2, 6 %, снижает расход топлива на 3 %. Снижение среднеквадратичных отклонений курсовых углов трактора Т-150К на 12-30 % и плуга ПЛ-5-40 на 14- 28 % позволило понизить удельный расход топлива на 1, 73 кГ/га.

Одним из наиболее эффективных средств повышения устойчивости и управляемости движения является разработка и внедрение систем точного зем-

леделия, позволяющих осуществлять управление движением без участия водителя. Системы точного земледелия, использующие GPS- навигацию, получили широкое распространение в странах западной Европы и Америки, начато их использование в России с техникой иностранного производства. В многочисленных публикациях отмечается их высокая эффективность при выполнении сельскохозяйственных работ, особенно при работе широкозахватной техники. Использование систем прецизионного земледелия дает экономию топлива до 20 %, удобрений и гербицидов до 30 % . Однако применение зарубежных систем автоматического управления движением, в частности систем подруливания, на технике отечественного производства затруднено вследствие большого сопротивления повороту рулевого колеса. Система воспринимает это как вмешательство человека в управление и отключается. Также следует отметить высокую для отечественного потребителя стоимость зарубежных систем прецизионного земледелия. Присутствующие на рынке системы параллельного вождения отечественного производства позволяют водителю управлять движением по курсоуказателю экрана, однако отсутствуют системы, обеспечивающие движение колесных машин без участия водителя.

В Концепции развития аграрной науки и научного обеспечения агропромышленного комплекса Российской Федерации на период до 2025 года, утвержденной приказом N 342 Минсельхоза России от 25 июня 2007 года, одним из основных направлений фундаментальных и приоритетных прикладных исследований аграрной науки в области механизации, электрификации и автоматизации, является создание научных основ для разработки техники нового поколения с использованием робототехники для реализации высокоэффективных технологий производства приоритетных групп сельскохозяйственной продукции.

Следовательно, проведение исследований, ставящих целью создание отечественных систем управления движением колесными мобильными машинами в агропромышленном комплексе, является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности использования мобильных колесных машин на основе улучшения их устойчивости и управляемости, обеспечиваемых функционированием разработанной электромеханической системы управления движения.

Цель достигается:

1. Разработкой механико-математической модели динамической системы «опорная поверхность – шина – колесная машина – система управления движением».
2. Математическим моделированием управляемого движения колесных машин.
3. Экспериментальными исследованиями скольжения и напряжений пневматических шин в контакте колеса с опорной поверхностью для разработки механико-математической модели шины. Определением характеристик силового взаимодействия колес и рабочих органов с почвой.

4. Созданием электронно-механической системы автоматического управления, использующей спутниковую радионавигационную систему, и проведением её полевых испытаний.

Объект исследования – мобильные колесные машины.

Предмет исследования – процессы взаимодействия звеньев динамической системы «опорная поверхность – шина – колесная машина – система управления движением».

Методы исследования. Математическое моделирование с использованием аналитической механики, дифференциального и интегрального исчисления, дифференциальных уравнений, численных методов решения дифференциальных уравнений. Использовались визуальные объектно-ориентированные пакеты MATLAB R2009b, MATLAB-SIMULINK, CAMeL- View R 6.6. Экспериментальные исследования проводились в полевых условиях и на лабораторных стендах с использованием современной измерительной аппаратуры, оснащенной прикладным программным обеспечением.

Научная новизна исследований.

1. При разработке модели системы «опорная поверхность – шина – колесная машина – система управления движением» использован современный мехатронный принцип построения динамических систем, позволяющий воспроизвести пространственную, динамическую, многосвязную, регулируемую систему с использованием основных положений механики, электроники и теории регулирования. В отличие от широко распространенных механико-математических моделей колесных машин, полученных с использованием уравнений Лагранжа 2 рода, произведено описание внутреннего силового взаимодействия между телами системы, что максимально приближает модель к реальному объекту и позволяет вводить внутренние силы и моменты для осуществления движения колесных машин, регулирования и управления. Модели реализованы в виде программ для ЭВМ и зарегистрированы в Государственном реестре.

2. При расчёте системы управления движением колесной машины, как многосвязного объекта с неполной информацией о состоянии, использовались методы пространства состояний, в частности наблюдатель.

3. Предложен метод снижения уровня вертикальных колебаний, основанный на использовании масс отдельных узлов колесных машин в качестве динамических гасителей колебаний. Разработаны математические модели для определения оптимальных параметров гасителей.

4. В математическом описании модели для определения стационарных силовых характеристик шин использованы новые, полученные на основании экспериментальных исследований, закономерности скольжения протектора и распределения напряжений в контакте шины с опорной поверхностью. При проведении экспериментов использовались устройства, новизна и оригинальность которых подтверждена авторскими свидетельствами и патентами РФ. Математическая модель пневматического колеса, как составная часть динамической системы «опорная поверхность – шина – колесная машина – система управления движением», определяет главный вектор и главный момент силово-

го взаимодействия с опорной поверхностью при неустановившемся движении и одновременном действии продольных и поперечных сил. Учитываются действие микрорельефа опорной поверхности и наклон плоскости обода колеса.

Практическая ценность и реализация результатов исследований.

1. Механико- математические модели колесных машин позволяют заменить часть дорогостоящих полевых экспериментов математическим моделированием, используются для создания математических моделей управления движением. Созданные динамические модели позволяют производить оценку эффективности разработанных систем управления и конструктивных мероприятий по улучшению устойчивости и управляемости, определять энергетические показатели работы машинно-тракторных агрегатов.

2. Разработанная система управления движением может обеспечивать движение по заданной траектории с большой точностью без участия водителя. Это позволяет значительно снизить уровень колебаний машины и отклонений от задаваемой траектории, что сокращает пройденный путь, снижает тяговое сопротивление сельскохозяйственных машин, расход топлива, уменьшает энергозатраты водителя на управление, повышает качество выполнения технологических операций.

3. Модель расчетно-эмпирического определения характеристик пневматических шин и динамическая модель колеса позволяют определять силы и моменты в контакте с опорной поверхностью для шин любых типоразмеров. Методики и результаты расчетного и экспериментального определения характеристик пневматических шин внедрены в ПФ НАТИ, Челябинском заводе автотракторных прицепов, Красноярском заводе прицепов в расчетно– конструкторской работе и при составлении отраслевых рекомендаций.

4. Конструкция стенда для испытаний шин отмечена дипломом 1 степени ВДНХ Алтайского края. Стенд для испытания пневматических шин и устройства для определения деформаций и скольжений шины внедрены в АлтГТУ и используются при проведении НИР «Механико-математическая модель пневматической шины для исследования устойчивости и управляемости колесных машин», «Разработка теоретических основ для повышения устойчивости управляемого движения колесных мобильных машин» и в учебном процессе на кафедре «Автомобили и автомобильное хозяйство».

5. Результаты научных исследований по теме диссертации были применены на кафедре техники регулирования и мехатроники технического университета г. Падерборн (Германия) при разработке полноприводного экспериментального автомобиля «Хамелеон» со всеми управляемыми колесами, предназначенного для апробации новейших технологий и активного управления системами с целью повышения устойчивости движения, управляемости и комфорта.

6. Разработанная экспериментальная система управления движением с использованием GPS – навигации была применена для управления движением экспериментального автомобиля, трактора К-701, прошла полевые испытания в крестьянском хозяйстве Алейского района Алтайского края. Результаты экспериментов подтвердили её работоспособность.

7. Исследования по теме диссертации проводились по заданию Федерального агентства по образованию в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы. Мероприятие № 1».

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на научно-технических конференциях АлтГТУ, СибАДИ, ЧИМЭСХ, ЧПИ, ПФ НАТИ, СибИМЭ, на Всесоюзной конференции «Проблемы шин и резинокордных композитов» (г. Москва, НИИШП, 1989 г.), 3 Всесоюзном симпозиуме «Проблемы шин и резинокордных композитов. Нелинейность и нестационарность» (г. Москва 1991 г.), международной научно-технической конференции «Совершенствование рабочих органов сельхозмашин и агрегатов» (г. Барнаул, 1994 г.), 6 симпозиуме «Проблемы шин и резинокордных композитов. Математические методы в механике, конструировании и технологии» (г. Москва, НИИШП, 1995 г.), 10 Симпозиуме «Проблемы шин и резинокордных композитов. Десятый юбилейный симпозиум» (г. Москва, НИИШП, 1999 г.), 2 Международной конференции «Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов» (АГТУ, г. Барнаул , 2000 г.), 4-й международной научно - практической конференции «Прогрессивные технологии развития» (г. Тамбов, 2007 г.), 5 международной научно-технической конференции «Проблемы автомобильно-дорожного комплекса России» (г. Пенза, 2008 г.), международной конференции «Современные проблемы науки. Теория и практика агропромышленного комплекса» (г. Тамбов , 2008 г.), 2 Международной научно-практической конференции «Интеграция науки и производства. Теория и практика агропромышленного комплекса» (г. Тамбов, 2009 г.), на семинарах кафедры динамики автомобилей (Fachgebiet Fahrzeugtechnik) технического университета г. Дармштадт (Германия) и кафедры техники регулирования и мехатроники (Lehrstuhl fuer Regelungstechnik und Mechatronik) технического университета г. Падерборн (Германия) во время прохождения автором научной стажировки по линии ДААД в 1999 и 2006 годах.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Динамическая модель системы «опорная поверхность – шина – колесная машина – система управления движением», реализованная в виде мехатронных моделей колесного трактора, экспериментального автомобиля, пахотного колесного машинно - тракторного агрегата, шарнирно-соединенной колесной машины и стенда «рулевое управление - передняя подвеска».

2. Математические модели управления движением с использованием базисных маневров и ПИ-регулирования с наблюдателем в контуре управления, результаты моделирования управляемого движения колесных машин.

3. Система автоматического управления движением колесных машин с использованием GPS- навигации и прикладное программное обеспечение, обеспечивающее взаимодействие разработанной системы с аппаратурой.

4. Механико-математическая модель шины для определения стационарных характеристик взаимодействия пневматического колеса с основанием и динамическая модель для определения сил и моментов в контакте при неустановившемся боковом и продольном движении колеса.

5. Результаты экспериментальных исследований пневматических шин, рабочих органов почвообрабатывающих машин, лабораторных и полевых испытаний системы управления движением.

6. Комплекс экспериментального оборудования для испытания шин, стенд «рулевое управление - передняя подвеска», аналоговая и цифровая аппаратура для управления движением с использованием систем глобального позиционирования.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 53 научных работах, в том числе: 7 статей из перечня ВАК для докторских диссертаций, 4 авторских свидетельства, 4 патента РФ, монография, 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, результатов работы и выводов. Текст диссертации изложен на 324 страницах машинописного текста, включает 217 рисунков, 345 наименований литературы, приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследований, определены объект и предмет исследования, научная новизна и практическая ценность исследований.

В первой главе проведен анализ работ в области динамики колесных мобильных машин, обзор теорий и методик описания процесса взаимодействия колеса с опорной поверхностью, систем прецизионного земледелия. Поставлены задачи диссертационной работы.

Устойчивость движения и управляемость колесных машин являются одним из наиболее важных факторов, оказывающих влияние на показатели качества работы колесных мобильных машин. Исследованиям в области устойчивости и управляемости посвящены работы многих известных ученых. Наиболее существенный вклад в это направление внесли Д.А. Антонов, С.В. Бахмутов, Ю.А. Брянский, В.П. Горячкин, Л.И. Гродко, А.М. Гуревич, В.В. Гуськов, Л.В. Гячев, Я.Х. Закин, В.А. Иларионов, Н.Т. Катанаев, В.Ф. Коновалов, А.С. Литвинов, А.Б. Лурье, А.С. Павлюк, И.М. Панов, Я.М. Певзнер, А.А. Ревин, А.В. Рославцев, Б.С. Фалькевич, Я.Б. Фаробин, В.И.Фортуна, Х.А. Хачатрян, А.А. Хачатуров, Д.А. Чудаков, Е.А. Чудаков, А.А. Юрчевский.

Из зарубежных ученых следует отметить работы D. Ammon, W. Bergman, H. Dugoff, J.R. Ellis, P.S. Fahcher, E. Fiala, R.S. Sharp, M. Mitschke, G. Rill, L. Segel, F.Vik .

Из работ последних лет, направленных на решение задач, связанных с повышением эффективности использования колесных машин, следует отметить докторские диссертации Ю.А. Судника, А.Ф. Зимагулова, И.В. Ходеса, Р.П. Кушвида, С.В. Глотова, А.П. Савельева, Ю.Д. Погуляева, Ю.А. Коцарь, В.И. Рязанцева.

Работы Д.А. Антонова, И.Х. Грейдануса, А.Б. Дика, М.И. Есипова, В.П. Бойков, Б.Л. Бухина, Р.В. Вирабова, Ю.А. Ечеистова, Н.Т. Катанаева, М.В. Келдыша, В.И. Кнороза, М.А. Левина, А.С. Литвинова, И.И. Метелицина, Б.И. Морозова, Ю.И. Неймарка, Я.М. Певзнера, М.А. Петрова, И.К. Пчелина, Б.С. Фалькевича, И.А. Фуфаева, А.А. Хачатурова, G. Baladi, W. Bergman, B. Breuer, D. Crolla, J.R. Ellis, E. Fiala, H.B. Pacejka, J.Y. Wong посвящены описанию процессов взаимодействия шин с опорной поверхностью.

В настоящее время на рынке систем прецизионного земледелия представлена продукция фирм Leica Geosystems, Trimble, CLAAS, Raven. В странах Европы и Америки широкое распространение получили системы параллельного вождения и автопилоты, обеспечивающие различные уровни точности вождения. Начато использование систем прецизионного земледелия импортного производства в России. Использование систем прецизионного земледелия дает экономию топлива до 20 %, удобрений и гербицидов до 30 %.

Проведенный анализ работ позволяет сделать следующие выводы:

1. Эффективность использования колесных машин может быть повышена путем улучшения их устойчивости и управляемости. Эта цель может быть достигнута за счет выбора рациональных конструктивных и эксплуатационных параметров, применением тягово-сцепных устройств, снижением уровня вертикальных колебаний. Одним из наиболее эффективных средств повышения устойчивости и управляемости движения является разработка и внедрение систем, позволяющих осуществлять управление движением без участия водителя. В настоящее время на рынке отсутствуют отечественные системы точного земледелия с автопилотированием или подруливанием.

2. Большинство известных теорий и методик описания взаимодействия колеса с опорой требуют проведения экспериментальных испытаний шин в большом объеме. Целесообразным представляется создание математической модели, позволяющей определять характеристики колеса расчётным путём, с использованием минимального объёма экспериментальных исследований.

3. Для колесной машины показателем качества её движения является уровень поперечных и угловых колебаний. Наиболее приемлемым из рассмотренных оценочных показателей является оценка по среднеквадратичным отклонениям поперечного смещения и курсового угла. Наличие устойчивости целесообразно оценивать по собственным значениям матрицы системы дифференциальных уравнений движения.

Исходя из вышеизложенного, поставлены следующие задачи исследования:

1. Разработать модель динамической системы «опорная поверхность – шина – колесная машина – система управления движением» с последующей реализацией в мехатронных моделях колесных машин для симуляции их рабочих движений и апробации разработанных систем управления.

2. Получить математические модели системы управления движением колесных машин и произвести оценку их работоспособности и эффективности по результатам компьютерного моделирования.

3. Разработать механико-математическую модель для определения стационарных характеристик силового взаимодействия пневматических шин с опорной поверхностью и динамическую математическую модель колеса для описания его неустановившегося движения.

4. Создать комплекс экспериментального оборудования для исследования процессов взаимодействия шин с опорной поверхностью. Провести испытания для разработки и уточнения механико-математической модели шины. Экспериментально определить характеристики силового взаимодействия пневматических колес и рабочих органов почвообрабатывающих машин с почвой.

5. Разработать электронно-механическую систему управления движением колесными машинами с использованием систем глобального позиционирования и прикладное программное обеспечение, обеспечивающее взаимодействие модулей системы и пользовательский интерфейс.

6. Провести испытания системы управления в лабораторных и полевых условиях.

Во второй главе представлены математические и мехатронные модели для разработки и апробации системы управления движением одиночных и шарнирно-соединенных колесных машин.

Для создания мехатронных моделей применялся прикладной пакет CAMeL-View, (iXtronics GmbH, Падерборн, Германия), использующий идеологию визуального объектно-ориентированного программирования и предназначенный для разработки моделей различных механических систем, их анализа и оптимизации.

Были разработаны модели экспериментального автомобиля, колесного трактора с шарнирной рамой, пахотного машинно-тракторного

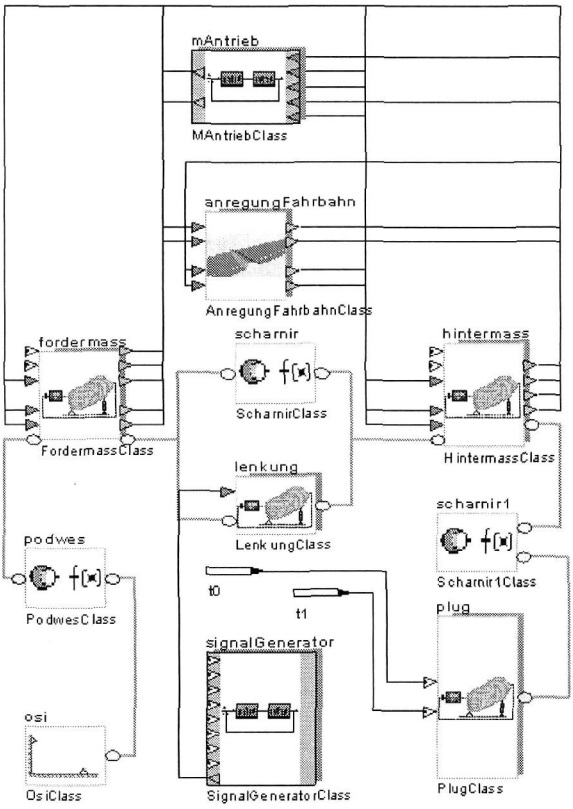

Рисунок 1 – Модель машинно-тракторного агрегата на верхнем уровне иерархии

агрегата в составе колесного трактора и полунавесного плуга, стенда «рулевое управление - передняя подвеска». На рисунке 1 изображена модель машинно-тракторного агрегата на верхнем уровне иерархии, 3D-модель представлена на рисунке 2. Передняя часть трактора fordermass при помощи сочленения podwes соединяется с блоком osi, моделирующим инерциальную систему отсчета, связанную с землей. Сочленение допускает перемещения трактора в направлениях трех осей пространства и поворот вокруг них. Задняя часть трактора hintermass соединяется с передней сочленением scharnir, допускающим их взаимный поворот относительно вертикальной и продольной осей. Полунавесной плуг представлен механической подсистемой plug, соединенной блоком scharnir1 с задней секцией трактора. Механическая подсистема lenkung предназначена для генерации управляющего момента слома рамы трактора для обеспечения движения по задаваемой траектории. SignalGenerator позволяет задавать различные виды траектории с использованием библиотеки сигналов. Основные массы передней и задней части трактора представлены в подсистемах fordermass и hintermass как твёрдые тела с задаваемыми массово- геометрическими характеристиками. Для моделирования движения трактора с заблокированным дифференциалом колеса передней и задней оси соединены между собой жесткой связью с возможностью поворота относительно основных несущих масс частей трактора.

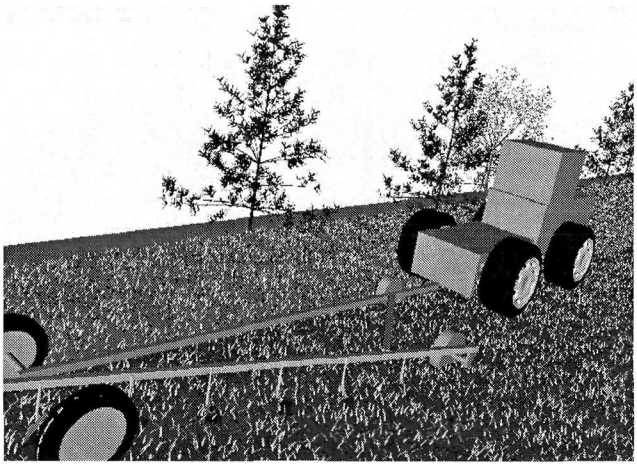

Рисунок 2– 3D модель машинно-тракторного агрегата

Основное назначение подсистемы m_Antrieb – генерация крутящего момента на колесах трактора для обеспечения движения с задаваемой скоростью с применением пропорционально – дифференциального (ПД) регулирования. Входами являются текущие значения скорости движения передней секции трактора, определяемые в проекции на её продольную ось симметрии. Выходами являются крутящие моменты, подаваемые на переднюю и заднюю полуоси трактора.

Математическая модель шины, входящая в подсистемы передней и задней секций трактора, должна «поставлять» в процессе моделирования силы и моменты на ободе колеса в зависимости от позиции, ориентации, линейной и угловой скоростей обода колеса и учитывать возмущающее действие со стороны

микропрофиля дороги (рисунок 3). На рисунке 4 представлена топология модели шины. Входными параметрами модели являются кинематические характеристики обода колеса – координаты центра масс колеса, проекции линейной и угловой скорости на инерциальные координатные оси и подвижные оси, связанные с ободом колеса.

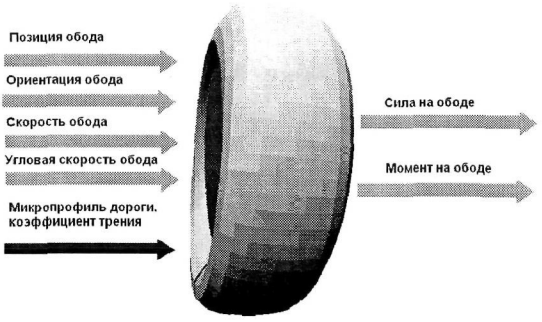

Рисунок 3 – Функциональная схема модели шины

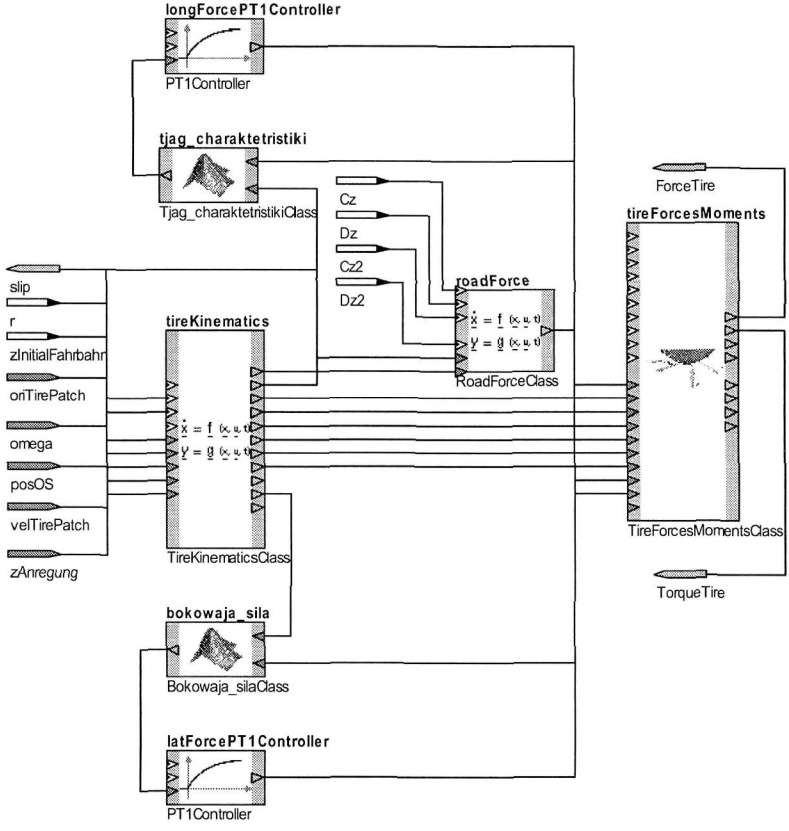

Рисунок 4 – Топологическое отображение модели шины трактора

Величины проекций сил и моментов на оси определяются по величине продольного и бокового скольжения колеса относительно опорной поверхности. Расчёт скольжений основан на входных кинематических параметрах модели, которые в процессе моделирования «поставляет» модель трактора. На вход блока tireKinematics в процессе моделирования подаются текущие значения координат центра масс posOs, угловой скорости omega, скорости центра масс velTirePatch обода колеса в проекциях на инерциальные оси. Трансформационная матрица oriTirePatch содержит значения косинусов углов, составляемых осями подвижной системы координат, связанной с вращающимся колесом, с осями инерциальной системы отсчета (направляющие косинусы). Используя операции векторного и скалярного произведения векторов кинематических характеристик обода колеса, определяются величины проекций скорости на направления осей, одна из которых проходит вдоль плоскости обода в горизонтальной плоскости, вторая перпендикулярно ей (вдоль оси вращения колеса). По проекциям скорости определяется угол отклонения вектора скорости центра колеса от плоскости его обода (угол увода). Угол увода определяет боковую силу, действующую на колесо со стороны опорной поверхности.

Одной из функций блока tireKinematics является определение продольного скольжения, по величине которого просчитывается продольная сила. По текущим значениям координаты Z центра колеса, углов наклона плоскости обода (трансформационная матрица oriTirePatch) и вектора возмущений со стороны опорной поверхности zAnregung получаем значения динамического радиуса колеса и величину вертикальной деформации шины. Величина динамического радиуса используется для определения продольного скольжения колеса и является входным параметром блока TireForcesMoments, определяющего проекции главного вектора и главного момента сил со стороны опорной поверхности. Вертикальная деформация используется в модели для определения вертикальной силы в контакте и является входом для блока RoadForce. Вертикальная сила принимается пропорциональной величинам вертикальной деформации и скорости ее изменения.

Зависимости боковых и продольных сил для различных значений вертикальной нагрузки, углов увода и продольного скольжения при установившемся боковом и продольном движениях колеса определены расчетным путём и занесены в табличные блоки tjag_charaktetristiki (продольная сила) и bokowaja_sila (боковая сила). На вход табличных блоков подаются текущие значения вертикальной нагрузки на колесо и значений продольного скольжения (для блока tjag_charaktetristiki) и угла увода (для блока bokowaja_sila), выходами являются текущие значения сил для установившегося движения колеса. Для учета неустановившегося увода (или неустановившегося продольного скольжения) выходы блоков боковой и продольной сил соединены с входами интегрирующих блоков PT1Controller, на выходе которых получается реальное значение сил. На вход блока TireForcesMoments подаются значения сил и стабилизирующего момента в проекциях на координатные оси, связанные с ободом колеса. При использовании значений выхода блока tireKinematics производится их пересчет в инерциальной системе отсчета.

Механичская подсистема anregungFahrbahn предназначена для описания микрорельефа опорной поверхности и определения вертикальных возмущений для колес трактора при его движении. За основу при описании микрорельефа полосы движения принят микрорельеф квадрата со стороной 4 метра, сформированный Матлаб-функцией Peaks. Реализация микрорельефа при скорости движения 2, 5 м/сек является эргодической стационарной случайной функцией со среднеквадратическим отклонением 0,025 метра и основными частотами спектра до 1,5 гц .

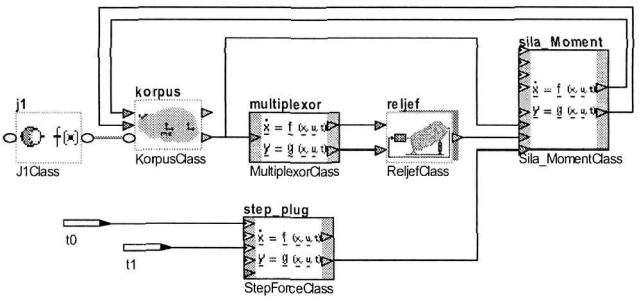

Рисунок 5 – Модель корпуса плуга

В подсистеме plug с рамой плуга соединены пневматические, металлические опорные колеса и корпуса плуга. На рисунке 5 представлена модель корпуса плуга. Блок multiplexor из вектора текущих координат корпуса плуга, представленного как твердое тело блоком korpus, выделяет координаты x и y и подает их на вход подсистемы reljef для определения z– координат микрорельефа. По рассчитанной глубине обработки в блоке sila_Moment определяются главный вектор и главный момент силового взаимодействия корпуса с землей и подаются в качестве входов на корпус. Продольная составляющая главного вектора определяется по формуле Горячкина, поперечная и вертикальная составляющие пропорциональны продольной.

Для моделирования постепенного нарастания сил при заглублении плуга в течение задаваемого времени применяется блок slep_plug, генерирующий переходную функцию, изменяющуюся от нуля до единицы по кубической зависимости. Значение функции используется в качестве множителя продольной силы в блоке sila_Moment.

Разработанная модель была использована для апробации управления на основе базисных маневров. Необходимый угол слома рамы определяется как линейная комбинация зависимостей для изменения кривизны траектории, направления движения, поперечного перемещения и начального угла поворота управляемых колес. При моделировании движения МТА было установлено, что для скорости движения 2,5 м/с минимальное значение периода управляющего воздействия составляет 3 секунды. При меньшем значении времени система становится неустойчивой. Рассматривалось движение по задаваемой прямолинейной траектории при глубине обработки 24 сантиметра.

На рисунке 6 приведён закон изменения угла слома рамы для поддержания прямолинейного движения. Максимальное значение угла не превышает 15

градусов. Амплитуда боковых отклонений центра масс плуга не превышает 8 сантиметров (рисунок 7).

Для разработки управления с использованием ПИ-регулирования с наблюдателем используется описание объекта управления в пространстве состояний

$$\dot{x} = Ax + B_1 u + B_2 w,$$
$$y_1 = C_1 x, y_2 = C_2 x.$$

где x – n-мерный вектор состояния, u – m-мерный вектор управления, w – r-мерный вектор внешних неконтролируемых возмущений, y_1 – l-мерный вектор измерений, y_2 – p-мерный вектор регулируемых переменных.

Управление строится в виде:

$$u = F_1 \bar{x} + F_2 z,$$
$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + B_1 u - L(y_1 - C_1 \bar{x}),$$
$$\dot{z} = y_2 - v,$$

где $\bar{x}$ – оценка состояния, F_1, F_2, L – матрицы обратной связи, v – командный сигнал.

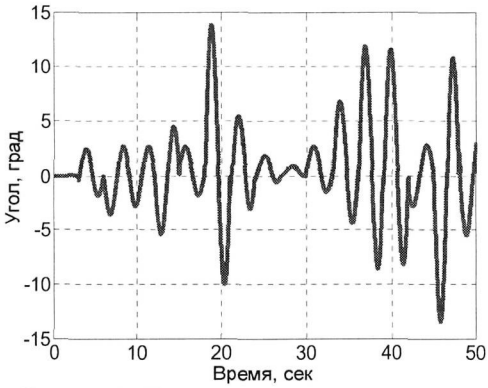

Рисунок 6 – Управляющий угол слома рамы трактора

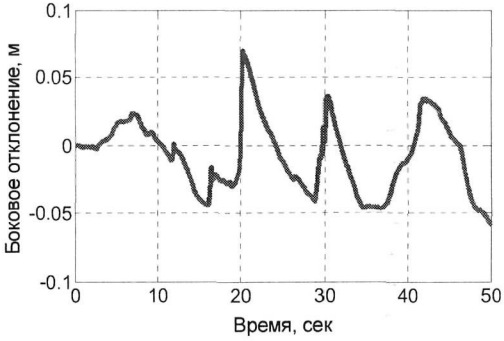

Рисунок 7 – Боковое отклонение центра масс плуга

Замкнутая система описывается уравнениями

$$\dot{x} = Ax + B_1 F_1 \bar{x} + B_1 F_2 z + B_2 w,$$
$$\dot{\bar{x}} = (A + B_1 F_1 + L_1 C_1)\bar{x} + B_1 F_2 z - LC_1 x,$$
$$\dot{z} = C_2 x - v.$$

Матрица замкнутой системы имеет вид

$$\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B_1 F_1} & \mathbf{B_1 F_2} \\ -\mathbf{LC_1} & \mathbf{A + B_1 F_1 + LC_1} & \mathbf{B_1 F_2} \\ \mathbf{C_2} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}.$$

Матрицы обратной связи определим, решая два матричных уравнения Сильвестра, соответственно для пар матриц

$$\left(\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C_2} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{B_1} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \right), \quad (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}, \mathbf{C_1}^{\mathrm{T}}),$$

сдвигая собственные числа матрицы замкнутой системы на комплексной плоскости влево на значение $\mu > 0$.

На рисунке 8 изображена модель ПИ- регулирования, реализованная в CAMeL-View.

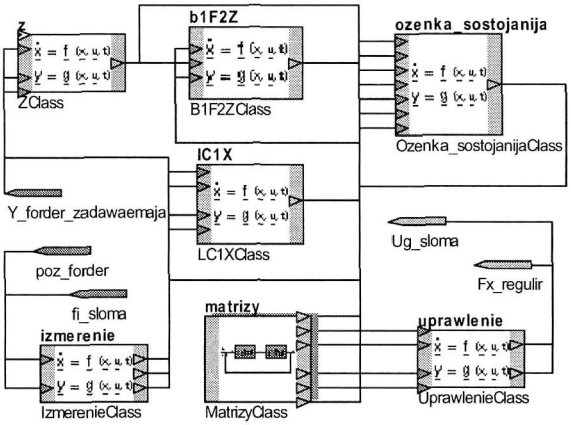

Рисунок 8 – Модель Пи-регулирования для колесного трактора с шарнирной рамой

В блоке izmerenie, входами которого являются вектор текущих координат центра масс передней секции трактора и угол слома рамы, происходит формирование наблюдаемых скалярных величин. По величине рассогласования между задаваемыми и текущими значениями регулируемых величин в блоке Z путем интегрирования определяются текущие значения матрицы Z. Матрицы линеаризованной системы A, B1, C1 и матрицы обратной связи F1, F2 и L представлены соответствующими математическими блоками в математической подсистеме matrizy. В блоке ozenka_sostojanija с использованием матриц системы и обратной связи определяются прогнозируемые значения переменных состояния. По величине оценки состояния и значения Z, с использованием матриц обратной связи F1 и F2 в блоке uprawlenie определяются управляющие угол слома рамы и движущая сила на колесах, обеспечивающие движение трактора по заданной траектории.

Для колесного трактора в среде CAMeL-View было проведено моделирование манёвра «переставка» с использованием разработанного ПИ-регулирования. В качестве управления принимался угол слома рамы. Полученные зависимости угла слома рамы от времени и траектория центра масс передней секции при переставке, изображённые на рисунках 9 и 10, соответствуют законам их изменения при соответствующих реальных маневрах, что свидетельствует о работоспособности модели ПИ- регулирования.

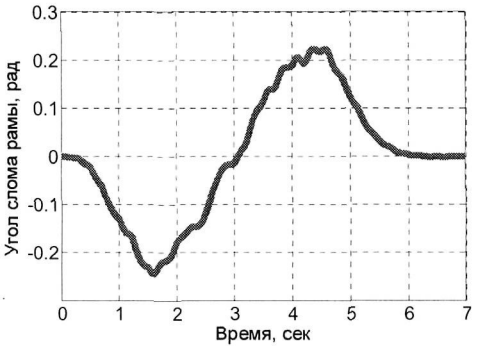

Рисунок 9 – Управляющий угол слома рамы трактора при переставке

Одним из важнейших фак-

торов, оказывающих влияние на устойчивость и управляемость, являются вертикальные колебания колесных машин. Их минимизация позволяет улучшить динамику, устойчивость, управляемость и комфорт колесной машины. В процессе работы автора на кафедре автоматизации и техники регулирования технического университета города Падерборн (Германия) в проекте «Хамелеон» по разработке и созданию экспериментальной колесной мобильной машины с раздельным электрическим приводом и управлением для всех колес была предложена идея использовать массу приводного электродвигателя, установленного на нижнем рычаге подвески, как динамический гаситель вертикальных колебаний. Для использования массы приводного электродвигателя как динамического гасителя необходимо обеспечить допустимые по амплитуде с конструктивной точки зрения вертикальные колебания электромотора относительно рычага подвески. С этой целью крепление электромотора к нижнему рычагу подвески предложено осуществить с помощью эластичных элементов. Они должны обеспечивать максимальный угол поворота корпуса приводного электромотора до 5 градусов при действии приводного момента на колесо и максимально возможное демпфирование вертикальных колебаний колеса и кузова.

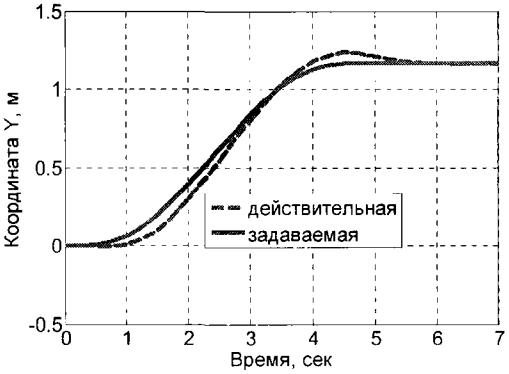

Рисунок 10 – Траектория центра масс передней секции трактора при переставке

Для решения этой задачи на первом этапе с применением уравнений Лагранжа 2 рода была разработана механико-математическая модель системы, состоящей из колеса, нижнего рычага подвески и приводного электромотора с редуктором. В качестве обобщенных координат приняты вертикальные деформации шины колеса и эластичных элементов крепления приводного электромотора, отсчитываемые относительно положения статического равновесия колеса и электромотора.

По результатам аналитических расчетов был определен коэффициент динамичности η, равный отношению амплитуды вынужденных колебаний к величине вертикальной деформации колеса A_0 при статическом действии на колесо максимального значения возмущающей силы P_1. Для решения задачи по определению оптимальных значений коэффициента жесткости и коэффициента демпфирования упругих элементов крепления приводного мотора, обеспечивающих лучшее вертикальное демпфирование колеса при действии периодической возмущающей силы, был разработан сценарий в MATLAB и проведено математическое моделирование. Установлено, что минимальное значение коэффициента динамичности достигается при значении коэффициента жесткости

49000 Н/м и коэффициента демпфирования 460 Нсек/м. Полученные оптимальные значения коэффициентов носят предварительный характер т. к. не принималось во внимание влияние кузова.

Для более точного определения оптимальных характеристик опор двигателя в CAMeL-View была разработана мехатронная модель четвертой части колесной машины «Хамелеон». В модели крепление приводного электродвигателя осуществлялось при помощи четырех упругих опор (резиновых подушек), разнесенных по высоте для более эффективного восприятия приводного момента. Моделировалось вертикальное движение при вертикальном возмущении в контакте 1 см. Были получены амплитудно- частотные характеристики колеса и кузова при варьировании коэффициентов жесткости и демпфирования подушек крепления электродвигателя, а также определены резонансные частоты. По результатам моделирования сделан вывод, что лучшее демпфирование колеса и кузова дает применение упругого элемента крепления с суммарными коэффициентами жесткости 48000 Н/м и демпфирования 500 Нсек/м. Вертикальное среднеквадратичное отклонение центра колеса снижается на 22 % , демпфирование колеса увеличивается на 50 %.

В третьей главе представлена механико-математическая модель шины для определения характеристик взаимодействия пневматического колеса с опорной поверхностью, приводятся результаты экспериментальных исследований и математического моделирования по определению выходных характеристик колеса.

При определении характеристик бокового увода колеса принимается, что боковое движение происходит за счет деформации шины и скольжения (или сдвига грунта) относительно опорной поверхности.

Для определения формы экваториальной линии шины принимается модель, схематично изображенная на рисунке 11. Так как элементы протектора расчленены, его можно представить как "щетку" с продольной жесткостью $C_{хп}$ и поперечной жесткостью $C_{уп}$. Поперечные и продольные смещения протектора происходят лишь в контакте шины с опорной поверхностью и принимаются пропорциональными продольным q_x и поперечным q_y удельным касательным силам. Подпротекторный слой представляет собой сплошную резиновую ленту, лежащую на брекере, и моделируется балкой с изгибной жесткостью $[EJ_z]_1$, лежащей на основании с жесткостью K_1. Брекерный слой моделируется балкой с изгибной жесткостью $[EJ_z]_2$, лежащей на упругом основании с жесткостью K_2. Основанием для брекерной балки является боковина шины. Для

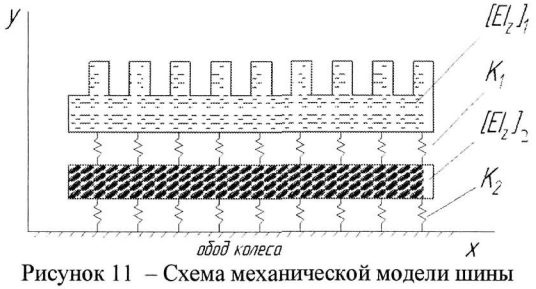

Рисунок 11 – Схема механической модели шины для определения экваториальной линии

определения поперечной деформации с учетом действия продольных сил (тяговый и тормозной режимы качения) применяется дифференциальное уравнение продольно-поперечного изгиба стержня на упругом основании.

Экспериментально установлено, что при действии на колесо боковых сил в интервале от 0 до предельно возможной по сцеплению ϕP_z верхняя часть шины практически не деформируется. В некоторых шинах верхние точки смещаются относительно обода, однако их деформации практически одинаковы. Исходя из этого, начальный угол наклона экваториальной линии к плоскости обода $\frac{dy_0}{dx}$ принимается равным нулю. С учетом этого уравнение принимает вид:

$$\frac{d^4y}{d^4x} - \frac{N}{EJ_z}\frac{d^2y}{dx^2} - \frac{q_x}{EJ_z}\frac{dy}{dx} + \frac{ky}{EJ_z} = \frac{q_y}{EJ_z},$$

где N – продольное усилие в стержне; EJ_z – изгибная жесткость балки; k – жесткость упругого основания; q_y – интенсивность поперечной нагрузки в произвольном сечении балки, q_x – интенсивность продольной нагрузки.

Для решения уравнения применяется метод конечных разностей, позволяющий определить поперечный прогиб в произвольном сечении шины.

Экспериментальные исследования проводились для определения напряжений и скольжения в контакте шины с опорной поверхностью. Боковое скольжение шины при качении с уводом определялось на стенде с плоской опорной поверхностью с применением разработанных устройств (рисунок 12). С целью определения скольжения и установления законов его распределения по длине и ширине контакта шины были проведены экспериментальные исследования увода колеса с шиной 260-508R. На рисунке 13 изображено распределение поперечного скольжения протектора экваториальной линии шины по длине контакта. Результаты экспериментов показали, что по мере увеличения боковой силы, что соответствует увеличению угла увода, зона скольжения

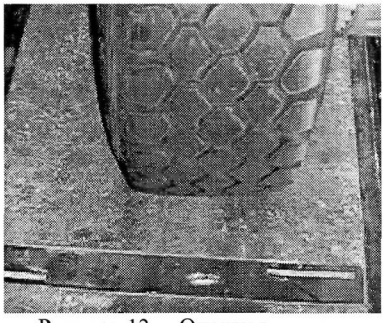

Рисунок 12 – Опорная плита с приспособлением для определения проскальзывания

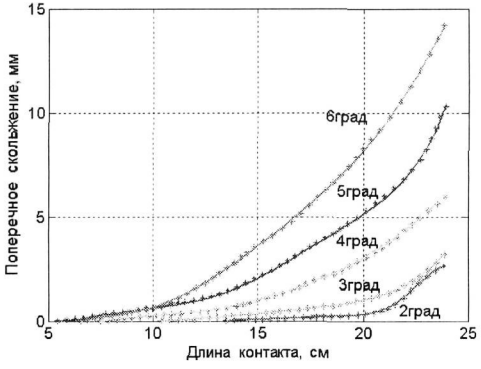

Рисунок 13 – Распределение поперечного скольжения протектора экваториальной линии шины 260-508R по длине контакта при вертикальной нагрузке 15 кН

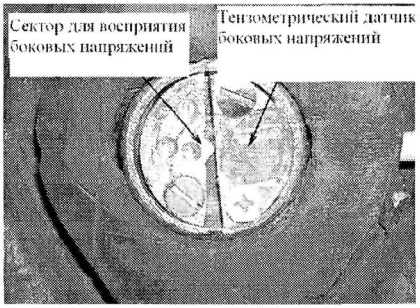

Рисунок 14– Устройство для измерения напряжений в контакте шины с опорной поверхностью перед испытаниями

Рисунок 15 –Вертикальные напряжения по центральной беговой дорожке для давления воздуха в шине 0,44 МПа

возрастает. При увеличении вертикальной нагрузки на колесо абсолютные значения проскальзывания протектора увеличиваются. Это явление может быть объяснено увеличением длины контакта с опорой при увеличении нагрузки.

С целью одновременного определения поперечного и вертикальных напряжений в контакте с опорной поверхностью было разработано и изготовлено устройство, изображенное на рисунке 14. Касательные боковые силы воспринимались сектором, закрепленным относительно корпуса устройства с возможностью поворота под действием боковых сил. Выступ сектора воздействует на тензометрическую балку, вызывая ее изгиб и изменение сигнала измерительной мостовой схемы. Вертикальные напряжения определялись по величине прогиба круговой мембраны, расположенной в нижней части корпуса устройства.

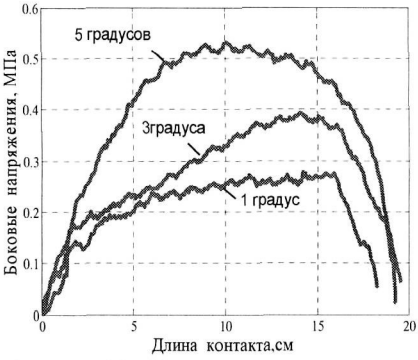

Рисунок 16 – Боковые напряжения при вертикальной нагрузке на колесо 10 кН и давлении воздуха 0,45 МПа

На рисунке 15 изображено распределение вертикальных напряжений, на рисунке 16 - боковых. Напряжения и скольжение определялись по трём беговым дорожкам протектора шины при пяти давлениях воздуха в шине и четырёх вертикальных нагрузках на колесо.

Результаты экспериментальных исследований напряжений и скольжения шин были использованы для уточнения описания боковых, вертикальных удельных сил и бокового скольжения протектора в механико-математической модели шины.

Механико-математическая модель шины была реализована в среде MATLAB в виде файл-сценария. Модель позволяет по задаваемой боковой силе

определить экваториальную линию шины и угол увода. Получены зависимости боковой силы от угла увода при различных давлениях воздуха для шины ФД-12.

На рисунке 17 представлены полученные путём моделирования зависимости боковой силы от угла увода при давлении воздуха в шине 0,16 МПа для значений вертикальных нагрузок в рабочем интервале. Полученные зависимости были использованы в модели колеса мехатронной модели трактора К-701.

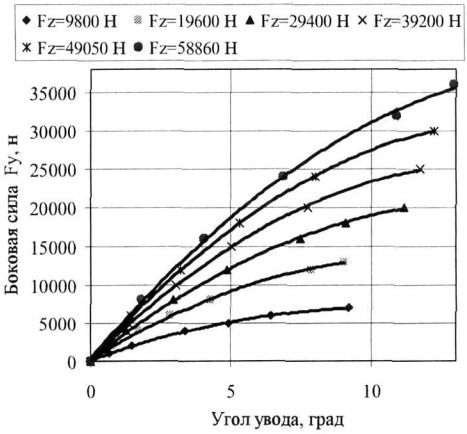

Рисунок 17 – Зависимости боковой силы от угла увода шины 28.1R26 ФД-12

В четвертой главе приводится описание разработанной системы управления движением с использованием спутниковой навигации, представлены результаты её лабораторных и полевых испытаний. Для уточнения коэффициентов ПИД - регулирования электродвигателя усилителя руля, используемого в системе управления в качестве актуатора, был проведен эксперимент на стенде «рулевое управление – передняя подвеска». Электроусилитель руля Ваз-2110 был установлен на специальной сварной раме, соединенной с рамой стенда. Вал усилителя с помощью цепной передачи с передаточным отношением равным единице соединен с валом рулевого механизма (рисунок 18). Датчик угла поворота установлен на шкворне левого колеса. При проведении эксперимента использовался комплекс измерительной и управляющей аппаратуры, состоящей из компьютера со встроенной специализированной платой L-780 с двухканальным ЦАПом и 16- канальным АЦП, и измерительной схемы угла поворота колеса, генерирующей напряжение, пропорциональное углу датчика поворота колеса. Управление осуществлялось программой, реализованной на языке СИ++. Модули программы обеспечивали определение текущего угла поворота колеса, управляющего напряжения с использованием разработанного ПИД-

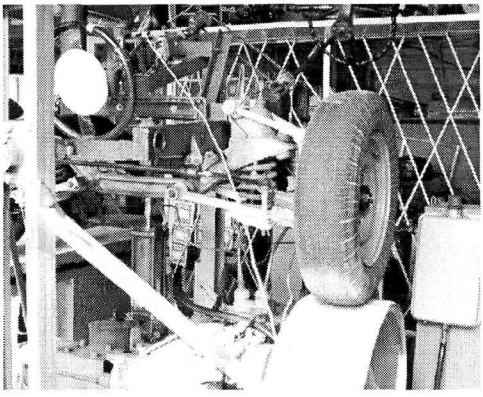

Рисунок 18 – Общий вид стенда «рулевое управление – передняя подвеска автомобиля»

регулирования и генерацию этого напряжения на ЦАПе. Управляющее напряжение подавалось с ЦАПа на плату электроусилителя. На рисунке 19 приведены графики зависимости задаваемого и реализованного угла поворота колеса для осуществления автомобилем маневра «перестановка». Отклонение текущего угла поворота от задаваемого не превышает по амплитуде 20 %, по фазе 6 %, что свидетельствует о работоспособности разработанного ПИД- регулирования и механической части системы регулирования, реализующей это управление. Систему управления движением составляют аппаратный и программный комплексы.

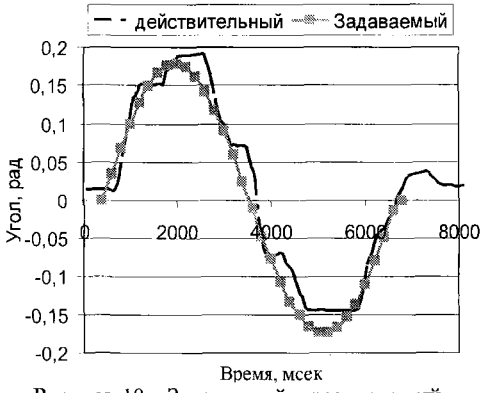

Рисунок 19 – Задаваемый и реализуемый углы поворота управляемых колес для маневра перестановка

Аппаратное обеспечение включает в себя:

1. GPS-навигатор с возможностью подключения к компьютеру через COM-порт.
2. Устройства аналогового ввода-вывода, интегрированные на одном физическом устройстве.
3. Потенциометрический датчик угла поворота колес.
4. Электроусилитель руля.
5. ЭВМ с операционной системой Microsoft Windows XP.

Схема взаимодействия аппаратного и программного обеспечения приведена на диаграмме развёртывания (рисунок 20).

При движении колесной машины система непрерывно производит следующие действия:

– GPS-навигатор фиксирует текущее положение машины на поле;

– датчик угла поворота фиксирует текущий угол поворота колес, измерительная схема подаёт напряжение на аналогово-цифровой преобразователь;

– на основе полученных данных рассчитывается отклонение от заданной траектории и определяется угол поворота управляемых колес или угол слома рамы для трактора с шарнирной рамой, обеспечивающий движение по заданной траектории;

– определяется величина управляющего напряжения, реализующего задаваемый угол поворота;

– цифро-аналоговый преобразователь подает необходимое напряжение на управляющую плату электроусилителя.

Программный комплекс состоит из двух частей:

1. Программа для задания траектории движения машины. Интерфейс пользователя с программой обеспечивается с помощью пользовательских форм.

На рисунке 22 изображена диалоговая форма для задания координат углов обрабатываемого поля, вызываемая из главной диалоговой формы (рисунок 21). Минимальное число углов поля равно трем, максимальное не ограничено. Это позволяет задавать конфигурацию полей неправильной формы с достаточной точностью. Координаты текущего положения считываются с GPS-приемника в градусной мере широты и долготы.

После задания углов поле графически отображается на главной диалоговой форме в виде замкнутой ломаной линии (рисунок 21). Координаты углов поля сохраняются в специальном файле для последующего использования. Траектория движения задаётся в виде ломаной, составленной из прямолинейных отрезков при помощи мыши. После этого программа запускается в режиме управления. На экране схематично изображается машина, движущаяся по «полю» (вид сверху), программа анализирует текущие кинематические параметры машины (направление движения, скорость,

Рисунок 20 – Диаграмма развёртывания

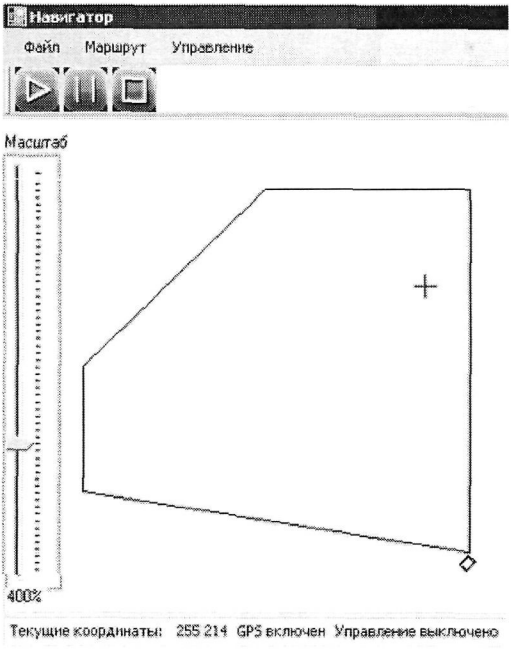

Рисунок 21 – Главная диалоговая форма

угол поворота колес или слома рамы шарнирной машины) и определяет текущее значение угла поворота колес или слома рамы, обеспечивающего движение по заданной траектории. Задаваемая и реальная траектории движения визуально отображаются на экране.

Параметрами системы являются:

– Габариты машины.

– Максимальный угол поворота колес.

– Коэффициенты ПИД-регулирования поворотом рулевого колеса.

2. Программа для управления движением колесной машины, состоящая из следующих модулей:

– Модуль позиционирования. Определяет координаты машины на основании данных, получаемых от системы глобального позиционирования – GPS.

– Модуль взаимодействия с аналоговыми приборами. Получает аналоговый сигнал с датчика угла поворота колес и преобразовывает его в цифровой. Преобразует управляющий сигнал из цифрового в аналоговый и выдает напряжение на электроусилитель руля для поворота колес на необходимый угол.

–Модуль управления. Анализирует координаты, полученные от модуля позиционирования, текущий угол поворота колес и рассчитывает управление для движения по заданной траектории.

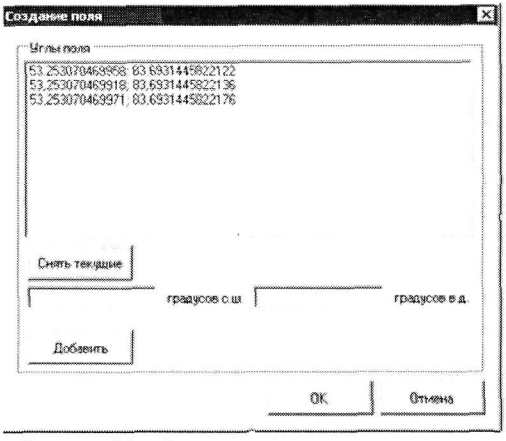

Рисунок 22 – Форма для создания нового поля

Рисунок 23 – Экспериментальный автомобиль

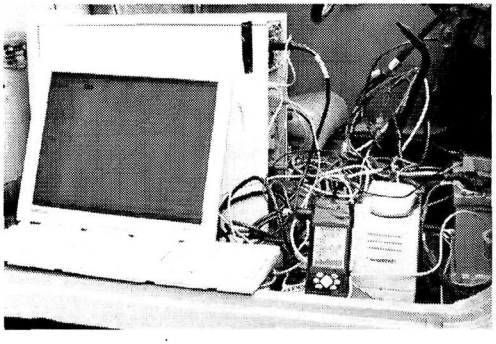

Рисунок 24 – Комплект аппаратуры

Для апробации разработанной системы управления движением колесных машин были проведены эксперименты по управлению движением экспериментального автомобиля на базе микролитражного автомобиля (рисунок 23) по задаваемой траектории. Применялось управление на основе трех базисных маневров. Количество спутников, определяемых навигатором, и, соответственно, точность его показаний определяет положение антенны по высоте. С этой целью антенна была установлена на специальной вертикальной стойке (рисунок 23). В ходе эксперимента поддерживалась связь навигатора с 12 спутниками, что обеспечивало стабильность и точность показаний навигатора до 1,5 метра. Электроусилитель руля, используемый в качестве управляющего актуатора, был прикреплен к приборной панели автомобиля. Его вал через штатный переходной элемент был соединен с валом рулевого механизма автомобиля. Комплект аппаратуры, для реализации задаваемого управления изображен на рисунке 24. Датчик угла поворота измерительной схемы был установлен на шкворне колеса. Питание компьютера и электроусилителя осуществлялось от аккумуляторных батарей, питание мостовой измерительной схемы угла поворота от гальванического элемента 4,5 вольт.

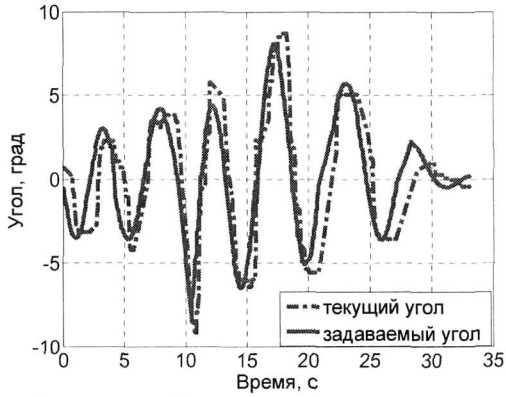

Рисунок 25 – Задаваемый и текущий угол поворота управляемых колес экспериментального автомобиля

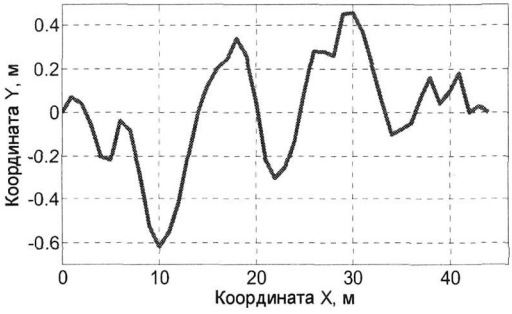

Рисунок 26 – Траектория движения центра передней оси автомобиля

При движении регистрировались текущий, задаваемый угол поворота управляемых колес и координаты автомобиля.

На рисунке 25 приведен задаваемый и реализуемый угол поворота колес, на рисунке 26 – действительная траектория автомобиля при задаваемом прямолинейном движении. Максимальное отклонение автомобиля от задаваемого прямолинейного движения не превышает 0,6 метра, среднеквадратичное отклонение 0,252 метра.

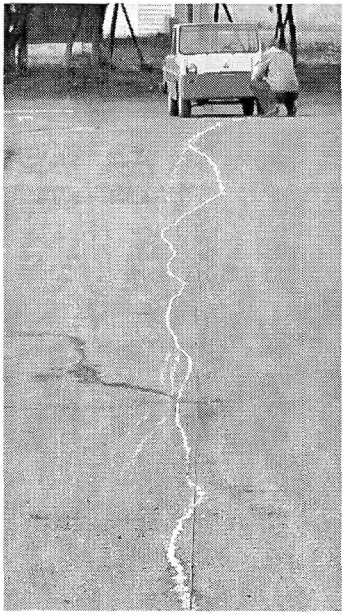

Рисунок 27 – Траектория при задаваемом прямолинейном движении

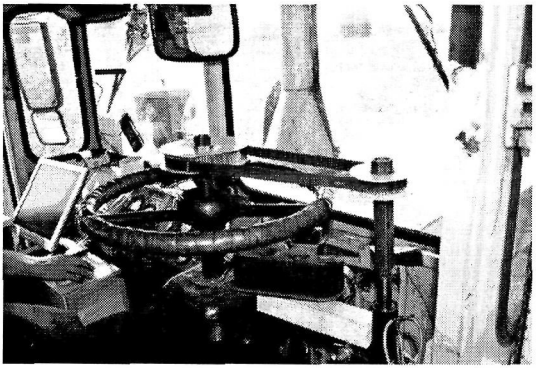

Рисунок 28 – Экспериментальное оборудование

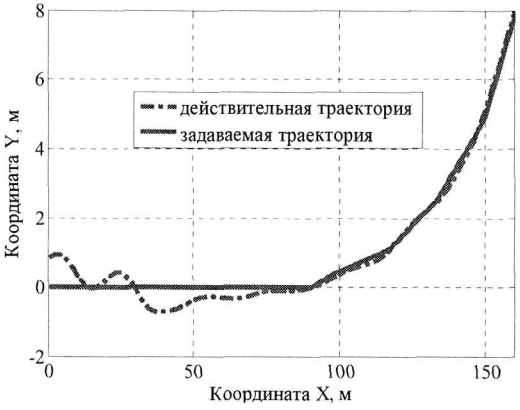

Рисунок 29– Задаваемая и действительная траектория трактора

В ходе эксперимента действительная траектория на опорной поверхности отмечалась при помощи водной эмульсии, задаваемая – шнуром, соединяющим начальное и конечное положение автомобиля (рисунок 27).

При полевых испытаниях колесного трактора с шарнирной рамой выносная антенна GPS-навигатора была установлена на кабине трактора. Питание аппаратуры и усилителя осуществлялось от аккумуляторных батарей трактора. Корпус электроусилителя был прикреплен к боковой панели кабины трактора. Передача вращения от вала электроусилителя на руль осуществлялась при помощи зубчатого ремня, соединяющего шестерни, зафиксированные на руле и валу усилителя при помощи дополнительных переходных элементов (рисунок 28). Ременная передача обеспечивает повышение крутящего момента на руле в два раза.

В качестве задаваемой траектории была принята линия, составленная из прямолинейных отрезков (рисунок 29). На рисунке 30 изображены задаваемый

(при управлении на основе трех базисных маневров) и реализованный углы слома рамы при движении трактора.

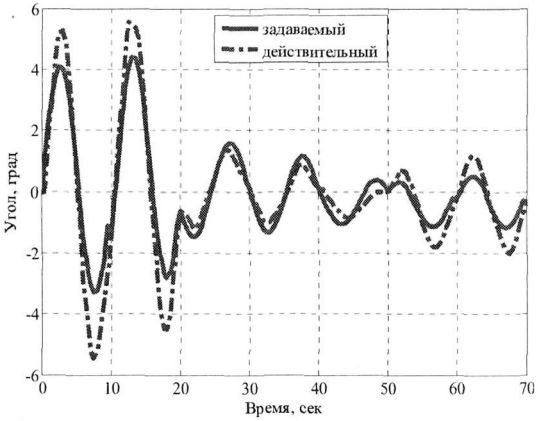

Рисунок 30 – Задаваемый и действительный угол слома рамы трактора при эксперименте

Результаты полевых испытаний системы управления подтвердили ее работоспособность. Величина среднеквадратичных отклонений трактора от задаваемой траектории по результатам полевого эксперимента равна 0,33 метра, по результатам моделирования 0,21 метра. Среднеквадратичное отклонение результатов моделирования от эксперимента составляет 0,279 метра, что позволяет сделать вывод об адекватности модели мехатронной системы трактора и системы управления реальному объекту.

Управление на основе трех базисных маневров может использоваться при проведении полевых работ, допускающих по технологии отклонения трактора от задаваемой траектории до 1 метра. Для достижения большей точности вождения целесообразно ПИ-регулирование с наблюдателем с использованием дифференциальных поправок для повышения точности определения текущих координат колесной машины.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Одним из путей повышения эффективности использования колесных мобильных машин является улучшение устойчивости их движения и управляемости. Проведенные в рамках работы теоретические и экспериментальные исследования направлены на решении этой задачи. В результате выполненных исследований получены основные выводы, результаты и рекомендации:

1. Разработана модель динамической системы «опорная поверхность – шина – колесная машина – система управления движением», реализованная в мехатронных моделях экспериментального автомобиля, колесного трактора К-701, пахотного МТА в составе К-701 и плуга ПТК-9-35, шарнирно-соединенной колесной машины. Использован современный модульный принцип построения, позволяющий воспроизвести пространственную, динамическую, многосвязную, регулируемую систему с использованием основных положений механики, электроники и теории регулирования. Произведено описание внутреннего силового взаимодействия между телами системы, что максимально приближает модель к реальному объекту и позволяет вводить внутренние силы и моменты для осуществления движения колесных машин, регулиро-

вания и управления, определять энергетические показатели работы машинно-тракторных агрегатов. Модели были использованы для исследования устойчивости движения, разработки и апробации разработанных систем управления.

2. Получены математические модели управления движением колесных машин с использованием ПИ-регулирования с наблюдателем и управления на основе базисных маневров, реализованные в виде подсистем мехатронных моделей колесных машин. При расчёте системы управления движением колёсной машины, как многосвязного объекта с неполной информацией о состоянии, использовались методы пространства состояний, в частности наблюдатель. Результаты моделирования управляемого движения колесных машин с использованием разработанных систем управления подтвердили их работоспособность.

3. Предложено улучшение устойчивости движения и управляемости колесных машин путем снижения уровня их вертикальных колебаний. Представлены математическая и мехатронная модели для определения оптимальных параметров упругих опор динамических гасителей колебаний, снижающих уровень вертикальных колебаний. Внедрение рекомендаций позволило снизить вертикальные среднеквадратичные отклонения колеса на 22 % и повысить демпфирование на 50 %.

4. Разработана механико-математическая модель шины, позволяющая получать стационарные характеристики бокового увода шины по задаваемым силам. С её использованием были получены характеристики бокового увода шины колесного трактора К-701. Динамическая модель колеса, как составная часть динамической системы «опорная поверхность – шина – колесная машина – система управления движением», позволяет определять силы и моменты, действующие в контакте колеса с опорной поверхностью при неустановившемся боковом и продольном движении колеса. Учитывается воздействие со стороны микрорельефа опорной поверхности, углы наклона плоскости обода колеса, взаимное влияние боковой и продольной силы при их одновременном действии. Путём параметризации и изменения стационарных характеристик шины могут быть получены динамические модели колес для других машин.

5. Создан комплекс экспериментального оборудования для исследования процессов взаимодействия шин с опорной поверхностью. Проведены эксперименты по исследованию процессов скольжения протектора шины и напряжений в контакте с опорной поверхностью, результаты которых были использованы в механико-математической модели для определения характеристик шины расчетным путём. На стенде с плоской опорной поверхностью определены характеристики увода пневматических колес плуга ПТК-9-35 на грунте. Экспериментально определены характеристики силового взаимодействия рабочего органа плоскореза КПГ-2,2 с почвой при отклонении его продольной оси от направления движения. Установлено увеличение продольной и поперечной составляющей главного вектора сил сопротивления почвы на 5-8 % при угловом отклонении на 6 градусов.

6. Разработана система управления движением, включающая в себя электромеханическую часть и комплекс прикладного программного обеспечения. Управляющая программа обеспечивает аппаратный и пользовательский

интерфейс с модулями системы управления. Она позволяет задавать границы обрабатываемого поля, траекторию движения, определять величину необходимого угла поворота рулевого колеса или слома рамы трактора с шарнирной рамой для обеспечения задаваемого движения, генерировать необходимое управляющее напряжение для обеспечения задаваемого управляющего угла. Для определения текущего положения колёсной машины используется спутниковая радионавигационная система.

7. Проведенные полевые эксперименты по управлению движением экспериментального автомобиля и колёсного трактора с использованием созданной системы подтвердили её работоспособность. Максимальное отклонение автомобиля от задаваемого прямолинейного движения не превышает 0,6 метра, среднеквадратичное отклонение 0,252 метра. Величина среднеквадратичных отклонений трактора от задаваемой траектории по результатам моделирования составляет 0,21 метра, по результатам полевого эксперимента 0,33 метра. Среднеквадратичное отклонение результатов моделирования от эксперимента составляет 0,279 метра. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности мехатронной модели колесного трактора реальному и работоспособности системы управления движением. Точность управления может быть существенно повышена применением дифференциальных поправок от базовых станций, или использованием дифференциального сервиса OmniSTAR, что позволит использовать колесные машины при выполнении прецизионных полевых работ.

8. Применение разработанной системы управления движением уменьшает среднеквадратичные угловые отклонений трактора на 16 % и плуга на 14 %, при этом снижается на 11 % расход топлива и повышается на 2 % производительность труда за час сменного времени. Ожидаемый экономический эффект для пахотного машинно-тракторного агрегата в составе трактора К-701 и полунавесного плуга ПТК-9-35 составляет 85,82 руб/га.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Издания по перечню ВАК

1. Павлюк, А.С. Определение проскальзывания пневматического колеса относительно опорной поверхности при качении с уводом [Текст] / А.С. Павлюк, В.И. Поддубный // Ползуновский вестник. Исследование, моделирование и управление в технических системах и природной среде. –2003г. – N1-2. – С.24 – 30.

2. Поддубный, В.И. Механико-математическая модель шины колесного трактора [Текст] / В.И. Поддубный // Вестник КрасГАУ.Техника. – 2008. – Выпуск 1. – С.222 –227.

3. Поддубный, В.И. Мехатронная модель колесного трактора для исследования устойчивости движения и управляемости [Текст] / В.И. Поддубный, А.С. Павлюк, А. Warkentin // Вестник КраГАУ.Техника. – 2008. – Выпуск 2. – С.228 –232.

4. Поддубный, В.И. Моделирование движения шарнирно-соединенной машины в Матлаб-Симулинк [Текст] / В.И. Поддубный, А.И. Валекжанин,

А.С. Павлюк // Вестник АГАУ. Технологии и средства механизации сельского хозяйства. – 2008. – №8(46). – С. 66-71.

5. Поддубный, В.И. Определение оптимальных конструктивных параметров для снижения уровня вертикальных колебаний колесной машины [Текст] / В.И. Поддубный, А.С. Павлюк // Вестник АГАУ. Технологии и средства механизации сельского хозяйства. – 2008. – №9(47). – С. 49-55.

6. Валекжанин, А.И. Повышение маневренности движения мобильных машин [Текст] / А.И. Валекжанин, В.И. Поддубный, А.С. Павлюк // Вестник - АГАУ. Технологии и средства механизации сельского хозяйства. – 2009. – №1(51). – С. 52-55.

7. Поддубный, В.И. Применение прикладного пакета CAMeL-View для моделирования управляемого движения колесного трактора [Текст] / В.И. Поддубный, Е. А. Перепелкин, А. Варкентин, М. Ган // Информационные технологии. – М., 2010. – №7. – С.24-30.

Авторские свидетельства, патенты

8. А. с. 1050352 СССР, G01 M 17/02. Устройство для измерения поперечной деформации шины колеса транспортного средства [Текст] / Л. В. Гячев, А. В. Величко, А. С. Павлюк, В. И. Поддубный (СССР). – № 3468852/27–11; заявл. 09. 07. 82. – не подлежит опубликованию в открытой печати.

9. А. с. 1100520 СССР, G01 M 17/02. Стенд для испытания пневматических шин [Текст] / Л. В. Гячев, А. С. Павлюк, А. В. Величко, А. И. Валекжанин, В. И. Поддубный (СССР). – № 3574726/27–11; заявл. 07. 04. 83. – не подлежит опубликованию в открытой печати.

10. А. с. 114275I СССР, G01 M 17/02. Устройство для измерения поперечной деформации шины колеса транспортного средства [Текст] / А. С. Павлюк, В. И. Поддубный (СССР). – № 3574726/27–11; заявл. 07. 04. 83; опубл. 28. 02. 85, Бюл. № 8. – 4 с. : ил.

11. А. с. 1302846 СССР, G01 M 17/02. Устройство для замера деформации шины катящегося колеса транспортного средства [Текст] / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк, Л. В. Гячев (СССР). – № 3779211/27–11; заявл. 13. 08. 84. – для служебного пользования.

12. Пат. 2212645 Российская Федерация, C1 7 G01 M17/02. Устройство для измерения проскальзывания протектора шины относительно опорной поверхности [Текст] / В.И. Поддубный, А.С. Павлюк А.В. Нарожный; заявитель и патентообладатель АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – Заявл. 01.04.2002; опубл. 20.09.12.2003, Бюл. № 26.

13. Пат. 2224989 Российская Федерация, C1 7 G01 M 17/02. Устройство для измерения проскальзывания протектора шины относительно опорной поверхности [Текст] / В.И. Поддубный, А.С. Павлюк; заявитель и патентообладатель АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – Заявл. 23.05.2002; опубл.27.02.2004, Бюл. № 6.

14. Пат. 2217727 Российская Федерация, C1 7 G01 M 17/02.Устройство для измерения проскальзывания протектора шины относительно опорной поверхности [Текст] / В.И. Поддубный, А.С. Павлюк; заявитель и патентооблада-

тель АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – Заявл. 11.04.2002; опубл. 27.11.2003, Бюл. № 33.

15. Пат. 2262090 Российская Федерация, C1 G 01 M 17/02. Устройство для измерения напряжений в контакте протектора шины с опорной поверхностью [Текст] / В.И. Поддубный, А.С. Павлюк; заявитель и патентообладатель АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – Заявл. 01.03.2004; опубл. 10.10.2005, Бюл. № 28.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

16. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2008612934 Российская Федерация. Механико-математическая модель шарнирно-соединенной колесной машины [Текст] / В.И. Поддубный, А.И. Валекжанин, А.С. Павлюк.; заявитель и правообладатель АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – № 2008611708; зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 17 июня 2008 г. – 25 с.

17. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2008612959 Российская Федерация. Мехатронная модель колесного трактора [Текст] / В.И. Поддубный ; заявитель и правообладатель В.И. Поддубный. – № 2008611792; зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 18 июня 2008 г. –30 стр.

18. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2008613486 Российская Федерация. Мехатронная модель колесного машинно-тракторного агрегата [Текст] / В.И. Поддубный; заявитель и правообладатель В.И. Поддубный. – №2008612277; зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 23 июля 2008 г. –35 стр.

19. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2008613467 Российская Федерация. Механико-математическая модель одиночной колесной машины [Текст] / В.И. Поддубный, А.И. Валекжанин, А.С. Павлюк.; заявитель и правообладатель АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – № 2008612343; зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 22 июля 2008 г. –18 стр.

Монография

20. Павлюк, А.С. Теоретические основы управляемого движения колесных машин [Текст]/А.С. Павлюк, В.И. Поддубный. – Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: 2010. – 239 с.

Публикации в других изданиях

21. Поддубный, В. И. Исследование малых колебаний автомобиля с учетом аэродинамического воздействия [Текст] / В. И. Поддубный, В. И. Шабалков // Научно-техническому прогрессу – творческий поиск ВУЗов : тез. науч.-практ. конф. – Барнаул, 1983. – С. 115.

22. Павлюк, А. С. Исследование механических параметров автомобильных шин [Текст] / А. С. Павлюк, В. И. Поддубный, С. И. Фионов // Научно-техническому прогрессу – творческий поиск ВУЗов : тез. науч.-практ. конф. – Барнаул, 1983. – С. 124.

23. Поддубный, В. И. Экспериментальные исследования механических характеристик шин сельскохозяйственных машин [Текст] / В. И. Поддубный,

Я. Г. Завацкий // Совершенствование рабочих органов сельскохозяйственных машин : межвуз. сб. – Барнаул, 1985. – С. 109-112.

24. Поддубный, В. И. Стенд для испытания пневматических шин [Текст] / А. С. Павлюк, А. В. Величко, В. И. Поддубный; Алт. политехн. ин-т. – Барнаул, 1985. – 12 с. – Деп. в НИИНавтопроме, № 1202-ап.

25. Гячев, Л. В. Характеристики качения с уводом пневматических шин звеньев машинно-тракторных агрегатов [Текст] / Л. В. Гячев, А. С. Павлюк, В. И. Поддубный // Оптимизация параметров сельскохозяйственных машин : сб. науч. тр. – Саранск, 1986. – С. 12-17.

26. Исследование и совершенствование методов и средств агрегатирования сельскохозяйственных машин с тракторами [Текст]: Отчет о НИР. Раздел 2 (промежуточ.) / ВИСХОМ; рук. Гячев Л.В.; исполн.: Павлюк А.С.,. Бизяев С.Н., Валекжанин А.И., Величко А.В., Поддубный В.И., Завацкий Я.Г., Батурин Е.И. – М., 1985. –143 с. –№ гос. регистрации 01840004623.

27. Исследование устойчивости движения сельскохозяйственного автопоезда при работе вспомогательного тормоза [Текст]: Отчет о НИР. Раздел 1 (заключ.) / АлтПИ ; рук. Павлюк. А.С.; исполн.: Валекжанин А.И., Бизяев С.Н., Поддубный В.И., Батурин Е.И., Величко А.В. – Барнаул, 1985. –103 с.– № гос. регистрации 78077654.

28. Исследование устойчивости движения автопоезда ЧМЗАП [Текст]: Отчет о НИР. Кн. 2(заключ.) / АлтПИ; рук. Павлюк А.С.; исполн.: Величко А.В., Гячев Л.В., Батурин Е.И., Поддубный В.И. – Барнаул, 1985. –225 с. – № гос. регистрации 78077654.

29. Поддубный, В.И. Исследование механических характеристик шин, влияющих на устойчивость движения мобильных машин [Текст] / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк; Алт. политехн. ин-т. – Барнаул, 1986. – 9 с. – Деп. в ЦНИИТЭИтракторсельхозмаше 07.08.86, № 727-тс.

30. Поддубный, В.И. Определение характеристик увода шин для исследования устойчивости движения автотранспортных средств [Текст] / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк, А. В. Величко; Алт. политехн. ин-т. – Барнаул, 1987, 12 с. – Деп. в ЦНИИТЭИавтопроме, № 1546-ап 87.

31. Павлюк, А. С. Влияние давления воздуха в шине на устойчивость звеньев машинно-тракторных агрегатов [Текст] / А. С. Павлюк, В. И. Поддубный // Научно-технический прогресс в машиностроении : тез. докл. науч.-техн. конф. – Барнаул, 1987. – С. 36-38.

32. Поддубный, В. И. Характеристики увода пневматических шин [Текст] / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк, А. И. Валекжанин; Алт. политехн. ин-т. – Барнаул, 1989. – 8 с. – Деп. в ЦНИИТЭИавтопроме, № 1821.

33. Павлюк А.С. Основные силовые и кинематические соотношения при качении колеса с уводом [Текст] / А. С. Павлюк, В. И. Поддубный //Проблемы шин и резинокордных композитов. Нелинейность и нестационарность. Материалы 3 Всесоюзного симпозиума: сб. науч. тр. / НИИШП – М., 1991. с.36-42.

34. Павлюк, А. С. Применение экваториальной линии шины для определения характеристик увода пневматического колеса [Текст] / А. С. Павлюк, В. И. Поддубный // Исследование торможения автомобиля и работы пневматиче-

ской шины: сб. науч. тр. / Сиб. автомобильно-дорожный ин-т. – Омск, 1991. – С. 136-143.

35. Павлюк А.С. Определение характеристик силового взаимодействия с почвой рабочих органов сельхозмашин [Текст] / А. С. Павлюк, В. И. Поддубный // Совершенствование рабочих органов сельхозмашин и агрегатов. : сб. науч. тр . – Барнаул, 1994. –С. 16-18.

36. Поддубный, В. И. Влияние эксплуатационных параметров на характеристики увода пневматического колеса [Текст] / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк // Проблемы шин и резинокордных композитов. Математические методы в механике, конструировании и технологии: сб. науч. тр. / НИИШП. – М., 1995. – С. 42-46.

37. Павлюк, А.С. Математическая модель машинно-тракторного агрегата для исследования устойчивости движения в горизонтальной плоскости [Текст] / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк // Труды АГТУ им. И.И.Ползунова. Выпуск 6. Техника и технология зерна и плодов. – Барнаул, 1996. – С. 243-248.

38. Поддубный, В. И. Влияние характеристик увода шин на устойчивость движения колесных машин [Текст] / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк // Тезисы докладов 9-го Симпозиума " Проблемы шин и резинокордных композитов. Надежность, стабильность и качество "/ НИИШП. – М., 1998г. – С. 263-267.

39. Поддубный, В. И.Определение составляющих увода пневматического колеса [Текст] / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк // Тезисы доклада 10-го Симпозиума «Проблемы шин и резинокордных композитов. Десятый юбилейный симпозиум» / НИИШП. – М., 1999г. – С. 199-202.

40. Павлюк, А.С., Применение датчика Холла для определения скольжения шины в контакте с опорной поверхностью [Текст] / А. С. Павлюк, В. И. Поддубный, А.В.Нарожный // Материалы 2 Международной конференции " Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов/ АГТУ. – Барнаул, 2000г. – С. 11-13.

41. Поддубный, В. И. Применение сенсоров для исследования взаимодействия шин с опорной поверхностью [Текст] / В. И. Поддубный // Ползуновский альманах. – Барнаул, 2000г. – №4. – С.34-38.

42. Павлюк, А.С. Устройство для измерения проскальзывния протектора шины относительно опорной поверхности [Текст] / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк, А.В. Нарожный // Алтайский центр научно-технической информации. –Барнаул, 2004. – Информационный листок № 02-002-04. – С.1-2.

43. Павлюк, А.С. Определение поперечных напряжений в контакте шины с опорной поверхностью [Текст] / А. С. Павлюк, В. И. Поддубный // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов: сб. науч. тр. / АГТУ. – Барнаул, 2004г. – С.22-28.

44. Поддубный, В. И.Экспериментальные исследования напряжений в контакте шины пневматического колеса с опорной поверхностью [Текст] / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк // Ползуновский альманах.– Барнаул, 2005. – №3. – С. 69-72.

45. Поддубный, В. И. Математическая модель движения колесного трактора Текст] / В. И. Поддубный // Ползуновский альманах. – Барнаул, 2005. – №3. – С. 73-77.

46. Поддубный, В. И. Механико-математическая модель колесной мобильной машины [Текст] / В. И. Поддубный, А. С. Павлюк // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств Ч1: материалы 4 международной научно-технической конференции. – Пенза , 2006. – С. 252-258.

47. Поддубный, В. И. Снижение уровня вертикальных колебаний колесной машины [Текст] / А. С. Павлюк // Прогрессивные технологии развития: сб. материалов 4-й международной научно-практической конференции. – Тамбов, 2007. – С. 91-93.

48. Поддубный, В. И. Определение оптимальных параметров эластичных опор электродвигателя привода колеса для улучшения динамики колесной машины [Текст] / В. И. Поддубный, A. Traechtler, K.- P. Jaeker, V. Nachtigal // Мехатроника, автоматизация, управление. Моделирование, управление и испытание колесных транспортных средств. – М., 2008. – №5(86). – С. 42-44.

49. Поддубный, В. И. Математическая модель шарнирно-соединенной мобильной машины в Матлаб-Симулинк [Текст] / В. И. Поддубный, А.И. Валекжанин, А.С. Павлюк // Проблемы автомобильно-дорожного комплекса России. Часть1: материалы 5 международной научно-технической конференции. – Пенза, 2008. – С. 123-127.

50. Поддубный, В.И. Дифференциальные уравнения движения колесного машинно-тракторного агрегата [Текст] / В. И. Поддубный // Современные проблемы науки. Теория и практика агропромышленного комплекса: сб. материалов 1 международной конференции. – Тамбов, 2008. – С.176-178.

51. Поддубный, В.И. Разработка программного обеспечения для управления движением колесных машин [Текст] / В. И. Поддубный, И.Ф Анкудинов, А.А. Диль // Наука и молодежь – 2009. Сборник материалов 6 Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Секция «Информационные и образовательные технологии». Подсекция «Программное обеспечение вычислительной техники». – Барнаул, 2009. – С.6.

52. Поддубный, В.И. Мехатронная модель рулевого управления колесного трактора [Текст] / В. И. Поддубный // Интеграция науки и производства. Сборник материалов 2 Международной заочной научно-практической конференции. Секция 7. Теория и практика агропромышленного комплекса. – Тамбов, 2009. – С.88-91.

53. Поддубный, В.И. Система управления движением колесных машин [Текст] / В. И. Поддубный, И.С.Акимов, А.В. Ефанов, А.С. Павлюк // Научное творчество студентов и сотрудников автотранспортного факультета. 67 научно-техническая конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава технического университета, посвященная 200-летию транспортного образования в России. Часть 1 . – Барнаул, 2009. – С. 8-10.

Подписано в печать 10.05.2011. Формат 60x84 1/16.
Печать – цифровая. Усл.п.л. 2,09.
Тираж 100 экз. Заказ 2011 - 341

Отпечатано в типографии АлтГТУ,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46
тел.: (8–3852) 29–09–48

Лицензия на полиграфическую деятельность
ПЛД №28–35 от 15.07.97 г.