



**Васильев Андрей Викторович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ  
МАЛОГАБАРИТНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА  
ДЛЯ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ В СРЕДЕ С МАКРОПРЕПЯТСТВИЯМИ**

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном научном учреждении «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, Заслуженный конструктор РФ,

**Маленков Михаил Иванович,**

АО Научно-Технический Центр «РОКАД», главный научный сотрудник

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор,

**Наумов Валерий Николаевич**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы»

кандидат технических наук,  
доцент,

**Красильников Андрей Александрович**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Высшая школа транспорта

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем машиноведения РАН» (ИПМаш РАН)

Защита состоится «29» ноября 2021 г. в 16<sup>00</sup> часов

на заседании диссертационного совета У.05.02.02

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Главный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»: <https://www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года.

Учёный секретарь диссертационного совета



Жавнер Милана Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Наземные мобильные робототехнические комплексы (МРК) с различной степенью автономности находят всё более широкое распространение во всех сферах деятельности человека: промышленности, сельском хозяйстве, научных исследованиях, обеспечении безопасности и ликвидации последствий ЧС, военном деле. Развитие подобных машин тесно связано с решением сложной научно-технической задачи – обеспечением подвижности мобильного робота, как автономно функционирующей транспортной машины, в заранее неопределённых (недетерминированных) условиях. Особенно актуальна эта проблема для мобильных роботов, предназначенных для действий в опасных для человека экстремальных условиях. Достиagnутые в последние годы успехи в области миниатюризации всех компонентов сложных технических систем привели к появлению сначала за рубежом, а затем и в нашей стране, нового класса мобильных роботов для экстремальных условий – компактных и лёгких мобильных мини-роботов (ММР).

Принципиальное отличие ММР от более крупных аналогов – *свойство носимости*, т.е. возможность их транспортировки в компактной укладке и оперативного развёртывания силами *одного человека*, – непосредственно самим оператором. Отсюда следуют массогабаритные ограничения, предъявляемые к подобным ММР, и, как следствие, – необходимость создания высокоэффективной **малогабаритной транспортной системы**<sup>1</sup>, как одной из ключевых составных частей ММР, выполняющей транспортную функцию по доставке служебного специализированного оборудования в рабочую зону.

**Актуальной научно-технической задачей** является обеспечение подвижности малогабаритной транспортной системы ММР в городских условиях с учётом реально встречаемых на пути макропрепятствий, т.е. препятствий, соизмеримых или превосходящих по своим геометрическим параметрам размеры самого мини-робота.

Ещё одним аспектом является неправомерность простого формального переноса на транспортные системы ММР методик математического описания, используемых для более крупных мобильных роботов и полноразмерных транспортных машин. Отсутствие адекватной математической модели транспортной системы ММР приводит к возникновению существенных расчётных ошибок, не позволяющих достоверно оценить качество будущей машины, а также нагрузки, возникающие на её элементах на различных режимах работы как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации существующего изделия.

**Степень разработанности темы исследования.** ММР как объект технических систем находится на стыке таких областей как транспортная техника общего машиностроения, специальная робототехника и мини-робототехника. Поэтому основное внимание при изучении литературы было направлено на анализ теоретических и экспериментальных исследований в области обеспечения подвижности, методов проектирования и расчёта транспортных систем в соответствующих областях техники.

Исследованиями в области создания наземных колёсных и гусеничных транспортных машин различного назначения занимались такие учёные как: Агейкин Я.С., Аксёнов П.В., Антонов А.С., Беккер М.Г., Волков Ю.П., Вонг Дж., Забавников Н.А., Кристи М.К., Ксенович И.П., Львов Е.Д., Наумов В.Н., Никитин А.О., Платонов В.Ф., Чудаков Е.А., Фаробин Я.Е. и др.

---

<sup>1</sup> В работах разных авторов для обозначения рассматриваемой системы помимо термина «транспортная система» применяются также термины «система передвижения», «система движения» (англ. «mobility system», «locomotion system»).

Исследованиями в области повышения подвижности транспортных систем мобильных роботов (систем движения планетоходов) занимался коллектив учёных под руководством А.Л. Кемурджиана, создавших новое научно-техническое направление космической напланетной транспортной техники.

Имеется большое количество публикаций, посвящённых теоретическим и экспериментальным вопросам создания мобильных роботов повышенной проходимости, компьютерному моделированию процессов передвижения колёсных и гусеничных мобильных роботов различных классов и назначений. Подавляющее большинство этих исследований посвящены вопросам управления движением роботов и практически не затрагивают проблемы повышения подвижности и методов поиска технических решений для малогабаритных транспортных систем, функционирующих в среде с препятствиями, превосходящими их собственные размеры, не уделяется достаточное внимание специфике их математического описания, исследованию и оценке нагрузок на их элементах и энергетических затрат на различных режимах движения.

**Цель диссертационной работы заключается в разработке и экспериментальной проверке технического облика транспортной системы ММР носимого типа, полученного на основе поиска оптимального схмотехнического решения и компьютерных исследований моделей с высокой степенью адекватности физическому прототипу.**

Для этого в диссертации решаются **следующие задачи:**

1) обзор современного состояния ММР, анализ тенденций развития и систематизация схемных решений шасси мобильных роботов различных классов и назначений, теории проектирования наземной транспортной техники и планетоходов применительно к задаче разработки транспортной системы ММР;

2) разработка методики поиска (синтеза) схемно-конструктивного решения шасси ММР;

3) исследование путей расширения функциональных возможностей ММР и разработка алгоритмов его функционирования;

4) разработка компьютерной модели и проведение исследований действующих нагрузок и энергетических затрат транспортной системы ММР на различных режимах движения;

5) создание экспериментального образца ММР на основе предложенной транспортной системы и проведение её экспериментальных исследований.

**Научная новизна** диссертации заключается в том, что:

1) разработана методика синтеза схмотехнического решения транспортной системы малогабаритного мобильного робота, предназначенного для передвижения в среде с макропрепятствиями с учётом предъявляемых к нему требований и особенностей функционирования;

2) выявлены и сформулированы особенности математического описания транспортных систем малогабаритных мобильных роботов и разработана методика построения их компьютерных моделей, которая позволяет повысить точность расчёта транспортной системы, на величину от 10...25 % на режимах максимальных нагрузок до 30...70 % на режимах малых и средних нагрузок (как разность получаемых расчётных ошибок);

3) созданы экспериментальные образцы ММР носимого типа, в которых применены и исследованы новые технические решения, реализующие принцип реконфигурируемости транспортной системы, позволяющий существенно расширить функциональные возможности и эксплуатационные характеристики ММР.

**Теоретическая значимость** полученных результатов заключается в том, что:

1) предложен принцип построения транспортной системы ММР на основе наиболее перспективных для современной робототехники реконфигурируемых систем. Новизна предложенных технических решений, в части построения малогабаритной транспортной платформы с возможностью *геометрической и структурной реконфигураций*, подтверждена патентом РФ на полезную модель;

2) получены и теоретически обоснованы схемотехнические решения транспортной системы ММР носимого типа с *оптимизированными геометрическими параметрами*, что позволило получить транспортную систему с размерами до двух раз меньшими по сравнению с известными аналогами с сохранением аналогичных характеристик проходимости;

3) разработаны подходы к построению имитационной компьютерной модели транспортной системы ММР, которые позволяют производить теоретическое исследование режимов работы транспортной системы при *совместном* функционировании системы передвижения и механизмов изменения геометрии шасси с учётом особенностей их структурного построения и конструктивного исполнения;

4) на основе предложенных подходов разработаны компьютерные модели транспортной системы ММР в двух конфигурациях: гусеничной на основе схемы шасси 6Г2А и колёсной на основе схемы шасси 4К2Г, – показавшие *высокую степень адекватности* физическому прототипу (максимальные значения расчётных ошибок не превысили 7 % во всём диапазоне нагрузок);

5) разработаны рекомендации и алгоритмы движения ММР на основе предложенной транспортной системы через типовые препятствия в зависимости от их геометрических характеристик, что позволяет в дальнейшем перейти к задаче автоматического преодоления препятствий.

**Практическая значимость** проведённых в диссертации исследований заключается в следующем:

1) предложено уточнение существующих классификаций мобильных роботов для экстремальных условий и определено место исследуемых в диссертации ММР носимого типа в общей классификации мобильных роботов;

2) предложена классификация шасси мобильных роботов по их адаптационным способностям к условиям передвижения и система формульных записей схем шасси, дающих краткую характеристику их структурного состава;

3) предложены компоновочные решения, подтвердившие реализуемость полученной структурно-кинематической схемы транспортной системы ММР носимого типа с оптимизированными геометрическими параметрами;

4) исследованы функциональные возможности и сформулированы рекомендации по функционированию и конструктивному исполнению транспортной системы ММР на основе предложенных решений;

5) созданы экспериментальные образцы и получены результаты экспериментальных исследований транспортных систем ММР, построенных на основе предложенных в диссертации подходов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1) особенности математического описания транспортных систем малогабаритных мобильных роботов, существенные с точки зрения получаемых расчётных данных и позволяющие повысить точность расчётов;

2) имитационные компьютерные модели транспортной системы ММР носимого типа, обладающие высокой степенью адекватности физическому прототипу;

3) методика синтеза схемотехнического решения транспортной системы малогабаритного мобильного робота, позволяющая получить обоснованное техническое решение, оптимизированное с точки зрения разнородных требований, предъявляемых как к транспортной системе, так и к мобильному роботу в целом;

4) принцип построения реконфигурируемой транспортной системы ММР носимого типа, позволяющий существенно улучшить характеристики и расширить функциональные возможности малогабаритного мобильного робота.

**Объект исследования** – транспортная система мобильного мини-робота носимого типа.

**Предмет исследования** – синтез транспортных систем мобильных мини-роботов носимого типа и анализ их статических и динамических характеристик.

**Методология и методы исследования.** Основные результаты диссертации получены с использованием принципа системного анализа, методов многопараметрической оптимизации технических систем, положений теоретической механики, теории машин и механизмов, электротехники, теории и методов расчёта наземных транспортных машин и планетоходов, методов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований.

**Личный вклад автора.** Все научные и практические результаты диссертации, включая участие в создании физических образцов ММР, получены автором лично.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается экспериментальными исследованиями, проведёнными на действующих макетах ММР носимого типа, обеспечивается применением известных и апробированных методов оптимизации сложных технических систем, аккуратным и строгим составлением математического описания объекта исследования на основе принципов системного подхода, основывается на строгом соблюдении теории и методов, используемых при математическом описании и компьютерном исследовании транспортных машин и мобильных роботов другими авторами.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Результаты, полученные в диссертации, соответствуют формуле специальности 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин» в части разработки и совершенствования «теории, методов расчётов и проектирования машин, систем приводов ... с целью совершенствования существующих и создания новых машин...».

Соответствие пунктам паспорта специальности 05.02.02:

- Теория и методы проектирования машин и механизмов, систем приводов... (пункт 2).
- Повышение точности и достоверности расчётов объектов машиностроения...(пункт 5).
- Системы автоматизированного проектирования объектов машиностроения, базирующиеся на более совершенных моделях функционирования и технического состояния этих объектов (пункт 7).

**Квалификационная формула работы.** В диссертации автором на основе теоретических, проектно-компоновочных и экспериментальных исследований предложены методические рекомендации по проектированию малоразмерных мобильных роботов, передвигающихся в среде с макропрепятствиями.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты исследований и разработок докладывались в 2008-2020 годах на: Международной конференции «Экстремальная робототехника» (2009, 2010, 2012, 2014, 2017-2019), Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные задачи и системы управления» (2008, 2010, 2012, 2014, 2015), Международной научно-технической мультиконференции «Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники (ИКТМР-2009)», VI Всероссийской научно-технической конференции «Робототехника и искусственный интеллект» (РИИ-2014), 8-й Всероссийской Мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2015), Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (ICIEAM-2020).

**Реализация результатов работы.** Полученные в ходе диссертационного исследования результаты использованы в рамках фундаментальной НИР «Динго» по исследованию путей создания адаптивной системы управления движением мобильного робота, выполняемой ЦНИИ РТК в рамках государственного задания Минобрнауки России № 075-01195-20-00, а также внедрены в проектные работы по созданию в ЦНИИ РТК малогабаритных мобильных роботов.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано более 24 научных работ, в том числе 5 статей в научных журналах, включённых в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, 3 публикации в рецензируемых международных изданиях Scopus и Web of Science, а также патент на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка условных обозначений, словаря терминов, списка литературы из 146 наименований, шести приложений. Основное содержание диссертации изложено на 184 страницах, включающих 31 таблицу и 160 рисунков. Общий объём диссертации составляет 222 страницы, включая три справочных и три обязательных приложения объёмом 38 страниц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены общие черты, характерные для всех МРК, проанализирован их характерный состав, произведено определение понятия «транспортная система». Освещена история появления и развития ММР, рассмотрены их особенности, назначение и область применения, приведено описание наиболее известных зарубежных аналогов. Сформированы требования к исследуемым ММР носимого типа и их транспортным системам.

На рисунке 1 приведена упрощённая структурно-функциональная схема МРК, включающего две крупные составные части – мобильный робот (МР) и пост управления (ПУ). Сплошными стрелками обозначены силовые энергопотоки, пунктирными – информационные потоки и управляющие воздействия. Обозначения: БИУС – бортовая информационно-управляющая система; ПСУ – подсистема управления; РКУ/ПКУ – радиоканал / проводной канал управления. Функционально МРК включает три системы: транспортную, специализированную и систему управления.

Транспортная система, в соответствии с рисунком 1, объединяет элементы, непосредственно участвующие в процессе преобразования энергии бортового источника питания в механическую энергию движения. Этот процесс проходит через три стадии: распределение, преобразование и потребление энергии. Под потребителем понимается совокупность таких элементов как движитель, подвеска, подрессоренная часть, находящаяся во взаимодействии с поверхностью движения с образованием системы «местность-машина».

Подсистема управления исполнительными механизмами транспортной системы отделена от неё с целью упрощения анализа последней. Управляющие воздействия, в таком случае, считаются известными и рассматриваются в качестве исходных данных анализа.

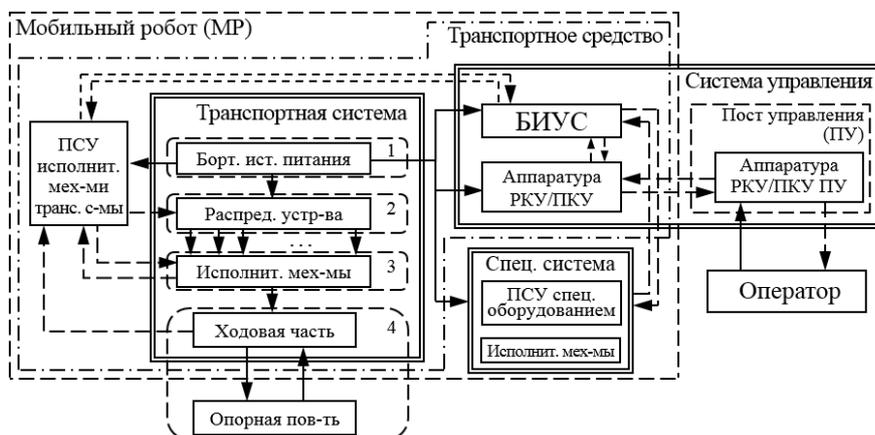


Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема МРК

ММР – относительно новый вид техники, появившийся приблизительно в начале 2000-х годов и интенсивно развивающийся в последние два десятилетия. Среди наиболее известных зарубежных предприятий, разрабатывающих ММР: FLIR (США), QinetiQ (Великобритания, США), Roboteam (Израиль), Nexter Robotics (Франция), Rheinmetall Landsysteme (Германия), Leonardo (Италия), ECA Robotic Systems (Франция) и др. В России работы по ММР ведутся в ЦНИИ РТК, МГТУ им. Н.Э. Баумана, АО «СЕТ-1» и ряде других организаций.

В результате анализа большого числа зарубежных и отечественных разработок автором обосновывается место данного вида техники в общей классификации МРК для экстремальных условий. Делается предложение по расширению (уточнению) существующих классификаций, предложенных другими авторами (А.Ф. Батанов, А.О. Рогозинников, В.Н. Наумов и др.) и дополнению их классами мини-роботы (ММР) и микророботы, которые в совокупности объединяются понятием «малогабаритные мобильные роботы».

К рассматриваемым в диссертации *ММР носимого типа* (см. рисунок 2) отнесены роботы массой от 7 до 15 кг и габаритными размерами не более 500...700 мм.

Проведённый анализ условий движения и функционирования ММР позволил сформировать комплекс требований к роботам данного класса и их транспортным системам, принятых в качестве исходных данных: 1) обеспечение минимально возможных габаритных размеров и веса; 2) передвижение в условиях городской инфраструктуры по твёрдым недеформируемым основаниям (асфальт, бетон, напольные покрытия в зданиях); 3) преодоление одиночных ступеней высотой до 250...300 мм, канав (щелей, ям) шириной до 300 мм, лестничных маршей; 4) высокая мобильность и скорость движения (не менее 1 м/с, до 3 м/с); 5) время автономной работы не менее четырёх часов; 6) ударопрочная конструкция; 7) возможность обследования ограниченных по высоте пространств, например, под днищами автомобилей; 8) продолжение функционирования после опрокидывания; 9) обеспечение максимальных возможностей по увеличению высоты визирования бортовых телекамер; 10) возможность оснащения ММР сменным оборудованием и модулями различного назначения.

**Во второй главе** произведено исследование и выполнена разработка схемных решений транспортной системы и методов функционирования ММР.

В первой части приведены результаты исследования принципов передвижения и структурно-кинематических схем (СКС) самоходных шасси современных мобильных роботов с точки зрения их адаптируемости к изменяющимся условиям движения (преодоления препятствий). Наиболее перспективный путь развития средств передвижения мобильных роботов заключается в совершенствовании реконфигурируемых систем от простейших перенастраиваемых к самореконфигурируемым. По результатам анализа более 200 конструкций, созданных за последние 50 лет, предложена классификация схем шасси на основе «эволюционного подхода» к их развитию по пути повышения *адаптационных способностей*, позволяющая *сформировать область поиска* схемного решения. Анализ СКС при их классификации заключается в определении типа механизма и числа степеней подвижности в трёх основных функциональных подсистемах – передвижения, маневрирования и адаптации. Определяются: 1) класс шасси (колёсные, гусеничные, шагающие, гибридные, реконфигурируемые); 2) число элементов движителя; 3) способ маневрирования и число управляемых элементов; 4) типы применяемых адаптационных механизмов (пассивные, активные, механизмы шагания и др.). Также предложена

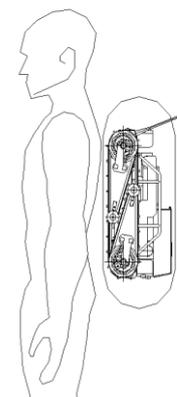


Рисунок 2 – Размещение ММР в укладке

система формульных записей СКС шасси, применяемая для краткого их обозначения в ходе анализа. Составление формулы шасси производится по определённым правилам на основе определения числа независимых подвижных элементов (степеней подвижности) в трёх упомянутых функциональных механизмах. Так, например, формула простейшего четырёхколёсного полноприводного шасси без применения механизмов поворота колёс и без дополнительных механизмов адаптации запишется в виде 4К, формула шасси известных американских марсоходов, имеющих шесть приводных колёс, четыре из которых управляемые, и механизмы адаптации с тремя пассивными степенями подвижности (балансирная подвеска типа Rocker-Bogie) – 6К4У3П, формула четырёхгусеничного шасси робота типа PackBot – 4Г1А, шагающей четырёхногой машины BigDog с тремя степенями подвижности механизмов шагания каждой ноги – 4Н12Ш, известного колёсно-шагающего ровера Athlete с шестью приводными и управляемыми колёсами, многостепенными механизмами шагания (пять степеней на каждой ноге) – 6КУ30Ш. В диссертации приводится большее количество и других примеров.

Далее формируется методика синтеза оптимального схмотехнического решения транспортной системы малогабаритного мобильного робота, включающая: 1) структурный синтез СКС шасси; 2) параметрический синтез шасси; 3) проектно-компоновочный анализ реализуемости транспортной системы на основе найденного схмотехнического решения; 4) исследование и разработку алгоритмов функционирования транспортной системы.

Предложенная методика базируется на теоретических исследованиях в области оценки подвижности наземных транспортно-технологических машин методом многокритериальной оптимизации, проводимых в НГТУ им. Р.Е. Алексеева под рук. проф. В.В. Белякова, а также методе исследования пространства параметров для решения прикладных многокритериальных задач оптимизации, разработанном д.ф.-м.н. И.М. Соболев и д.т.н Р.Б. Статниковым.

Задача синтеза СКС шасси решается методом поиска оптимального решения в области возможных альтернатив, сформированной в первой части второй главы. Для этого, исходя из сформулированных в главе 1 исходных предпосылок (требований к ММР), строится система частных критериев и ограничивающих условий, отражающих как функциональные свойства транспортной системы ММР (минимальный вес, минимальные размеры, удобство компоновки, работоспособность после опрокидывания), так и характеристики её адаптируемости к передвижению в среде с макропрепятствиями. В качестве последних рассматриваются три вида типовых препятствий: одиночное препятствие высотой  $H_{\Pi}$ , канава шириной  $B_K$  и лестница со стандартными размерами ступеней 150x300 мм. Введение в качестве количественных характеристик относительных коэффициентов позволяет сравнивать именно схемные решения шасси, безотносительно конкретных размеров выполненных конструкций. Например, для оценки проходимости СКС вводятся безразмерные коэффициенты  $K_{\Pi\Pi} = H_{\Pi}/H_T$  и  $K_{\Pi K} = B_K/L_T$ , где  $H_T$  и  $L_T$  – соответственно высота и длина шасси в сложенной (транспортировочной) конфигурации. Для оценки возможностей шасси по геометрической реконфигурации вводятся коэффициенты: изменения длины  $K_L = L_P/L_T$  (где  $L_P$  – длина шасси в разложенной (рабочей) конфигурации); изменения высоты  $K_H = H_P/H_T$  (где  $H_P$  – высота шасси в разложенной (рабочей) конфигурации); трансформации  $K_{TP} = K_L K_H$ . Соответственно, критерий минимизации размеров шасси формализуется в виде  $\{K_L, K_H, K_{TP}\} \rightarrow \max$ . В качестве других критериев, отвечающих за функциональные свойства ММР выступают: 1) минимальное число приводов, необходимых для реализации данной СКС ( $N_{\text{пр}} \rightarrow \min$ , цель – минимизация веса шасси); 2) секционность кор-

пуса ( $N_c \rightarrow \min$ , удобство внутренней компоновки и установки навесного оборудования); 3) функционирование после опрокидывания (коэффициент  $K_{\text{опр}} \rightarrow \max$ . Значения: 0 – функционирование невозможно; 0,5 – возможно движение ММР в перевёрнутом состоянии; 1,0 – возможен возврат в номинальное положение корпуса).

После предварительного отбора по условиям  $N_{\text{пр}} \leq 6$  и  $N_c \leq 2$  для анализа было отобрано 16 вариантов СКС шасси ММР.

В соответствии с упомянутыми исследованиями НГТУ значения частных критериев оптимальности для каждой исследуемой СКС нормируются в виде

$$N_i = \frac{F_i - F_i^-}{F_i^+ - F_i^-} (\beta - \alpha) + \alpha, \quad (1)$$

где  $N = \{N_1, \dots, N_n\}$  – вектор нормированных целевых функций частных критериев оптимальности  $F = \{F_1, \dots, F_n\}$ ;  $F_i^-$  – минимальное граничное значение функции  $F_i$ ;  $F_i^+$  – максимальное граничное значение функции  $F_i$ ;  $\alpha, \beta$  – граничные значения шкалы нормирования.

Решение задачи многокритериальной оптимизации производится методом свёртывания вектора частных критериев с построением функции обобщённого критерия оптимальности, имеющего вид:

$$F_s(w, N) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot N_i, \quad (2)$$

где  $w = \{w_1, \dots, w_n\}$  – весовые коэффициенты относительной важности частных критериев, причём  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ . Значения  $w_i$  определяются как

$$w_i = \delta_i / \sum_{i=1}^n \delta_i, \quad (3)$$

где  $\delta_i = 1 - F_i^- / F_i^+$  – коэффициент относительного разброса, определяющий максимально возможное отклонение по  $i$ -му критерию.

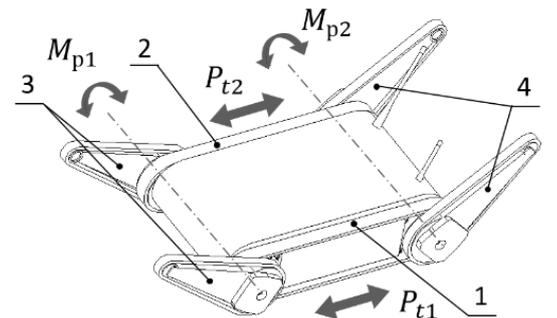
Ищется оптимальное решение СКС шасси, для которого  $F_s(w, N) \rightarrow \max$ .

В результате выполненного поиска в качестве наиболее перспективной СКС для транспортной системы ММР определена схема 6Г2А (рисунок 3) – шестигусеничное шасси с двумя тяговыми приводами (ТП) и двумя приводами механизмов изменения геометрии шасси (МИГ). Каждый из двух ТП обеспечивает движение трёх гусениц одного борта, один из приводов МИГ отвечает за поворот двух рычагов передней оси, второй – за поворот двух рычагов задней оси.

На рисунке 4 показаны возможности геометрической реконфигурации шасси 6Г2А.

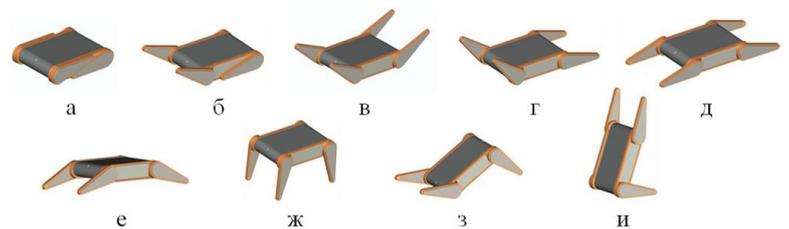
Схема 6Г2А по сравнению с альтернативными решениями

обеспечивает максимальные характеристики проходимости ( $K_{\text{ПП}} = 3,0$ ;  $K_{\text{ПК}} = 1,0$ ), наряду с максимальными значениями коэффициентов трансформации  $K_{\text{тр max}} = 3,9$  и  $K_{\text{Н max}} = 6,2$ , что позволяет задействовать возможности шасси для увеличения высоты зрениа телекамер ММР (встроенных или установленных на навесных модулях).



1, 2 – левая и правая основные гусеницы; 3 – передние рычаги с гусеницами; 4 – задние рычаги с гусеницами

Рисунок 3 – Схема шасси 6Г2А



а – транспортировочная; б, в – рабочие; г – преодоление одиночных преград; д – лестница и канава; е, ж – увеличения дорожного просвета и высоты телекамер; з – сброс груза; и – «кобра», макс. высота телекамер и препятствий

Рисунок 4 – Варианты геометрических конфигураций схемы 6Г2А

Коэффициент изменения длины  $K_{L_{max}} = 1,8$  позволяет максимально сократить габаритную длину  $L_T$  при одновременном обеспечении возможности движения по лестницам.

Целью параметрического синтеза шасси является определение оптимальных значений всех его геометрических параметров, позволяющих выполнить геометрическое построение шасси и перейти к этапам структурного построения транспортной системы и математического моделирования.

Задача параметрического синтеза в общем случае носит многокритериальный характер и решается методом оптимизации технических систем, описываемых многопараметрическими математическими моделями. С этой целью для исследуемой системы определяется пространство из  $N$  варьируемых параметров с наложенными на них ограничениями, задаются функциональные ограничения и критерии качества системы.

На рисунке 5 представлено геометрическое построение схемы 6Г2А, в таблице 1 – набор описывающих её параметров, зависимо-

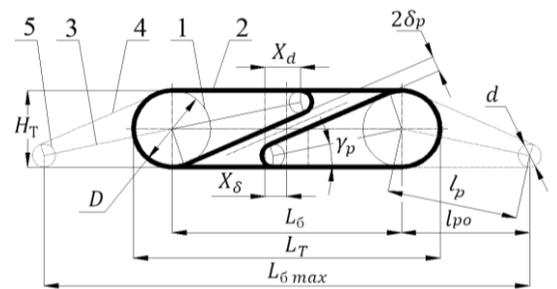
Таблица 1 – Параметризация шасси ММР

Параметр	Зависимость	Ограничение
$L_T$	–	$300 \leq L_T \leq 600$ (4)
$H_T$	–	$90 \leq H_T \leq 160$ (5)
$l_p$	–	$150 \leq l_p \leq 230$ (6)
$D$	$D = H_T$ (7)	–
$K_d$	$K_d = d/D$ (8)	$K_d = 0,3 \dots 0,4$ (9)
$L_6$	$L_6 = L_T - H_T$ (10)	–
$\gamma_p$	$\gamma_p = \arcsin\left(\frac{(1 - K_d)H_T}{2l_p}\right)$ (11)	–
$l_{po}$	$l_{po} = l_p \cos \gamma_p$ (12)	–
$L_{6max}$	$L_{6max} = L_6 + 2l_p \cos \gamma_p$ (13)	$L_{6max} \geq 670$ (14)
$2\delta_p$	$2\delta_p = f(L_T, H_T, l_p)$ (15)	$2\delta_p \geq 0$ (16)

сти между ними, параметрические и функциональные ограничения. За критерий качества исследуемой схемы (цель оптимизации) принята минимизация её габаритных размеров  $L_T$  и  $H_T$  с учётом двух функциональных ограничений: условия (14) обеспечения достаточной длины  $L_{6max}$  для движения по лестнице и условия (16) геометрического существования схемы в виде:

$$2\delta_p = \left( \frac{L_T - H_T}{2} - l_p \cos \gamma_p + \frac{H_T (1 - K_d) \cos 2\gamma_p - K_d H_T}{2 \sin 2\gamma_p} \right) 2 \sin 2\gamma_p \geq 0. \quad (17)$$

Как видно из таблицы 1, рассматриваемая система характеризуется тремя независимыми параметрами:  $L_T$ ,  $H_T$  и  $l_p$ , в пространстве которых и выполняется поиск. На рисунке 6 представлены результаты анализа зависимости  $L_T(l_p)$ , получаемой из (10) с учётом (13) и (11), совместно с функциональными ограничениями (14) и (17). Графики 1, 2, 3 соответствуют фиксированным значениям  $H_T$ , равным соответственно 90, 120 и 160 мм, что позволяет перейти от трёхмерного пространства поиска к более наглядному двумерному. Как видно из рисунка 6 полученные зависимости имеют явно выраженные минимально экстремальные значения. Таким образом, показано, что исследуемая схема 6Г2А при  $L_T \rightarrow \min$ ,  $H_T \rightarrow \min$  с учётом условия (14) имеет область оптимальных параметров 4, ограниченную значениями  $l_p$  от 190 до 205 мм. Как видно из правой части рисунка 6, эта область соответствует



1 – основные шкивы (диаметр  $D$ ) и два дополнительных шкива (на схеме совпадают с основными); 2 – основная гусеница; 3 – передний и задний рычаги; 4 – две дополнительные гусеницы; 5 – направляющие ролики (диаметр  $d$ );  $L_6$  – база шасси;  $L_{6max}$  – максимальная длина опорной поверхности;  $\gamma_p$  – половина угла между ветвями дополнительных гусениц;  $2\delta_p$  – зазор между гусеницами рычагов в транспортном положении;  $l_p$  – длина рычага;  $l_{po}$  – длина ветви дополнительной гусеницы

Рисунок 5 – Геометрическое построение схемы 6Г2А

снижению интенсивности роста коэффициента изменения длины  $K_L = (L_{6max} + d)/L_T$ , что говорит о нецелесообразности дальнейшего увеличения  $l_p$ , ведущего к росту габаритных размеров.

В результате определены основные геометрические параметры шасси ММР: длина  $L_T = 390$  мм, высота  $H_T = 90$  мм, база  $L_6 = 300$  мм, длина рычагов  $l_p = 205$  мм.

На основе проведённых в начале главы исследований и разработанных схем предложен принцип структурной реконфигурируемости транспортной системы ММР носимого типа на базе схемы 6Г2А (рисунок 7), что позволяет повысить эффективность транспортной системы ММР путём расширения функциональных свойств и повышения эксплуатационных характеристик. Под принципом структурной реконфигурируемости понимается модульное исполнение компонентов ходовой части ММР и обеспечение конструктивной возможности оперативной (в полевых условиях) смены этих компонентов оператором без применения каких-либо инструментов.

В следующей части второй главы выполняется анализ реализуемости транспортной системы на основе предложенного схмотехнического решения с оптимизированными геометрическими параметрами. С этой целью разрабатывается структурно-кинематическая схема транспортной системы и выполняется компоновка всех её составных частей, а также ММР в целом, что позволяет в дальнейшем достоверно определить их массоинерционные параметры на этапе компьютерного моделирования.

В заключительной части главы 2 исследуются функциональные возможности ММР на основе предложенного варианта транспортной системы, разрабатываются алгоритмы и рекомендации по функционированию реконфигурируемой транспортной системы, в том числе, сценарии движения через типовые препятствия, разрабатываются алгоритмические основы автоматического движения через препятствия.

**В третьей главе** выполнено построение математических и компьютерных моделей транспортной системы ММР, приведены результаты компьютерных исследований действующих нагрузок и энергетических затрат при движении транспортной системы на различных расчётных режимах.

Предложена методика математического описания и построения компьютерных моделей транспортных систем малогабаритных мобильных роботов с учётом особенностей, существенных с точки зрения получаемых расчётных результатов.

Предлагаемые подходы заключаются в:

- 1) учёте непостоянства и зависимости от скорости сил внутреннего сопротивления в электродвигателях;
- 2) учёте непостоянства и зависимости от скорости и величины внешней нагрузки сил внутреннего сопротивления и КПД в редукторах;
- 3) учёте непостоянства и зависимости от скорости сил внутреннего трения в ходовой части;

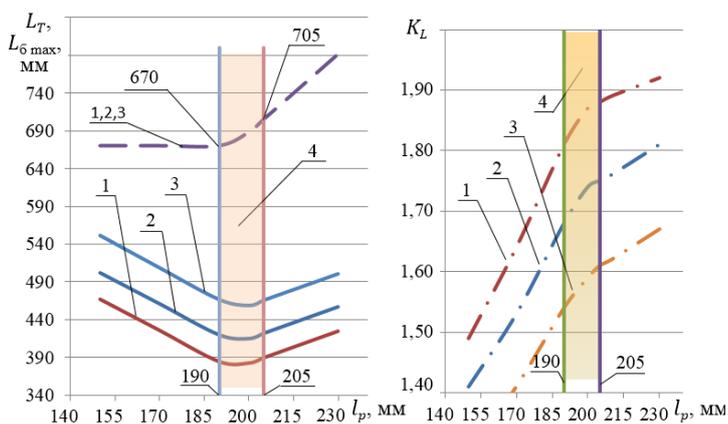


Рисунок 6 – Зависимости  $L_T$  (сплошные линии),  $L_{6max}$  (пунктирная линия) и коэффициента  $K_L$  (штрихпунктирные линии) от длины рычагов  $l_p$

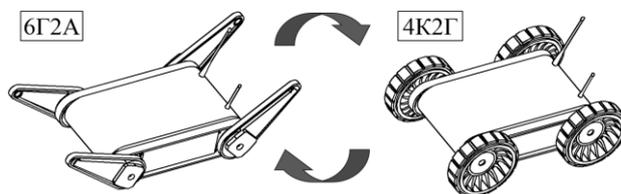


Рисунок 7 – Схема структурной реконфигурации транспортной системы ММР

4) моделировании гусениц как упругих деталей, находящихся в контактном взаимодействии с поверхностью и с корпусными элементами ММП (см. рисунок 10);

5) учёте при моделировании бортового источника питания суммарной токовой нагрузки на него, накопленной разрядной ёмкости и соответствующего им падения напряжения;

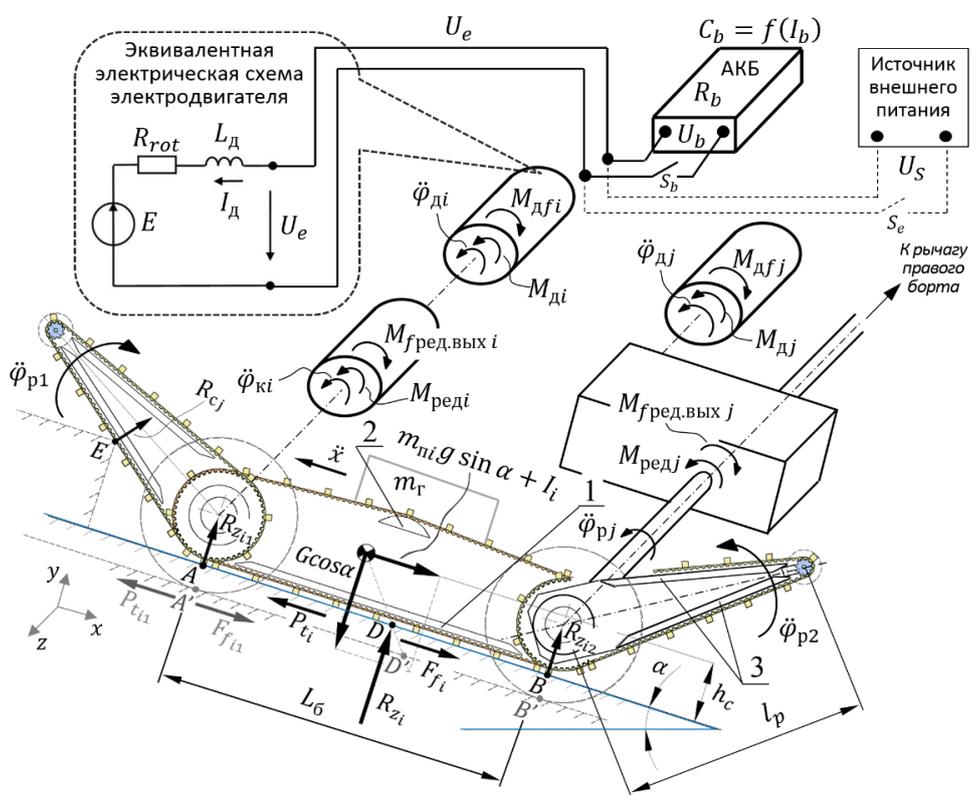
6) экспериментальной идентификации параметров, входящих в характеристики по п.1-5;

7) учёте массо-инерционных характеристик транспортной системы и ММП в целом, полученных в результате компоновки и структурного построения, выполненных в главе 2;

8) построении компьютерной модели транспортной системы на основе структурно-функционального разделения её в соответствии с рисунком 9 на две взаимодействующие между собой части (подсистемы): I – приводную («источник питания – двигатели – редукторы»), характеризующую *единственной* степенью подвижности для каждого из  $i$ -х или  $j$ -х приводов; II – исполнительную («ходовая часть – поверхность»), характеризующую сложным взаимодействием с внешней средой.

Выполнена экспериментальная идентификация параметров характеристик, входящих в модели звеньев транспортной системы: 1) внутреннего трения электродвигателей, редукторов и ходовой части; 2) характеристик, описывающих взаимодействие движителей с основанием; 3) характеристик, описывающих работу бортовой аккумуляторной батареи (АКБ) с учётом набранной разрядной ёмкости.

На рисунке 8 представлена расчётная динамическая схема транспортной системы ММП для случая



Обозначения: 1, 2 – нижняя опорная и верхняя поддерживающая направляющие основной гусеницы; 3 – опорные направляющие рычажных гусениц;  $i$  – порядковый номер тягового привода ( $i=1, 2$ );  $j$  – порядковый номер привода МИГ ( $j=1, 2$ );  $\alpha$  – угол наклона поверхности;  $\varphi_d$  – угол поворота вала двигателя;  $\varphi_k$  – угол поворота колеса;  $\varphi_p$  – угол поворота рычага;  $C_b$  – ёмкость, набранная АКБ при разряде (разрядная ёмкость);  $E$  – противо-ЭДС обмотки якоря электродвигателя;  $F_f$  – сила сопротивления движению;  $g$  – ускорение свободного падения;  $G$  – суммарный вес робота с полезным грузом;  $h_c$  – высота центра масс ММП;  $I_d$  – ток в обмотках электродвигателя;  $I_b$  – текущая токовая нагрузка на АКБ;  $I_i$  – инерционная сила, действующая на  $i$ -ю массу;  $L_d$  – индуктивность обмоток электродвигателя;  $m_T$  – масса груза (полезной нагрузки ММП);  $m_{ni}$  – условная часть поступательно движущейся массы, разгоняемая  $i$ -м приводом;  $M_d$  – механический момент электродвигателя;  $M_{df}$  – механический момент собственного сопротивления ротора электродвигателя;  $M_{ред}$  – момент на выходном валу редуктора;  $M_{фред,вых}$  – момент трения редуктора, приведённый к выходу;  $P_t$  – сила тяги;  $R_b$  – собственное полное сопротивление АКБ;  $R_{cj}$  – сила реакции на рычаге  $j$ -го привода МИГ;  $R_{rot}$  – сопротивление обмоток ротора электродвигателя;  $R_z$  – силы реакции опоры;  $U_b$  – рабочее напряжение АКБ;  $U_e$  – напряжение бортового питания ММП;  $U_s$  – напряжение внешнего источника питания

Рисунок 8 – Расчётная схема транспортной системы ММП

движения по наклонной плоскости. Условно показаны только привод гусениц левого борта и привод вращения задних рычагов МИГ. При составлении модели приняты следующие допущения: 1) рассматривается движение только по твёрдому недеформируемому основанию; 2) между звеньями транспортной системы установлены абсолютно жёсткие связи; 3) однотипные приводы характеризуются одинаковыми параметрами; 4) внутренние параметры обоих бортов ходовой части, а также характеристики их взаимодействия с опорной поверхностью идентичны.

Ходовая часть транспортной системы (рисунок 8) максимально упрощена конструктивно и построена на основе зубчатых ременных передач с полиуретановыми армированными зубчатыми ремнями с грунтозацепами на внешних поверхностях.

На рисунке 9 приведена общая схема построения компьютерной модели транспортной системы ММР. В левой части рисунка 9 представлена блок-схема приводной части компьютерной модели, описывающая подсистему  $i$ -х тяговых приводов (модель  $j$ -х приводов МИГ, для экономии места условно не показана, поскольку имеет аналогичную структуру; входные воздействия на неё обозначены как  $Ue3$  и  $Ue4$ , обратные связи по току –  $Id3$ ,  $Id4$ ).

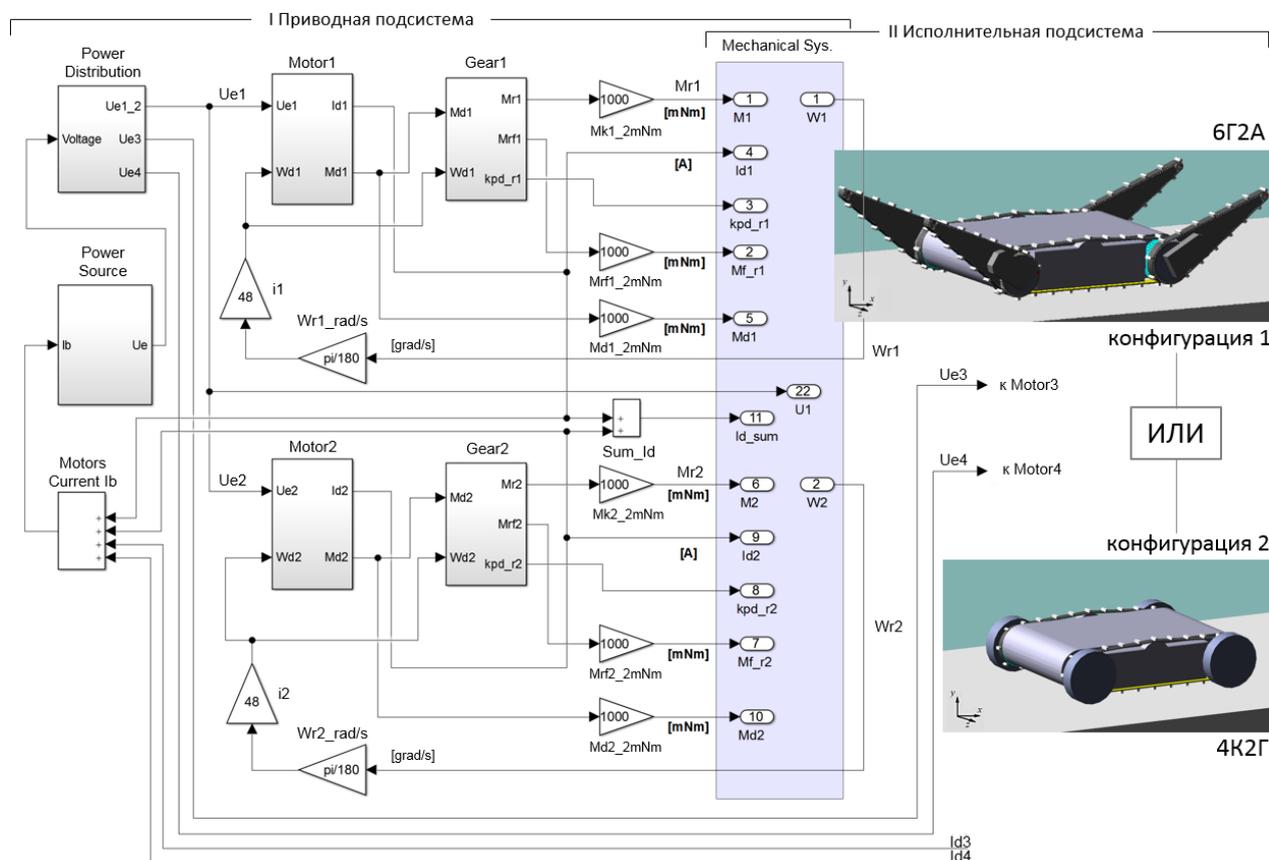


Рисунок 9 – Общая структурная схема компьютерной модели транспортной системы ММР

Модель приводной части включает следующие блоки:

1) блок «Power Source». Предназначен для моделирования режима работы источника питания транспортной системы. Выходным сигналом блока является напряжение бортового питания  $U_e$ . В зависимости от выбранного режима выходная ветвь блока подключается либо к модели бортовой АКБ (блок «Battery») с напряжением  $U_b$  (режим 1), либо к источнику внешнего питания (параметр «Voltage») с фиксированным напряжением  $U_c$  (режим 2);

2) блок «Battery», входящий в состав блока «Power Source». Моделирует бортовую АКБ, состоящую из восьми последовательно соединённых аккумуляторов (блоки «Аккумулятор\_1»... «Аккумулятор\_8»). На вход этих блоков подаются значения теку-

щей токовой нагрузки  $I_b$  и накопленной степени разряда  $C_b = \int I_b dt$ .

Блоки «Аккумулятор» обеспечивают расчёт выходного напряжения  $U_{bi}$  на аккумуляторах как

$$U_{bi} = U_{b0i} - I_b \cdot R_{bi}, \quad (18)$$

где  $R_{bi}$  – собственное сопротивление аккумулятора;  $U_{b0i}$  – напряжение на аккумуляторе без нагрузки, определяемое по предложенной автором эмпирической зависимости

$$U_{b0} = A \cdot C_b^2 + B \cdot C_b + U'_{b0}, \quad (19)$$

где  $A$  и  $B$  – экспериментальные статистические коэффициенты,  $U'_{b0}$  – исходное значение напряжения на аккумуляторе без нагрузки;

3) блок «Power Distribution». Имитирует работу простейшего распределительного устройства, подключающего к питанию тот или иной привод в заданный момент времени;

4) блоки «Motor1»...«Motor4», первые два из которых представляют собой модели электродвигателей ТП, последние два – модели электродвигателей приводов МИГ. Их построение выполнено на основе известных математических моделей, описывающих динамику двигателей постоянного тока.

Однако особенностью предложенных моделей в сравнении с известными является учёт зависимости момента внутренних потерь двигателя  $M_{df}$  от скорости вращения вала:

$$M_{df} = M_{df0} \cdot \text{sign}\dot{\varphi}_d + K_{fd} \cdot \dot{\varphi}_d, \quad (20)$$

где  $M_{df0}$  – постоянная составляющая  $M_{df}$ ;  $\dot{\varphi}_d$  – угловая скорость вала двигателя;  $K_{fd}$  – коэффициент пропорциональности. Вид этой зависимости определён экспериментально и по своему характеру эквивалентен описанию модели вязкого трения в миниатюрных двигателях постоянного тока.

5) блоки «Gear1»...«Gear4» моделируют редукторную часть ТП («Gear1» и «Gear2») и приводов МИГ («Gear3» и «Gear4»). В соответствии с определённой во второй главе структурой редукторная часть ТП включает планетарный редуктор и ременную передачу ( $i_\Sigma = 48$ ), редукторная часть приводов МИГ – планетарный редуктор и червячную передачу ( $i_\Sigma = 3750$ ).

При расчётах и моделировании транспортных машин и мобильных роботов потери в механических передачах традиционно учитываются как постоянные величины, рассчитанные для некоторых номинальных значений внешней нагрузки. Это допустимо для стационарных режимов работы передач при номинальных или близких к ним нагрузках. Однако, при движении мобильных роботов нагрузки на входящие в состав их транспортных систем механические передачи меняются в широких пределах, что требует более точного учёта характеристик механических потерь в редукторах на режимах частичных нагрузок.

Экспериментальные исследования элементов малогабаритных транспортных систем ММР показали, что существенное влияние на суммарную величину внутренних потерь оказывает составляющая потерь в редукторах  $M_{тр.хх}$  – момент потерь холостого хода редуктора, который описывается полученной экспериментально зависимостью:

$$M_{тр.хх} = M_{рf0} \cdot \text{sign}\dot{\varphi}_d + K_{fp} \cdot \dot{\varphi}_d, \quad (21)$$

где  $M_{рf0}$  – момент сухого трения, измеренный на входном валу;  $\dot{\varphi}_d$  – угловая скорость входного вала редуктора;  $K_{fp}$  – коэффициент вязкого трения.

Момент собственного трения редуктора приведённый к выходному валу представляется как сумма потерь пропорциональных моменту нагрузки (первое слагае-

мое) и потерь холостого хода (второе слагаемое):

$$M_{f_{ред.вых}} = M_d i_{ред} (1 - \eta_{рм}) + M_{тр.хх} i_{ред} \eta_{рм}, \quad (22)$$

где  $M_d$  – механический момент на валу двигателя,  $i_{ред}$  – передаточное число редуктора,  $\eta_{рм}$  – КПД, учитывающий потери, пропорциональные внешней нагрузке (максимальное значение).

КПД редуктора

$$\eta_p = \left( 1 - \frac{M_{тр.хх}}{M_d} \right) \eta_{рм} = \frac{1}{1 + M_{f_{ред.вых}}/M_{ред}}; \quad (23)$$

б) блок «Mechanical Sys.». Представляет собой подсистему входных-выходных параметров, используемых для связи приводной части модели с моделью исполнительной части транспортной системы.

На рисунке 9 в правой части представлен внешний вид имитационной компьютерной модели исполнительной части транспортной системы ММР в двух вариантах конфигураций шасси. Модель включает описание: 1) геометрических и массоинерционных характеристик составных частей транспортной системы; 2) взаимодействия приводной части транспортной системы с ходовой частью; 3) взаимодействия ходовой части транспортной системы с опорной поверхностью. Геометрическое построение модели включает следующие элементы: корпус; две зубчатые ременные передачи, имитирующие основные гусеницы ММР с грунтозацепами; четыре рычага; четыре зубчатые ременные передачи, имитирующие дополнительные гусеницы ММР с грунтозацепами в конфигурации 6Г2А и четыре колеса, играющие роль опорных элементов движителей в конфигурации 4К2Г.

На рисунке 10 представлена схема построения модели гусеницы и модели её взаимодействия с опорным основанием и корпусом ММР.

Для моделирования гусеницы как гибкого тела она представляется в виде последовательной цепи трёх типовых звеньев: несущего элемента прямоугольного сечения 1, рабочего зуба 2 трапецевидной формы, установленного на несущий элемент, и грунтозацепа 3, жёстко закреплённого на элементе 2 с внешней стороны гусеницы. Звенья 1 и 2 связаны между собой условными шарнирами с одной степенью свободы. Шаг следования рабочих зубьев  $S_t = 5$  мм, шаг грунтозацепов  $S_g = 35$  мм. Основные гусеницы имеет длину 840 мм, 168 рабочих зуба и 24 грунтозацепа, дополнительные (рычажные) гусеницы длиной 560 мм содержат 112 рабочих зубьев и 16 грунтозацепов.

Взаимодействие ходовой части транспортной системы с опорной поверхностью и корпусом ММР имеет наиболее сложную картину в случае конфигурации 6Г2А. Полная модель ходовой части в конфигурации 6Г2А включает описание 1680 контактных взаимодействий, в том числе: грунтозацепов 3 основных и дополнительных гусениц с поверхностью движения, несущих элементов 1 и 2 основных и дополнительных гусениц с поверхностью движения и с корпусом ММР. Учёт всех взаимодействий необходим при моделировании общих случаев движения транспортной системы с преодолением препятствий (одиночных ступеней, выступов, лестниц и т.п.). При моделировании частных случаев модель может быть упрощена путём исключения из расчёта незадействованных контактных взаимодействий.

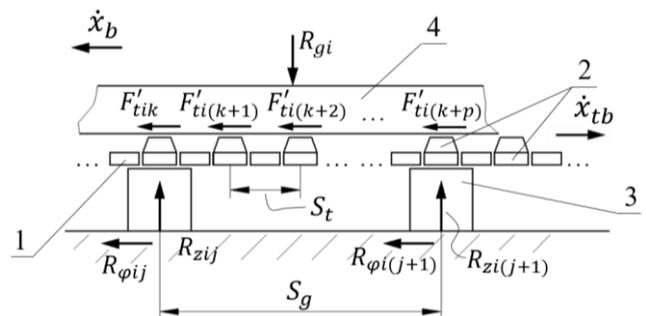


Рисунок 10 – Схема контактного взаимодействия гусеницы с корпусом и опорной поверхностью

Проведено комплексное компьютерное исследование транспортной системы ММР в двух конфигурациях (6Г2А и 4К2Г) в следующих расчётных ситуациях: 1) прямолинейное движение по наклонной плоскости, 2) развороты на месте на поверхностях с различными сцепными свойствами, 3) движение транспортной системы в конфигурации 6Г2А через пороговые препятствия и канавы с различными параметрами, 4) движение по стандартным лестничным маршам, 5) геометрическая реконфигурация транспортной системы 6Г2А на различных скоростных и силовых режимах нагружения.

В результате проведённого компьютерного моделирования:

– исследован характер взаимодействия с недеформируемым основанием гусеничного и колёсного движителей при прямолинейном движении. Выявлены существенные колебания всех характеристик, сопровождающие движение транспортной системы в конфигурации 6Г2А. Аналогичные колебания присутствуют и на характеристиках движения конфигурации 4К2Г, но их амплитуды имеют на порядок меньшие значения. Показано, что значительные колебания в схеме 6Г2А связаны с дискретно-ударным взаимодействием грунтозацепов с поверхностью, что в конечном счёте приводит к колебаниям мгновенной скорости движения, которые, впрочем, не превышают 2 % от действующего значения скорости;

– исследовано распределение энергозатрат по звеньям транспортной системы при прямолинейном равномерном движении на различных силовых и скоростных режимах нагружения. Показано, что наибольшие потери происходят в механических передачах и в гусеничной ходовой части транспортной системы в конфигурации 6Г2А. Получены диаграммы распределения энергозатрат по звеньям транспортной системы, являющиеся своего рода «паспортом» транспортной системы и характеризующие её эффективность во всём диапазоне рабочих нагрузок;

– исследовано влияние характеристик и режима нагружения АКБ на скоростные характеристики транспортной системы при прямолинейном движении. Проведена оценка потерь максимальной скорости движения в зависимости от нагрузки;

– исследован характер взаимодействия с недеформируемым основанием гусеничного и колёсного движителей при бортовых разворотах (вращениях) на месте. Показано, что бортовой способ разворота неизбежно связан с потерями энергии в силу кинематических особенностей реализуемой схемы поворота. Эти потери определяются только геометрическими соотношениями шасси и для выполненных конструкций составляют от 30 % до 60 %;

– определена нагрузочная способность исследуемой транспортной системы. Максимальное допустимое значение массы груза, который может быть установлен на транспортную систему, составило 8 кг (при собственной массе ММР в конфигурации 6Г2А – 13,1 кг, в конфигурации 4К2Г – 11,5 кг);

– исследовано распределение энергозатрат по звеньям транспортной системы при бортовых разворотах (вращениях) на месте на поверхностях с различными сцепными свойствами. Показано, что наибольшие потери связаны с преобразованием мощности на колёсах  $N_{\text{хч}}$  в мощность поворачивающих сил  $N_t$ , а также потери в ходовой части в конфигурации 6Г2А. Получены диаграммы распределения энергозатрат по звеньям транспортной системы, являющиеся своего рода «паспортом» транспортной системы, характеризующим её эффективность во всём диапазоне рабочих нагрузок;

– определены скоростные и динамические характеристики транспортной системы при геометрической реконфигурации (см. рисунок 4, конфигурации «ж» и «и») на различных режимах нагружения;

– проведена оценка динамики движения ММР через пороговые препятствия по различным сценариям: движение ходом без задействования МИГ, движение с задействованием только переднего МИГ, движение с задействованием переднего и заднего

МИГ. Определена возможность движения по первому сценарию через препятствия с  $K_{ПП}$  до 1,7; по второму сценарию – с  $K_{ПП}$  до 2,3; по третьему – с  $K_{ПП}$  от 2,4 до 3,0;

– выявлена необходимость конструктивной модификации транспортной системы оснащением концевых частей рычагов МИГ небольшими колёсами, немного превосходящими по диаметру грунтозацепы;

– проведена оценка ширины преодолеваемой канавы в «квазистатическом» и динамическом режимах движения. Показано, что динамический сценарий движения позволяет преодолевать препятствия типа «канавы» на 14 % большей ширины. Определено предельное значение ширины преодолеваемых канав, соответствующее  $K_{ПК} = 1,0$ ;

– определена необходимость введения корректировки углового положения рычагов при движении по лестнице «прямым ходом», ввиду опасности упора рычагов в стенки ступенек вследствие динамической раскачки корпуса в ходе движения;

– определена циклограмма управляющих воздействий для реализации типового алгоритма движения ММР по лестнице;

– определена, исходя из плавности хода и возникающих динамических факторов, максимальная скорость движения ММР по лестнице, которая составила 0,1 м/с, что позволяет обеспечить взятие лестничного марша длиной 12 ступеней в течение не более 60 сек.

**В четвёртой главе** приведено описание объектов экспериментальных исследований, измерительного и стендового оборудования, разработанных методик и результатов экспериментальных исследований, выполнены: сравнение экспериментальных и расчётных данных, анализ эффективности транспортной системы ММР, сравнительный анализ расчётных ошибок, получаемых на предложенной в диссертации модели и упрощённых моделях.

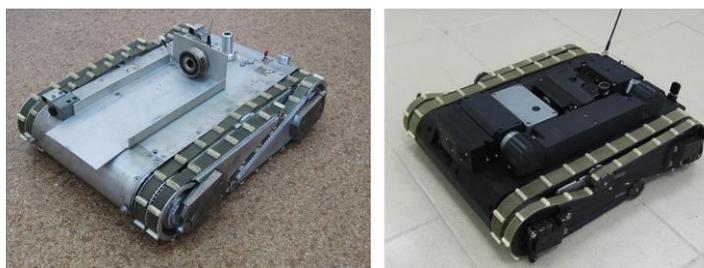
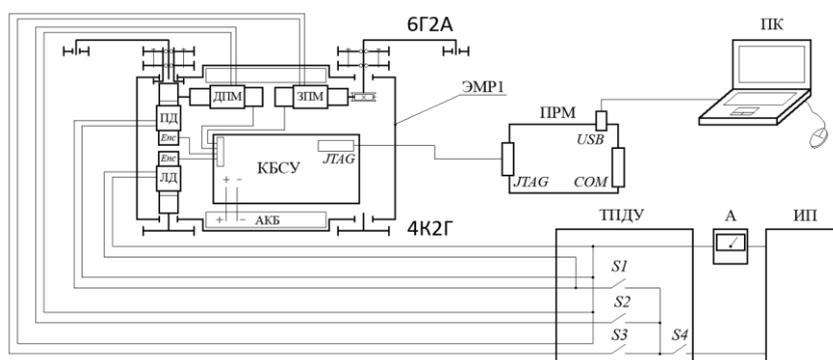


Рисунок 11 – Экспериментальные образцы ММР (ЭМР1 слева; ЭМР2 справа)

Экспериментальные исследования проводились на двух макетных образцах ММР (рисунок 11), транспортные системы которых построены на основе предложенных в диссертации схмотехнических решений, включая принципы геометрической и структурной реконфигурируемости. Объектом исследований являлась транспортная система ММР в двух конфигурациях шасси – гусеничной 6Г2А и колёсной 4К2Г. Основной объём исследований проводился на макетном образце мини-робота ЭМР1, структурное построение и геометрические параметры которого соответствуют результатам, полученным во второй главе и параметрам, заложенным в разработанные в третьей главе модели.

Схема подключения измерительных средств к ЭМР1 показана на рисунке 12. С целью обеспе-



А – амперметр; АКБ – аккумуляторная батарея; ИП – источник питания; ЛД – левый двигатель ТП; ПД – правый двигатель ТП; ДПМ – двигатель переднего привода МИГ; ДЗМ – двигатель заднего привода МИГ; КБСУ – плата контроллера бортовой системы управления ММР; ПК – персональный компьютер; ПРМ – программатор; ТПДУ – технологический пульт дистанционного управления; Энс – энкодеры двигателей; JTAG – интерфейс стандарта IEEE 1149; S1...S4 – переключатели режимов работы ТПДУ

Рисунок 12 – Схема подключения измерительного оборудования к экспериментальному ММР

чения возможности непосредственного воздействия на электроприводы транспортной системы силовая цепь контроллера бортовой системы управления (КБСУ) отключена от приводов. Питание электроприводов осуществляется от внешнего стабилизированного источника питания, что позволяет задавать требуемый скоростной режим работы системы (через напряжение) и контролировать энергопотребление. Штатное подключение энкодеров двигателей к КБСУ сохранено, что позволяет использовать имеющийся интерфейс JTAG для измерения и записи частот вращения электродвигателей посредством ПК.

Программа экспериментальных исследований транспортной системы включала:

1) исследование прямолинейного движения по наклонным поверхностям в конфигурациях 6Г2А и 4К2Г. Режим нагружения задавался: углом наклона поверхности; изменением суммарной массы ММР путём установки на него тарированных грузов; заданием скоростного режима (напряжения питания). Измерялось: суммарное энергопотребление, частоты вращения двигателей, линейная скорость ММР;

2) исследование вращений на месте (бортовых разворотов) в конфигурациях 6Г2А и 4К2Г. Режим нагружения задавался: типом поверхности (линолеум, асфальт, бетон); изменением суммарной массы робота путём установки на него тарированных грузов; заданием скоростного режима (напряжения питания). Измерялось: суммарное энергопотребление, частоты вращения двигателей, угловая скорость ММР;

3) исследование работоспособности и функциональных возможностей макетов ММР на основе реконфигурируемой транспортной системы. Проводилось путём качественной оценки возможностей системы и измерения времени, затрачиваемого на осуществление геометрической и структурной реконфигураций;

4) исследование характеристик подсистемы изменения геометрии шасси при осуществлении геометрической реконфигурации транспортной системы. Режим нагружения задавался варьированием суммарной массы робота путём установки на него тарированных грузов и заданием напряжения питания. Измерялось: суммарное энергопотребление электродвигателей, частоты вращения электродвигателей, конечное угловое положение рычагов и корпуса робота, средние значения угловых и линейных скоростей;

5) исследование процессов преодоления типовых препятствий: одиночных пороговых препятствий, канав, лестничных маршей.

Проведение экспериментальных исследований по методикам аналогичным виртуальным компьютерным исследованиям позволило произвести сравнение результатов и оценить точность разработанных моделей. Определение расхождений расчётных и экспериментальных данных производилось по формуле

$$\delta P = \frac{P - \mathcal{E}}{P} \cdot 100 \%, \quad (24)$$

где  $P$  – расчётное значение;  $\mathcal{E}$  – экспериментальное значение.

Проведённые сравнения результатов для случаев прямолинейного движения, вращений на месте, геометрических реконфигураций показали близкое совпадение с результатами расчётов. Определённые по формуле (24) расхождения не превышают 5...7 %.

Далее в главе выполняется оценка эффективности транспортной системы ММР. Показано, что на режимах малой нагрузки суммарный КПД транспортной системы в конфигурации 6Г2А имеет до двух раз меньшее значение в сравнении с конфигурацией 4К2Г (10 % против 20 % соответственно). Наибольшее влияние на низкое значение КПД транспортной системы оказывают большие потери в гусеничной ходовой части конфигурации 6Г2А. В то же время отмечено, что характеристика КПД ходовой части имеет наименьшие значения на режимах минимальной нагрузки, когда доля собственных потерь в ходовой части в общем балансе потерь транспортной системы значительна. С увеличением нагрузки доля собственных потерь в ходовой части начи-

нает играть всё меньшую роль на фоне гораздо более значимого роста сил внешнего сопротивления движению, что приводит к росту КПД гусеничной ходовой части на 30...40 %, а итогового КПД транспортной системы на 20...25 % (т.е. до 3,0...3,5 раз).

Выявленные конструктивные недостатки ходовой части позволили определить пути дальнейшего развития транспортной системы ММР.

В заключительной части главы выполнено сравнение компьютерной модели транспортной системы ММР, разработанной в диссертации, с упрощёнными моделями, не учитывающими перечисленные выше особенности математического описания таких малогабаритных транспортных систем. На рисунке 13 представлены результаты сравнительного анализа трёх вариантов моделей: предложенной в диссертации модели (ПМ) и двух вариантов упрощённых моделей (УпрМ-1 и УпрМ-2). Отличие упрощённых моделей от полной – постоянные характеристики внутреннего трения двигателей и редукторов. Разница между УпрМ-1 и УпрМ-2 – различное задание величины внутреннего сопротивления в гусеницах, которое также не зависит от скорости.

В качестве расчётного случая выступает прямолинейное движение ММР в конфигурации 6Г2А по наклонной поверхности. С целью более полной оценки влияния различных вариантов нагружения (скоростных и силовых) расчёты производились на двух характерных режимах, условно соответствующих минимальной и максимальной нагрузкам: 1) при напряжении питания  $U_e$  равном 15 В и нулевой массе полезного груза  $m_r$ ; 2) при напряжении питания 33 В и массе полезного груза 8 кг. Кроме этого, исследовался также случай питания транспортной системы от собственного бортового источника питания (кривые 4 и 7).

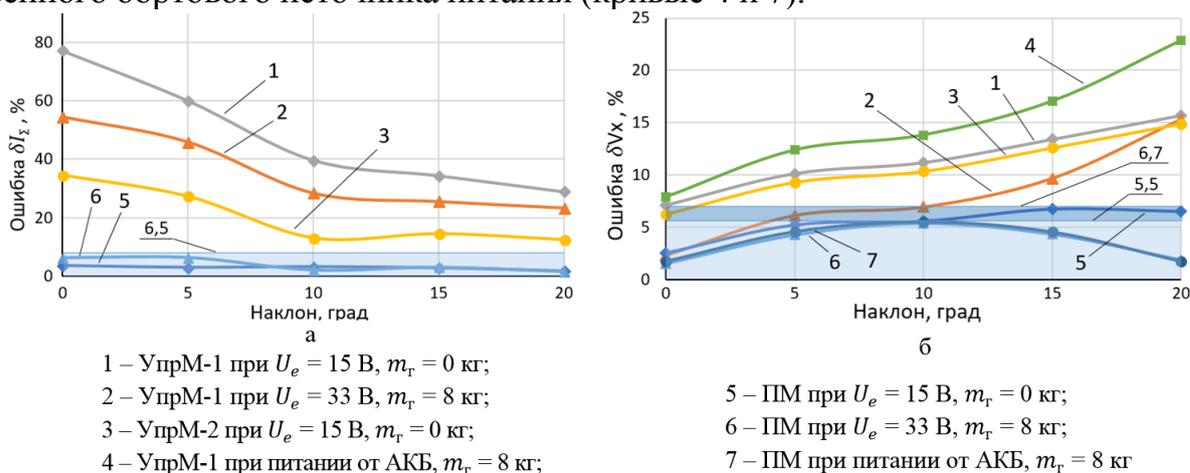


Рисунок 13 – Сравнение расчётных ошибок, полученных на предложенной модели (ПМ) и упрощённых моделях (УпрМ-1, УпрМ-2)

В качестве оценочных параметров для сравнения приняты ошибки определения суммарного энергопотребления приводов  $\delta I_z$  (рисунок 13 слева) и линейной скорости движения  $\delta V_x$  (рисунок 13 справа), определяемые по формуле (24). Силовой режим нагружения помимо массы полезного груза  $m_r$  задавался изменением угла наклона поверхности  $\alpha$ , который выбран в качестве независимой оси на графиках.

Из приведённых на рисунке 13 данных видно, что ошибки, полученные на упрощённых моделях (кривые 1-4) существенно превышают ошибки, полученные на разработанной в диссертации модели (кривые 5-7).

В результате оценки сходимости расчётных и экспериментальных данных установлено, что: 1) упрощённые модели дают неприемлемые расчётные результаты, относительные ошибки которых достигают 60...80 %; 2) предложенные подходы к построению компьютерных моделей позволяют повысить точность расчётов от 10...25% на режимах максимальных нагрузок, до 30...70 % на режимах малых и средних нагрузок (как разность получаемых расчётных ошибок).

Таким образом, экспериментальными исследованиями подтверждены:

1) применимость методики поиска оптимального схмотехнического решения и эффективность принципа структурной реконфигурации малогабаритных транспортных систем мобильных роботов; 2) адекватность созданной компьютерной модели транспортной системы ММР, справедливость и существенность предложенных подходов к её математическому описанию и обоснованность методики построения компьютерных моделей подобных малогабаритных мобильных роботов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.1 Исследованы принципы построения и направления развития транспортных систем мобильных роботов с точки зрения обеспечения возможности преодоления препятствий соизмеримых или превосходящих их собственные размеры. Показано, что наибольшей адаптацией к изменяющимся условиям движения обладают системы с возможностью *структурной реконфигурации*.

1.2 На основании анализа большого фактического материала разработана классификация шасси мобильных роботов по их адаптационным способностям, которая позволяет определить *область возможных альтернатив* для поиска оптимального схмотехнического решения, а также предложена система формульной записи схем шасси для краткого их обозначения при анализе.

2. Предложена *методика поиска (синтеза) схмотехнического решения* транспортной системы ММР, основанная на методах многокритериальной оптимизации технических систем, позволяющая формализовать процесс поиска и нахождения схемного решения самоходного шасси мобильного робота.

3. Предложен принцип модульного построения ходовой части транспортной системы ММР на основе шасси 6Г2А, позволяющий реализовать транспортную систему с возможностями *структурной и геометрической реконфигураций*, и разработаны алгоритмы функционирования ММР на основе такой транспортной системы.

4.1 Предложена *методика математического описания и построения компьютерных моделей* транспортных систем малогабаритных мобильных роботов с учётом особенностей, существенных с точки зрения получаемых расчётных результатов (см. с.12).

4.2 Разработаны *имитационные компьютерные модели* транспортной системы ММР в двух вариантах конфигураций: 6Г2А и 4К2Г, – позволяющие производить теоретическое исследование *общих случаев движения* транспортной системы при совместном функционировании подсистем передвижения и изменения геометрической конфигурации шасси с учётом особенностей их структурного построения и конструктивного исполнения.

4.3 Выполненные исследования показали, что факторы *скоростного режима* играют существенную роль при описании общего режима нагружения высокоподвижных малогабаритных транспортных систем ММР. Это связано с тем, что для миниатюрных механических систем значительную роль начинают играть составляющие внутренних потерь, величина которых существенно зависит от скорости, а математическое описание подобно описанию сил вязкого трения. Игнорирование этих особенностей и учёт только силовых факторов нагружения приводит к расчётным ошибкам не приемлемым с практической точки зрения.

5. Выполнены *компьютерные и экспериментальные исследования* транспортной системы ММР на типовых расчётных режимах.

5.1 Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что схема 6Г2А, найденная в результате синтеза по предложенной методике, позволила получить для рассматриваемых в диссертации носимых мини-роботов *наиболее компакт-*

ную конструкцию, реализованную в ЭМР1, с размерами до двух раз меньшими по сравнению с известными аналогами (PackBot, SUGV) с сохранением аналогичных характеристик проходимости и обеспечением заданных требований по функциональным свойствам ММР.

5.2 Экспериментально подтверждено, что предложенный принцип *структурной реконфигурации* шасси позволяет *повысить эффективность* транспортной системы и ММР на её основе путём расширения их функциональных и эксплуатационных свойств. Расширение функциональных свойств достигается за счёт адаптации шасси ММР под текущие условия и задачи. Расширение эксплуатационных характеристик достигается за счёт увеличения в конфигурации 4К2Г по сравнению с конфигурацией 6Г2А времени автономной работы на 40...70 % и максимальной скорости (подвижности) ММР на 80 %. Реконфигурация шасси ММР производится без применения каких-либо инструментов за время не более 5 мин.

5.3 *Экспериментальная верификация* созданной компьютерной модели транспортной системы ММР, показала высокую сходимость расчётных и экспериментальных данных (в пределах 5...7 % во всём диапазоне нагрузок).

5.4 В результате сравнения компьютерной модели транспортной системы, разработанной в диссертации, с упрощёнными моделями установлено, что предложенные подходы к построению компьютерных моделей транспортных систем ММР позволяют *повысить точность расчётов* от 10...25% на режимах максимальных нагрузок до 30...70 % на режимах малых и средних нагрузок (как разность получаемых расчётных ошибок).

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*В рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК*

1. Васильев А.В., Полин А.В. Мобильный робот-разведчик на базе шестигусеничного движителя с изменяемой геометрией // Мехатроника, автоматизация, управление. – М.: Новые технологии. – 2009. – №3(96). – С.24-27.

2. Васильев А.В. Мобильные мини-роботы разведки: текущее состояние, характерные черты и общие тенденции развития // Известия ЮФУ. Технические науки: Темат. вып. «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – №3 (104). – С.119-124.

3. Васильев А.В. Принципы построения и классификация шасси мобильных роботов наземного применения и планетоходов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – №1 (164). – С.124-131.

4. Васильев А.В., Лопота А.В. Уточнение типоразмерных групп наземных дистанционно управляемых машин для применения в опасных для человека условиях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2015. – №1 (214). – С. 226-234.

*В рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, индексируемых Web of Science*

5. Васильев А.В. Разработка компьютерной динамической модели и исследование прямолинейного движения транспортной системы малогабаритного мобильного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Том 19, №5. – С. 312–326. – DOI: 10.17587/mau.19.312-326

*В рецензируемых научных журналах, индексируемых SCOPUS*

6. Vasiliev A., Dalyaev I. Simulation Method for the Transport System of a Small-Sized Reconfigurable Mobile Robot. – Machines. – 2021. – Volume 9, Issue 1,8. – 36 p. – DOI: 10.3390/machines9010008

*В других рецензируемых научных изданиях*

7. Васильев А.В. Реконфигурируемая транспортная платформа для малогабаритных мобильных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – №2(3). – С.67-71.

8. Васильев А.В. Исследование путей создания универсальной малогабаритной транспортной платформы для мобильных мини-роботов // Исследования наукограда. – 2015. – № 3(13). – С.20-25.

9. Vasiliev A.V., Shardyko I.V. Analysis, detection, reaction and prevention of potential critical situations for light-weight mobile robots // Extreme robotics: Proc. of the Intern. sci. and techn. conf. – Saint-Petersburg: ООО «Izdatel'sko-poligraficheskii kompleks «Gangut», 2019. – pp. 559-567.

*В патентах на полезную модель*

10. Малогабаритная транспортная платформа для мобильного робота: пат. RU 123753: МПК В62D 55/065 / А.Н. Беляев, Е.А. Смирнов, А.В. Васильев, Р.Н. Корнилов, А.А. Орешников; ЦНИИ РТК. – Заявл.: 2012115776/11, зарег.: 12.04.2012; Опубл.: 10.01.2013, Бюл. №1. – 16 с.

*В материалах Международных научных конференций, индексируемых SCOPUS*

11. Vasiliev A.V. Modelling and Experimental Verification of High-Speed Small-Sized Transport (Locomotion) System for Mobile Robot // 2020 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM). – IEEE Xplore. – 2020. – Article 9112050. – 6 p. – DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112050

*В материалах Международных и Всероссийских научных конференций*

12. Васильев А.В., Полин А.В. Мобильный робот-разведчик на базе шестигусеничного движителя с изменяемой геометрией // Перспективные системы и задачи управления: Мат. Третьей Всеросс. науч.-практ. конф. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – Т.1. – С.133-139.

13. Васильев А.В. Особенности разработки транспортной системы самоходного мини-робота // Экстремальная робототехника. Нано-, микро- и макророботы: Мат. междунар. конф. с элементами науч. шк. для молодёжи (в рамках Междунар. науч.-техн. мультikonф. ИКТМР-2009). – Политехника-сервис, 2009. – С. 46-48.

14. Васильев А.В. К вопросу об оценке энергетических потерь в транспортной системе самоходного мини-робота // Экстремальная робототехника. Нано-, микро- и макророботы: Мат. междунар. конф. с элементами науч. шк. для молодёжи (в рамках Междунар. науч.-техн. мультikonф. ИКТМР-2009). – Политехника-сервис, 2009. – С. 48-50.

15. Васильев А.В. Мобильные мини-роботы разведки: текущее состояние, характерные черты и общие тенденции развития // Перспективные системы и задачи управления: Мат. Пятой Всеросс. науч.-практ. конф. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – Т.II. – С.41-44.

16. Васильев А.В. Современное состояние и общие тенденции развития мобильных малоразмерных робототехнических комплексов специального назначения // Экстремальная робототехника: Тр. XXI междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: Политехника-сервис, 2010. – С.97-103.

17. Васильев А.В. Малогабаритный реконфигурируемый мобильный робот // Перспективные системы и задачи управления: Мат. Седьмой Всеросс. науч.-практ. конф. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – С.61-71.

18. Васильев А.В. Принципы передвижения наземных робототехнических систем // Экстремальная робототехника: Сб. докл. Всеросс. науч.-техн. конф. – СПб.: Политехника-сервис, 2012. – С.277-285.

19. Васильев А.В. Исследование и классификация структурно-кинематических схем шасси мобильных роботов // Перспективные системы и задачи управления: Мат. Девятой Всеросс. науч.-практ. конф. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – С.115-128.

20. Васильев А.В. Обобщённая классификация мобильных роботов // Экстремальная робототехника: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: Политехника-сервис, 2014. – С.41-45.

21. Васильев А.В., Лопота А.В. Малогабаритная реконфигурируемая транспортная платформа с высокими адаптивными возможностями // Робототехника и искусственный интеллект: Мат. VI Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием; Сиб. федер. ун-т. – Красноярск : Центр информации, ЦНИ «Монография», 2014. – С.4-11.

22. Васильев А.В. Исследование и разработка схемных решений шасси малогабаритных мобильных роботов // Мат. 8-й Всеросс. мультikonф. по проблемам управления: в 3-х т. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – Т.2. – С.24-26.

23. Васильев А.В. Методика синтеза структурно-кинематических схем шасси малогабаритных мобильных роботов // Перспективные системы и задачи управления: Мат. Десятой Всеросс. науч.-практ. конф.: в 2-х т. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – Т.II. – С.146-157.

24. Васильев А.В. Построение и исследование полной компьютерной модели транспортной системы малогабаритного мобильного робота с реконфигурируемым шасси // Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции: Труды Международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2018. – С.476-484.