

МАЛОЛЕТОВ Александр Васильевич

ДИНАМИКА И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ, ПАРАМЕТРОВ И  
АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ШАГАЮЩИХ МАШИН  
СО СДВОЕННЫМИ ШАГАЮЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ

Специальность 01.02.01  
«Теоретическая механика»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет»

Научный консультант:

Брискин Евгений Самуилович, доктор физико-математических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, заведующий кафедрой «Теоретическая механика»

Официальные оппоненты:

Болотин Юрий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор кафедры «Прикладная механика и управление» механико-математического факультета

Кобрин Александр Исаакович, доктор физико-математических наук, профессор, Московский энергетический институт (Технический университет), профессор кафедры «Теоретическая механика»

Лапшин Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, профессор кафедры «Теоретическая механика» (ФН-3)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Защита диссертации состоится «29» октября 2015 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 002.240.01 при Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН по адресу 119526, Россия, г. Москва, пр. Вернадского, д. 101, корп. 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, <http://www.ipmnet.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д002.240.01  
при ИПМех РАН  
кандидат физико-математических наук

Сысоева Е.Я.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Работа посвящена решению проблем механики, возникающих в связи с созданием мобильных роботов с шагающими движителями. Шагающие машины являются сложными механическими системами, отличаются большим разнообразием структурных и кинематических схем, допускают реализацию множества различных алгоритмов и законов управления.

Эффективность выполнения машиной своих задач, обычно определяемая несколькими критериями, зависит от структуры аппарата, его параметров и законов управления, которые в свою очередь взаимосвязаны друг с другом и должны рассматриваться в совокупности. Поэтому при создании шагающих машин актуальной является проблема многокритериальной оптимизации, в рамках которой оптимум ищется одновременно среди нескольких вариантов структуры аппарата, множества его параметров и законов управления.

В некоторых случаях актуальной является проблема оптимизации кинематической схемы и параметров машины при фиксированных законах управления, например при постоянных угловых скоростях вращения приводных двигателей. В других случаях возникает проблема многокритериальной оптимизации законов управления при неизменных кинематической схеме и параметрах аппарата.

Отдельного рассмотрения требует проблема определения и вычисления критериев оптимизации — механических показателей качества, которые для шагающих машин являются функциями не только структуры и параметров, но и реализуемых алгоритмов управления, и, следовательно, могут изменяться во время движения аппарата.

Исследования и разработки в области шагающих машин ведутся во всех развитых странах мира. В области теории движения и управления мобильными роботами в том числе с шагающими движителями Россия занимает одно из ведущих мест благодаря работам И. И. Артоболевского, В. В. Белецкого, А. П. Бессонова, Ю. В. Болотина, Н. Н. Болотника, Е. С. Брискина, Ю. Ф. Голубева, В. Г. Градецкого, Е. А. Девянина, В. В. Жоги, М. Б. Игнатьева, И. А. Каляева, А. Л. Кемурджиана, В. В. Лапшина, В. Б. Ларина, М. И. Маленкова, Д. Е. Охоцимского, В. Е. Павловского, А. К. Платонова, Н. В. Умнова, А. М. Формальского, Ф. Л. Черноушко, В. В. Чернышева, А. Ю. Шнейдера, Е. И. Юревича, А. С. Ющенко и др. Среди теоретических исследований за рубежом широко известны работы К. Дж. Валдрона (США), М. Вукобратовича (Югославия), М. Канеко, И. Като, С. Хироси, И. Шимоямы (Япония), К. Бернса (Германия), Г. С. Вирка (Великобритания), Т. Зелинской (Польша) и др.

Результаты теоретических исследований привели к созданию многочисленных образцов шагающих машин, количество которых в настоящее время измеряется несколькими сотнями. Среди них можно отметить машины Plustech (Финляндия), ASV, Dante, Ambler, BigDog (США), Asimo, Titan (Япония), MANTIS (Великобритания) и некоторые другие.

Разрабатываются такие машины и в России. Известны разработки шагающих роботов в Институте проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Институте Механики МГУ, Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН и некоторых других организациях. При участии автора и с использованием результатов данной работы в Волгоградском государственном техническом университете (ВолгГТУ) разработаны шагающие опоры для дождевальнoй машины «Кубань», шагающие машины «Восьминог», «Восьминог М», «Ортоног».

Особенностью шагающих машин разработанных в ВолгГТУ является использование сдвоенных шагающих движителей, состоящих из двух механизмов шагания, кинематически связанных друг с другом. Хотя возможны и специальные режимы движения, обычно в сдвоенном шагающем движителе в каждый момент времени один из механизмов шагания находится в опоре, а второй — в переносе. Таким образом, каждый шагающий движитель одной из своих двух стоп всегда опирается на грунт, что повышает устойчивость машины и упрощает алгоритмы управления ею.

Достоинства шагающих машин определяются в первую очередь потенциально более высокой проходимостью, маневренностью и лучшими экологическими свойствами по сравнению с машинами, использующими традиционные типы движителей. А основные недостатки шагающих машин связаны со сложностью конструкции и системы управления, а также небольшой скоростью передвижения шагающей техники.

Эффективность шагающей машины — понятие, зависящие от её функционального предназначения и от оценки разработчиком или потребителем важности того или иного механического показателя.

Как правило, улучшение одних механических показателей шагающей машины приводит к ухудшению других её характеристик. Например: усложняя кинематическую схему движителей можно добиться повышения профильной проходимости, маневренности и ряда других механических показателей, однако это приводит к усложнению системы управления и снижению надёжности машины; энергетически эффективные алгоритмы движения могут противоречить требованиям комфортабельности движения; требования экологичности в значительной степени противоречат требованиям грунтовой проходимости; и так далее.

Для шагающих машин характерно, что лишь сравнительно небольшая часть показателей определяется исключительно особенностями конструкции. Большинство показателей зависят не только от конструктивных особенностей, но и от реализуемых алгоритмов управления машиной. Например, для колёсных или гусеничных машин одной из основных характеристик является ширина колеи, которая определяется конструкцией машины и не меняется во время движения (лишь для некоторых тракторов предусматривается возможность регулирования ширины колеи в сравнительно небольших пределах). Для большинства шагающих машин само понятие колеи не имеет смысла, а ближайший его аналог — следовая

дорожка зависит от алгоритмов управления движителями и её ширина может меняться в значительных пределах во время движения.

Важность той или иной характеристики неразрывно связана с функциональным назначением машины, а также с конкретной выполняемой задачей. Например: для сельскохозяйственных машин (шагающие опоры для дождевальной машины «Кубань») и машин, предназначенных для лесного хозяйства («Plustech»), наиболее важными являются экологические требования; для военных машин поддержки пехоты («BigDog») важны долгое время автономной работы и высокая проходимость; для человекоподобных роботов («Asimo») важна способность машины перемещаться в привычной для человека среде; для перевозки крупногабаритных грузов важнейшей характеристикой является комфортабельность движения; и так далее.

Поэтому при создании шагающих машин и при разработке алгоритмов и программ управления ими разработчику приходится решать задачу многокритериальной оптимизации. Методы многокритериальной оптимизации известны и широко применяются в различных областях науки. Однако для шагающих аппаратов научные исследования, учитывающие комплексное влияние различных показателей на итоговую эффективность машины, практически отсутствуют. Обычно рассматриваются задачи поиска оптимальных по тому или иному критерию законов управления при заданной структуре и параметрах машины (например, В. В. Лапшиным отдельно решались задачи оптимизации управления шагающих машин с целью снижения энергозатрат при движении, снижения времени при экстренной остановке и увеличения статической устойчивости; Ю.В. Болотиним решались задачи выбора энергетически оптимальных походок в модельной задаче управления двуногим шагающим аппаратом). Известны также работы, рассматривающие оптимизацию структуры шагающего аппарата или его параметров при заданных законах движения входных звеньев механизмов шагания (например, в работах Е. С. Брискина решались задачи использования дополнительных механизмов для увеличения проходимости и управляемости шагающих машин).

Следовательно актуальным является разработка и исследование методов многокритериальной оптимизации применительно к шагающим аппаратам с учётом влияния на критерии качества и взаимосвязей между собой структуры, параметров и алгоритмов управления машиной.

Применение этих методов позволит обоснованно выбирать программные режимы движения, структуру и механические параметры шагающих машин как на этапе их разработки, так и во время использования.

**Цель исследования.** Разработка методов оптимизации структуры, параметров и алгоритмов управления движением шагающих машин на основе системы показателей, характеризующих их механическое состояние.

**Задачи исследования.**

1. Анализ и классификация шагающих машин и роботов, областей их применения, механических показателей, характеризующих их состояние и

функциональные возможности. Постановка задач оптимизации параметров, структуры и алгоритмов управления движением шагающих машин.

2. Разработка теоретико-механических моделей шагающих машин, рассматриваемых как системы твёрдых тел, и программного обеспечения, включающего в себя методы моделирования динамики управляемого движения шагающих аппаратов, алгоритмы оптимизации их структуры и параметров.

3. Разработка методов многокритериальной оптимизации алгоритмов управления и законов движения шагающих машин со сдвоенными шагающими движителями.

4. Разработка методов структурно-параметрической многокритериальной оптимизации шагающих машин со сдвоенными шагающими движителями.

5. Разработка методов многокритериальной оптимизации структуры, алгоритмов управления и параметров шагающих машин со сдвоенными шагающими движителями.

**Методы исследования** базировались на основных положениях теоретической механики, теории оптимального управления и системного анализа, теории механизмов и машин. Для решения уравнений движения использовались аналитические и численные методы. **Достоверность результатов** обеспечивалась методами параметрической идентификации динамических систем на основании результатов экспериментов и проверкой разработанных моделей и алгоритмов на тестовых задачах, имеющих аналитические решения.

**Научная новизна работы** заключается в развитии теории управляемого движения механических систем на основе введённых функций механического состояния и определения на их основе оптимальных структуры, параметров и алгоритмов управления шагающих машин и состоит из следующих **положений, выносимых на защиту**:

- система механических показателей качества шагающих машин;
- функция механического состояния шагающей машины;
- теоретико-механическая модель и программное обеспечение, позволяющее осуществлять расчёт динамики управляемого движения шагающего аппарата;
- матрица управления, определяемая кинематической схемой машины и методами управления её приводами, являющаяся составной частью теоретико-механической модели;
- методика многокритериальной оптимизации структуры и алгоритмов управления движением шагающих машин со сдвоенными движителями на основе методов вариационного исчисления;
- методика многокритериальной оптимизации структуры шагающей машины со сдвоенными движителями и её параметров на основе методов поиска на многомерных кубах;

- методика многокритериальной оптимизации алгоритмов управления движением шагающих машин со сдвоенными движителями на основе прямых методов задания программных движений;
- методы повышения эффективности шагающих машин на основе целенаправленного изменения показателей, определяющих функцию механического состояния машины.

**Реализация результатов работы и их практическая ценность.** Результаты работы использовались при разработке и испытаниях ряда образцов шагающих машин. При участии и поддержке ФГУП «Баррикады», ЦКБ «Титан», Института прикладной математики РАН, Института механики МГУ, Института машиноведения РАН созданы многоцелевое шагающее шасси, предназначенное для работы с различным технологическим оборудованием на слабых грунтах, шагающие опоры для дождевальная машины «Кубань», робототехнические комплексы «Восьминог», «Восьминог-М» (рис. 1), «Ортоног» (рис. 2) и несколько лабораторных образцов шагающих роботов. По своим показателям это машины разные, предназначены для различных отраслей хозяйства и могут использоваться при аварийно-спасательных работах в экстремальных условиях, при внедрении новых почвосберегающих технологий в лесном и сельском хозяйстве, в нефте- и газодобывающих отраслях и др.



Рисунок 1 — «Восьминог»



Рисунок 2 — «Ортоног»

Робот «Восьминог-М» и его разработчики, включая автора, отмечены золотыми медалями ВВЦ на 1-й и 2-й специализированных выставках «Робототехника» (Москва, 2004).

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные методы позволяют на этапе разработки шагающего аппарата осуществлять прогноз и оценку эффективности его использования в тех или иных условиях, и целенаправленно изменять показатели для повышения эффективности машины.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на:

- ежегодных науч.-техн. конференциях ВолгГТУ 1997–2014 гг. (Волгоград);
- Научн. шк.-конф. (с междунар. участием) 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004 гг. «Мобильные роботы и мехатронные системы» (МГУ, Москва);
- Междунар. науч.-практич. конф. 1999, 2002, 2005, 2009, 2013 гг. «Прогресс транспортных средств и систем» (Волгоград);
- VIII Всерос. съезд по теоретической и прикладной механике (2001);
- Науч. молод. школа «Интеллектуальные робототехнические системы» (ИРС-2001), пос. Дивноморское, 2001;
- Междунар. науч.-техн. конф. «Искусственный интеллект» (2002, п. Кацивели, Крым, Украина);
- 1-ой (2000 г.) и 2-ой (2003 г.) междунар. конф. «Проблемы механики современных машин» (Улан-Удэ);
- Вторая научная молодежная школа «Экстремальная робототехника» ЭР - 2003, пос. Дивноморское, 2003;
- XIII, XIV науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника» (СПбГПУ, ЦНИИ РТК, СПб, 2003, 2004 гг.);
- Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. «Мехатроника, автоматизация, управление», Владимир, 2004;
- 1-й и 2-й специализированных выставках «Робототехника» и междунар. семинарах «Робототехника и мехатроника» (ВВЦ, Москва, 2004);
- II, III науч. конф. «Проблемы динамики и прочности исполнительных механизмов и машин» (Астрахань, 2004, 2007);
- Девятой Всерос. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы защиты и безопасности. Экстремальная робототехника», СПб., 2006;
- Междунар. конф. по теории механизмов и механике машин (Краснодар, 2006);
- Междунар. н.-т. конф. «Мехатроника, автоматизация, управление» (МАУ 2007), Дивноморское, 2007;
- Междунар. науч.-техн. выставки-конгресса «Мехатроника и робототехника», Санкт-Петербург, 2007;
- XX междунар. науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника. Нано-, микро- и макророботы» (ЭР-2009), Дивноморское, 2009;
- XII всерос. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы защиты и безопасности», СПб., 2009;
- 7-й науч.-техн. конф. «Мехатроника, автоматизация, управление» (МАУ-2010), СПб., 2010;
- Междунар. науч.-техн. семинара «Робототехника. Взгляд в будущее», СПб., 2010;
- Междунар. конф. с элементами науч. школы для молодёжи «Экстремальная робототехника», СПб., 2010;



- Четвёртая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления. МКПУ-2011, Дивноморское, 2011;
- XXV междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ–25», Саратов, 2012;
- Всерос. науч.-техн. конф. «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» – УТЭОСС-2012, СПб., 2012;
- Всерос. науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника», Санкт-Петербург, 2012, 2014;
- 4th, 5th and 6th Int. Conf. «Climbing and Walking Robots and their Supporting Technologies. CLAWAR» (Karlsruhe, Germany, 2001, Paris, France, 2002; Catania, Italy, 2003);
- 13-th and 14-th CISM–IFTOMM Symposium «Theory and Practice of Robots and Manipulators. ROMANSY» (Zakopane, Poland, 2000; Udine, Italy, 2002);
- 11-th Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR 2003), (Coimbra, Portugal, 2003);
- The 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (Changchun, Jilin, China, 2009);
- 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (Nagoya, Japan, 2010).
- The 3rd Joint International Conference on Multibody System Dynamics. The 7th Asian Conference on Multibody Dynamics, Busan, Korea, June 30 – July 3, 2014
- Advances on theory and practice of robots and manipulators: ROMANSY 2014 XX CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (Moscow, 23-26 June 2014)
- научных семинарах в ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, институте механики МГУ, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Юго-Западном государственном университете, ИПМех им. А.Ю.Ишлинского РАН, 2014 г.

**Участие в научно-исследовательских проектах.** Автор принимал участие в качестве исполнителя в проектах: РФФИ №№ 01-01-00521-а, 04-01-00410-а, 09-08-97016-р\_поволжье\_а, 11-08-00955-а, 11-08-97061-р\_поволжье\_а, 12-08-10002-к, 13-08-01144-а, 13-01-97057-р\_поволжье\_а, 13-08-10000-к, 14-08-01002-а, 14-08-97041-р\_поволжье\_а; ФЦП «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области создания и управления новыми видами транспортных систем / «Шагающие машины со спаренными ортогональными движителями» (2009-1.1-217-004)»

Под руководством автора был реализован проект ФЦП «Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук / «Создание энергоэффективных шагающих движителей для наземных транспортных средств высокой проходимости» (2010-1.2.2-230-009)»

**Публикации.** Основные положения диссертации отражены в 106 публикациях, в том числе в 2 монографиях, 18 статьях в журналах по перечню ВАК, 3 патента на изобретения, 5 программ для ЭВМ. Результаты

работы также отражены в 16 научно-исследовательских отчётах, имеющих государственную регистрацию.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы. Общий объём диссертации 316 страниц, в тексте имеется 8 таблиц и 127 рисунков. Список литературы из 460 наименований представлен на 50 с.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** даётся общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы, формулируется цель исследований, определяются научная новизна и положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения об апробации, публикациях и практической значимости результатов работы.

**В первой главе** выполнен анализ и предложена классификация шагающих машин и роботов, областей их применения. Предложена система механических показателей шагающих аппаратов, характеризующих их состояние и функциональные возможности. Построена функция механического состояния шагающего аппарата, основанная на системе показателей и предназначенная для формирования критериев при решении задач оптимизации алгоритмов движения, структуры и параметров шагающих машин.

В зависимости от условий применения и решаемых задач к шагающим машинам предъявляются различные, часто противоречивые требования, для количественной оценки соответствия которым вводится система механических показателей качества (рис. 3).



Рисунок 3 — Классификация показателей качества шагающих машин

Часть этих показателей заимствованы из теории транспортных средств (ТС) с традиционными двигателями, другие — специфичны для шагающих машин. В то же время, некоторые механические показатели качества, характерные для колёсных ТС, для шагающих машин не актуальны. Например, из-за малой скорости движения для шагающих машин неактуальны показатели, определяющие характеристики торможения, потери устойчивости при повороте или преодоления препятствий за счёт инерционных свойств транспортного средства.

В отличие от традиционных ТС, почти все показатели шагающего аппарата зависят не только от особенностей конструкции машины, но и от алгоритмов управления приводами двигателей. Следовательно, оценка качества шагающей машины неразрывно связана с реализуемыми алгоритмами движения.

Среди специфичных показателей для шагающих машин особую значимость имеют следующие.

В отличие от традиционных колёсных и гусеничных ТС для шагающих машин направление скорости центра корпуса обычно не ограничивается направлениями, близкими к продольной оси машины, что позволяет машине осуществлять линейные и угловые перемещения независимо друг от друга. Поэтому минимального радиуса поворота не достаточно для оценки манёвренности шагающих машин, и требуется введение ещё одного показателя манёвренности, в качестве которого предложен диапазон изменения угла между вектором скорости центра корпуса и продольной осью машины. Вводится понятие идеальной манёвренности как способности корпуса машины совершать произвольное плоско-параллельное движение на плане местности. Для случая идеальной манёвренности указанный угол должен принимать произвольные значения в пределах  $\pm 180^\circ$ .

Давление стоп шагающей машины на грунт не остаётся постоянным в процессе движения: при шагании взаимное расположение стоп и корпуса постоянно меняется, что приводит к перераспределению нагрузок, а в моменты постановки стоп на грунт наблюдаются ударные явления и колебательные процессы. В результате чего нагрузки и давление стоп на грунт могут меняться более чем в два раза, что с одной стороны приводит к необходимости учитывать это явление при проектировании и управлении машиной, а с другой стороны позволяет ставить задачи синтеза таких законов движения, которые обеспечат улучшение эксплуатационных характеристик машины за счёт использования описанных эффектов.

За счёт изменения давления стопы на грунт меняются и условия их сцепления. Кроме того, значительного увеличения горизонтальной составляющей силы сцепления можно добиться при активном управлении стопой. Для оценки этих явлений вводится эффективный коэффициент сцепления, который определяется как отношение максимальной реализуемой силы сцепления в горизонтальном направлении к среднему значению вертикальной нагрузки на стопу.

Для оценки экологических свойств шагающей машины вводится показатель дискретности следовой дорожки, который определяется как отношение длины следов машины к длине шага. Если машины оставляет сплошную колею, то показатель дискретности принимается равным единице. Кроме экологических свойств, этот показатель влияет также на проходимость, определяя размеры препятствий, которые машина может перешагнуть без наступания на них.

Энергетический баланс шагающей машины состоит из слагаемых, характерных и для других наземных ТС (полезная механическая работа, потери в трансмиссии, потери на преодоление сил сопротивления движению и т. д.), и слагаемых, специфичных для шагающих аппаратов: затрат энергии на разгон-торможение шагающих двигателей на каждом шаге, затрат энергии на разгон-торможение корпуса машины в горизонтальном направлении и затрат энергии на вертикальные перемещения корпуса.

Области применения шагающих машин классифицируются по характеру и размеру преодолеваемых препятствий. Можно выделить движение на местности без значительных препятствий; движение на местности, где препятствия преимущественно представлены ямами или запрещёнными для наступания зонами; движение на местности, где препятствия представляют собой разного рода выступы (камни, брёвна и т. п.); движение в ограниченном пространстве; движение в среде, предназначенной для человека.

Таким образом ставится задача разработки методов многокритериальной оптимизации параметров, структуры и законов управления движением шагающих роботов, с учётом функционального предназначения машины.

Ищется минимум общего критерия качества, который вводится в виде линейной взвешенной комбинации частных критериев или показателей качества

$$I = \sum_j k_j H_j \rightarrow \min \quad (1)$$

где  $k_j$  — весовые коэффициенты значимости соответствующих показателей,  $H_j$  — нормированные значения показателей качества шагающей машины.

Показатели качества  $H_j$ , как правило, являются линейными функционалами от тех или иных функций  $f_j$ , определяемых механическим состоянием шагающей машины.

$$H_j = \mathbf{H}_j(f_j) \quad (2)$$

где  $\mathbf{H}_j$  — линейный оператор, задающий отображение из пространства функций на множество вещественных чисел, например: интеграл от функции  $f_j$  по времени.

Функции  $f_j$  могут быть произвольными функциями обобщённых координат механической системы и их производных. Например, критерий тепловых потерь в двигателе представляет собой интеграл за период движения  $\tau$  от квадрата момента  $M$ , развиваемого двигателем

$$H_M = \int_0^\tau f_M dt = \int_0^\tau n_M M^2 dt \quad (3)$$

где  $n_M$  — нормирующий коэффициент. Момент, развиваемый двигателем, в свою очередь определяется из дифференциальных уравнений теоретико-механической модели. В простейшем случае для одностепенного механизма дифференциальное уравнение движения имеет вид

$$J \ddot{\varphi} + \frac{1}{2} \frac{\partial J}{\partial \varphi} \dot{\varphi}^2 = M - M_c \quad (4)$$

где  $J$  — приведённый момент инерции,  $\varphi$  — обобщённая координата механизма,  $M_c$  — момент сил сопротивления. Откуда момент  $M$  определяется как функция первой и второй производной от обобщённой координаты.

В общем случае операторы  $\mathbf{H}_j$  являются различными, однако класс задач, в которых выражение (1) содержит только функционалы, определяемые одним и тем же линейным оператором  $\mathbf{H}$  (например, интегралом с одними и теми же пределами интегрирования), достаточно велик. Тогда обобщённый критерий качества записывается в виде

$$I = \mathbf{H}(\Phi) \quad (5)$$

где

$$\Phi = \sum_j k_j f_j \quad (6)$$

является функцией механического состояния шагающей машины, зависящей также от весовых коэффициентов  $k_j$  и позволяющей при их изменении управлять качеством шагающего аппарата.

Для каждого набора весовых коэффициентов  $k_j$  может быть найдено наилучшее (максимальное или минимальное) значение обобщённого критерия  $I$ , которое соответствует одному из возможных Парето оптимальных решений по частным критериям  $H_j$ . При этом, сами по себе значения весовых коэффициентов  $k_j$  не важны, а выбор из возможных программных законов движения робота производится на основании значений частных критериев  $H_j$  по следующему алгоритму.

1. Задаются произвольно или на основании имеющегося опыта коэффициенты  $k_j$ .

2. Строится обобщённый критерий качества (1).

3. В зависимости от конкретной решаемой задачи определяются параметры, структура или законы движения шагающей машины, соответствующие максимуму или минимуму обобщённого критерия качества для набора коэффициентов  $k_j$ .

4. Вычисляются значения частных показателей (2).

5. Производится субъективная оценка частных показателей. Если они удовлетворяют разработчика, то программное движение выбрано, и алгоритм завершается.

6. Если один или некоторые показатели, по мнению разработчика, требуют улучшения, то соответствующий коэффициент или коэффициенты значимости увеличиваются, и производится переход к п. 2 алгоритма.

**Во второй главе** разработаны теоретико-механические модели шагающих машин, рассматриваемых как системы твёрдых тел, и программное обеспечение, включающее в себя методы моделирования динамики управляемого движения шагающих аппаратов и методы расчёта значений механических показателей и функции механического состояния машины. Проведена проверка разработанных теоретико-механических моделей на экспериментальных образцах шагающих машин.

Для удобства автоматизации составления и решения уравнений движения вводится неподвижное базовое тело (далее — среда), с которым связывается абсолютная система отсчёта, включающая в себя декартову прямоугольную правоориентированную систему координат  $(\xi, \eta, \zeta)$  и время  $(t)$ . Внешние силы, действующие на моделируемую систему твёрдых тел, рассматриваются в этом случае как силы взаимодействия между средой и телами системы. В частности, взаимодействие стоп шагающей машины с опорной поверхностью моделируется как упруго-вязко-пластичное взаимодействие.

С каждым твёрдым телом, входящим в состав механической системы, связывается подвижная система координат  $(x, y, z)$  с началом отсчёта в центре масс тела. Из способов задания ориентации тела в пространстве наиболее наглядным для целей исследования является использование корабельных углов (дифферент  $\psi$ , крен  $\theta$  и рысканье  $\varphi$ ), однако из-за вырождения при угле крена  $\pm 90^\circ$  для расчётов этот способ может быть использован ограниченно. Способ задания ориентации тела с помощью кватернионов  $(h_0, h_1, h_2, h_3)$  не имеет вырождения при любой ориентации тела.

Задаётся масса  $(m)$  тела и его тензор инерции (компоненты тензора инерции относительно осей подвижной системы координат обозначаются через  $J_x, J_y, J_z, J_{xy}, J_{xz}, J_{yz}$ ). Для целей наглядного представления тела может быть также задана его геометрическая форма.

При составлении уравнений движения величины относящиеся к телу обозначаются одним индексом  $i$  ( $i = 0, 1, \dots, N$ ), где  $N$  — количество тел в системе. Индексом 0 обозначается среда, поэтому уравнения для  $i=0$  не записываются. Силы и моменты взаимодействия обозначаются двумя индексами  $ij$  ( $j = 0, 1, \dots, N, j \neq i$ ), первый из которых указывает на тело к которому приложена связь, а второй — со стороны которого приложена связь. Некоторые из комбинаций  $ij$  соответствуют телам, взаимодействие между которыми отсутствует, формально это означает равенство нулю соответствующих сил и моментов, а на практике такие величины исключаются из рассмотрения. Количество рассматриваемых сил и моментов равно  $6K$ , где  $K$  — количество взаимодействий в системе, включая взаимодействие тел со средой.

Дифференциальные уравнения динамики движения каждого тела в связанной с ним подвижной системе отсчёта записаны в виде:

$$\begin{aligned}
m_i \dot{V}_{ix} - \sum_j \sigma(i, j) F_{ijx} &= -m_i q_i V_{iz} + m_i r_i V_{iy} \\
m_i \dot{V}_{iy} - \sum_j \sigma(i, j) F_{ijy} &= -m_i r_i V_{ix} + m_i p_i V_{iz} \\
m_i \dot{V}_{iz} - \sum_j \sigma(i, j) F_{ijz} &= -m_i p_i V_{iy} + m_i q_i V_{ix} \\
J_{ix} \dot{p}_i - J_{ixy} \dot{q}_i - J_{ixz} \dot{r}_i - \sum_j \sigma(i, j) (M_{ijx} + F_{ijz} y_{ij} - F_{ijy} z_{ij}) &= \\
&\quad - (J_{iz} - J_{iy}) q_i r_i - J_{iyz} (r_i^2 - q_i^2) - p_i (J_{ixy} r_i - J_{ixz} q_i) \quad , \quad (7) \\
-J_{ixy} \dot{p}_i + J_{iy} \dot{q}_i - J_{iyz} \dot{r}_i - \sum_j \sigma(i, j) (M_{ijy} + F_{ijx} z_{ij} - F_{ijz} x_{ij}) &= \\
&\quad - (J_{ix} - J_{iz}) r_i p_i - J_{ixz} (p_i^2 - r_i^2) - q_i (J_{iyz} p_i - J_{ixy} r_i) \\
-J_{ixz} \dot{p}_i - J_{iyz} \dot{q}_i + J_{iz} \dot{r}_i - \sum_j \sigma(i, j) (M_{ijz} + F_{ijy} x_{ij} - F_{ijx} y_{ij}) &= \\
&\quad - (J_{iy} - J_{ix}) p_i q_i - J_{ixy} (q_i^2 - p_i^2) r_i (J_{ixz} q_i - J_{iyz} p_i)
\end{aligned}$$

где  $V_{ix}$ ,  $V_{iy}$ ,  $V_{iz}$ ,  $p_i$ ,  $q_i$ ,  $r_i$  — проекции скорости центра масс и угловой скорости твёрдого тела на оси подвижной системы координат;  $F_{ijx}$ ,  $F_{ijy}$ ,  $F_{ijz}$ ,  $M_{ijx}$ ,  $M_{ijy}$ ,  $M_{ijz}$  — проекции главного вектора и главного момента взаимодействия  $i$ -го и  $j$ -го тел на оси подвижной системы координат, связанной с  $i$ -м телом;  $x_{ij}$ ,  $y_{ij}$ ,  $z_{ij}$  — координаты точки крепления  $j$ -го тела в подвижной системе координат, связанной с  $i$ -м телом; функция  $\sigma(i, j)$  :

$$\sigma(i, j) = \begin{cases} +1, & \text{при } i > j \\ -1, & \text{при } i < j \end{cases} \quad (8)$$

Система дифференциальных уравнений дополняется тремя уравнениями проекций скорости центра масс тела на оси неподвижной системы координат:

$$\begin{aligned}
\dot{\xi}_i &= V_{ix} \alpha_{11} + V_{iy} \alpha_{21} + V_{iz} \alpha_{31} \\
\dot{\eta}_i &= V_{ix} \alpha_{12} + V_{iy} \alpha_{22} + V_{iz} \alpha_{32} \quad , \quad (9) \\
\dot{\zeta}_i &= V_{ix} \alpha_{13} + V_{iy} \alpha_{23} + V_{iz} \alpha_{33}
\end{aligned}$$

где  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{21}$ ,  $\alpha_{31}$ ,  $\alpha_{12}$ ,  $\alpha_{22}$ ,  $\alpha_{32}$ ,  $\alpha_{13}$ ,  $\alpha_{23}$ ,  $\alpha_{33}$  — направляющие косинусы между осями подвижной и неподвижной системами координат. И тремя кинематическими уравнениями для производных корабельных углов:

$$\begin{aligned}
\dot{\psi}_i &= (q_i \cos \varphi_i - p_i \sin \varphi_i) / \cos \theta_i \\
\dot{\theta}_i &= p_i \cos \varphi_i - q_i \sin \varphi_i \\
\dot{\phi}_i &= r_i + \operatorname{tg} \theta_i (p_i \sin \varphi_i + q_i \cos \varphi_i)
\end{aligned} \quad (10)$$

или четырьмя уравнениями для производных кватернионов:

$$\begin{aligned}
\dot{h}_{0,i} &= -(h_{1,i} p + h_{2,i} q + h_{3,i} r) / 2 \\
\dot{h}_{1,i} &= (h_{0,i} p - h_{3,i} q + h_{2,i} r) / 2 \\
\dot{h}_{2,i} &= (h_{3,i} p + h_{0,i} q - h_{1,i} r) / 2 \\
\dot{h}_{3,i} &= (-h_{2,i} p + h_{1,i} q + h_{0,i} r) / 2
\end{aligned} \tag{11}$$

Уравнения (10) предпочтительно использовать в тех случаях, когда угол крена тел заведомо отличается от  $\pm 90^\circ$ , в общем случае используются уравнения (11).

Взаимодействие между телами (включая взаимодействие тел со средой) может задаваться в виде силовых полей, голономных или неголономных связей, в общем случае не стационарных. Общее количество таких уравнений для каждой пары взаимодействующих тел равно шести. В зависимости от вида взаимодействия часть этих уравнений соответствует уравнениям связей, а остальные — задаются в виде выражений для сил и моментов в проекциях на те оси подвижных систем отсчёта, движение по которым не ограничивается связями. Некоторые примеры:

- 1) силы тяжести задаются как силовые поля, действующие со стороны среды на тела системы;
- 2) для сферического шарнира задаются три уравнения связей, геометрический смысл которых — абсолютные координаты точки взаимодействия тел должны быть равны друг другу, и три уравнения силовых полей для моментов  $M_{ijx}$ ,  $M_{ijy}$ ,  $M_{ijz}$ , которые в частном случае при отсутствии в шарнире трения и управления могут быть равны нулю;
- 3) для скользящей заделки записывается одно силовое уравнение в проекции на ось заделки (в частных случаях эта сила может быть равна нулю, представлять собой силу трения, развиваемое двигателем усилие и т. п.) и пять уравнений связей, задающих ограничения на взаимный поворот тел и линейное перемещение в направлениях, ортогональных оси заделки;
- 4) взаимодействие стопы шагающего движителя с опорной поверхностью может задаваться в виде связи, накладывающей ограничения на координаты и скорости точки контакта, а может задаваться в виде той или иной феноменологической модели сил взаимодействия, учитывающей упругую, вязкую и пластичную составляющие.

Таким образом, получается система дифференциально-алгебраических уравнений, включающая в себя  $12N + 6K$  или  $13N + 6K$  уравнений в зависимости от выбора уравнений вида (10) или (11) относительно  $12N + 6K$  или  $13N + 6K$  переменных соответственно.

В случае силового поля выражения для сил или моментов ( $F_{ijx}$ ,  $F_{ijy}$ ,  $F_{ijz}$ ,  $M_{ijx}$ ,  $M_{ijy}$  или  $M_{ijz}$ ) задаются как функции времени, обобщённых координат и скоростей взаимодействующих тел и включаются в общую систему уравнений непосредственно

$$\begin{aligned}
F_l &= F_l(t, \mathbf{X}_i, \mathbf{V}_i, \mathbf{X}_j, \mathbf{V}_j) \text{ или } F_l = F_l(t, \mathbf{X}'_i, \mathbf{V}_i, \mathbf{X}'_j, \mathbf{V}_j), \\
M_l &= M_l(t, \mathbf{X}_i, \mathbf{V}_i, \mathbf{X}_j, \mathbf{V}_j) \text{ или } M_l = M_l(t, \mathbf{X}'_i, \mathbf{V}_i, \mathbf{X}'_j, \mathbf{V}_j),
\end{aligned} \tag{12}$$



где  $l$  — индекс уравнения (от 1 до 6),  $X$  и  $X'$  — векторы-столбцы  $X=(\xi, \eta, \zeta, \psi, \theta, \varphi)^T$  и  $X'=(\xi, \eta, \zeta, h_0, h_1, h_2, h_3)^T$  для соответствующих тел,  $V$  — вектор-столбец  $V=(V_x, V_y, V_z, p, q, r)^T$  для соответствующего тела, символ  $T$  здесь означает операцию транспонирования.

Голономные связи и программные движения тел системы представляются уравнениями, зависящими от времени и обобщённых координат тел, вида:

$$D_l(t, X_i, X_j)=0 \text{ или } D_l(t, X'_i, X'_j)=0, \quad (13)$$

которые представляют собой алгебраические уравнения и в общую систему дифференциальных уравнений включаются в виде:

$$\ddot{D}_l + 2a\dot{D}_l + b^2 D_l = 0, \quad (14)$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные коэффициенты, значения которых подбираются экспериментально при моделировании на ЭВМ для обеспечения устойчивости численного решения.

На практике в ряде случаев программные движения тел удобнее представлять в виде ограничений, наложенных на обобщённые скорости тел, несмотря на то, что часто эти уравнения могут быть проинтегрированы. Такие ограничения, также как и неголономные связи, задаются уравнениями вида:

$$B_l(t, X_i, V_i, X_j, V_j)=0 \text{ или } B_l(t, X'_i, V_i, X'_j, V_j)=0. \quad (15)$$

Для включения этих зависимостей в общую систему уравнений они дифференцируются один раз и включаются в виде:

$$\dot{B}_l + s B_l = 0 \quad (16)$$

где  $s$  — постоянный коэффициент, определяемый аналогично коэффициентам  $a$  и  $b$ .

Старшие производные в выражениях (14) и (16) позволяют алгебраические уравнения связей представлять в виде дифференциальных уравнений, а остальные слагаемые обеспечивают автоматическое затухание ошибок расчётов при численном интегрировании.

При движении машины по относительно ровной поверхности часто можно пренебрегать вертикальными перемещениями корпуса, углами его дифферента и крена. Тогда количество независимых законов управления уменьшается до трёх, а количество управляемых параметров до 11.

В разработанном программном обеспечении процесс создания модели заключается в выполнении исследователем следующих действий.

1. Создаётся необходимое количество объектов, соответствующих твёрдым телам. Для каждого из них выбирается способ задания кинематики вращения через корабельные углы или кватернионы.

2. Создаётся необходимое количество объектов, соответствующих силовым взаимодействиям, связям между телами системы и программным законам движения.

3. Все массово-геометрические параметры объектов инициализируются, начальные условия для независимых обобщённых координат указываются, программные законы движения задаются или разрабатываются подпрограммы, обеспечивающие автоматическое формирование программных законов, расчёт параметров или начальных условий.

После запуска программы на исполнение происходит автоматическое вычисление начальных условий для зависимых обобщённых координат в соответствии с наложенными на тела системы связями (13) и (15) и автоматическое формирование общей системы дифференциально-алгебраических уравнений, включающей в себя динамические уравнения движения тел (7), кинематические уравнения (9), (10) и (11), выражения для сил взаимодействия между телами (12), уравнения связей и программных движений в дифференциальной форме (14) и (16). На каждом шаге численного интегрирования полученная система уравнений разрешается следующим образом.

1. Уравнения (7), (12), (14) и (16) решаются известными методами линейной алгебры как система линейных алгебраических уравнений относительно обобщённых ускорений тел, активных сил взаимодействия и реакций связи между телами.

2. Полученные значения ускорений совместно с выражениями (9), (10) и (11) интегрируются известными методами численного интегрирования.

Особенностью разработанных теоретико-механических моделей является единообразный подход к заданию законов управления шагающими аппаратами. В зависимости от решаемых задач законы управления могут задаваться либо в виде законов изменения усилий, реализуемых приводными двигателями, либо в виде геометрических или кинематических программных законов движения.

Каждый из приводных двигателей шагающей машины должен управляться. И одной из основных задач системы управления является генерация программных законов движения по каждой из управляемых степеней свободы машины. Однако из-за требования согласованности работы механизмов шагания и требования обеспечения необходимых условий взаимодействия с грунтом (например, отсутствие проскальзывания) количество независимых законов управления, как правило, намного меньше числа приводных двигателей. С другой стороны, законы управления часто удобнее задавать не для звеньев механизмов шагания в их относительном движении, а, например, для корпуса в его абсолютном движении. Таким образом, количество параметров, которые принципиально могут быть управляемыми, больше числа приводных двигателей. Причём в процессе движения бывает необходимо «переключаться» с одного набора управляемых параметров на другой.

Например, шагающая машина «Ортоног» при отсутствии внешних связей имеет 26 степеней свободы: 6 степеней свободы корпуса как твёрдого тела и по 5 степеней свободы в каждом из 4 движителей. Поэтому каждый из 4 движителей содержит 5 управляемых приводов.

Если потребовать, чтобы движение механизмов шагания, находящихся в фазе переноса, было согласовано с движением парных механизмов, находящихся в опорной фазе, то это будет эквивалентно наложению на систему 8 связей, фактически задающих законы управления 8 приводными двигателями, относящимися к 4 механизмам шагания, которые находятся в фазе переноса.

Если добавить также требования безотрывности и отсутствия проскальзывания опорных стоп по грунту, то это будет эквивалентно наложению 3 связей на каждый из 4 движителей.

Таким образом, шагающая машина будет представлять собой механическую систему с 6 степенями свободы. Для управления движением такой механической системы необходимо задать 6 законов движения по обобщённым координатам корпуса, обобщённым координатам опорных механизмов шагания или какой-либо их комбинации. Остальные 12 законов движения будут определяться из заданных уравнений связи. При этом необходимо контролировать, чтобы задаваемые законы движения при включении их в общую систему дифференциальных уравнений не приводили к её вырождению или противоречивости.

Удобным способом задания законов управления представляется задание их в виде уравнений, связывающих между собой обобщённые скорости корпуса или опорных механизмов шагания:

$$\mathbf{A} \times \mathbf{V} = \mathbf{B} \quad (17)$$

где  $\mathbf{A}$  — матрица коэффициентов при скоростях, размерности  $K \times N$ ;  $K$  — количество степеней свободы (в рассматриваемом примере — 6);  $N$  — количество обобщённых скоростей, принципиально доступных для управления (в рассматриваемом примере — 18);  $\mathbf{B}$  — матрица-столбец законов управления размерности  $K$ ;  $\mathbf{V}$  — матрица-столбец обобщённых скоростей размерности  $N$ :

$$\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z, p, q, r, \dot{\rho}_1, \dots, \dot{\rho}_4, \dot{\chi}_1, \dots, \dot{\chi}_4, \dot{\psi}_1, \dots, \dot{\psi}_4)^T \quad (18)$$

$V_x, V_y, V_z, p, q, r$  — обобщённые скорости корпуса;  $\dot{\rho}_1, \dots, \dot{\rho}_4$  — обобщённые скорости приводов курсового движения;  $\dot{\chi}_1, \dots, \dot{\chi}_4$  — обобщённые скорости приводов адаптации;  $\dot{\psi}_1, \dots, \dot{\psi}_4$  — обобщённые скорости поворотных приводов.

Матрица  $\mathbf{A}$  может рассматриваться как блочная матрица, составленная из квадратной матрицы размерностью  $K \times K$ , столбцы которой соответствуют обобщённым скоростям корпуса, и прямоугольной матрицы размерностью  $K \times (N - K)$ , столбцы которой соответствуют обобщённым скоростям приводов машины.

Например, для того, чтобы задать движение корпуса независимо по шести обобщённым координатам (скоростям) нужно заполнить матрицу  $\mathbf{A}$  нулями, присвоив единицы компонентам главной диагонали подматрицы  $K \times K$ . Тогда компоненты матрицы-столбца  $\mathbf{B}$  будут содержать законы изменения обобщённых скоростей корпуса. Так, если задать закон движения

центра корпуса машины по окружности радиуса  $V_0/\Omega$  в плоскости опорной поверхности с постоянной скоростью  $V_0$  и одновременным поворотом корпуса так, чтобы продольная его ось была направлена по касательной к траектории, а в вертикальном направлении — перемещение корпуса по гармоническому закону с частотой  $\omega$  и амплитудой  $a_z/\omega$ , то уравнение (17) принимает вид:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_0 \\ 0 \\ a_z \sin(\omega t) \\ 0 \\ 0 \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (19)$$

Если задать ограничение на сумму обобщённых скоростей приводов курсового движения и угловую скорость корпуса, то (17) принимает вид:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \mathbf{V} = \begin{bmatrix} P \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (20)$$

Четыре единицы в первой строке означают наличие связи между скоростями приводов курсового движения всех движителей шагающей машины. Если бы рассматривался полноприводный двухосный автомобиль, то таким образом описывалась бы связь, задаваемая межосевым и межбортовыми дифференциалами. Для шагающей машины «Ортоног» связь такого типа может быть реализована соответствующим программным управлением.

Выделение законов управления в виде отдельного матричного выражения даёт удобный инструмент перехода с одного закона движения на другой путём изменения или замены матриц **A** и **B**. В частности, этот подход используется в системе управления шагающей машины «Ортоног».

Созданное на основе разработанных математических моделей программное обеспечение позволяет осуществлять имитационное моделирование движения шагающих роботов, вычислять значения всех механических показателей качества, а также вычислять значения частных производных показателей качества от обобщённых координат, скоростей и ускорений тел системы, что необходимо при решении задач оптимизации.

Адекватность разработанных теоретико-механических моделей была проверена по результатам натуральных экспериментов для шагающих машин «Восьминог» и «Ортоног». В качестве примера на рисунке 4 приведены расчётный и экспериментальный графики изменения мощности от времени для шагающей машины «Восьминог».

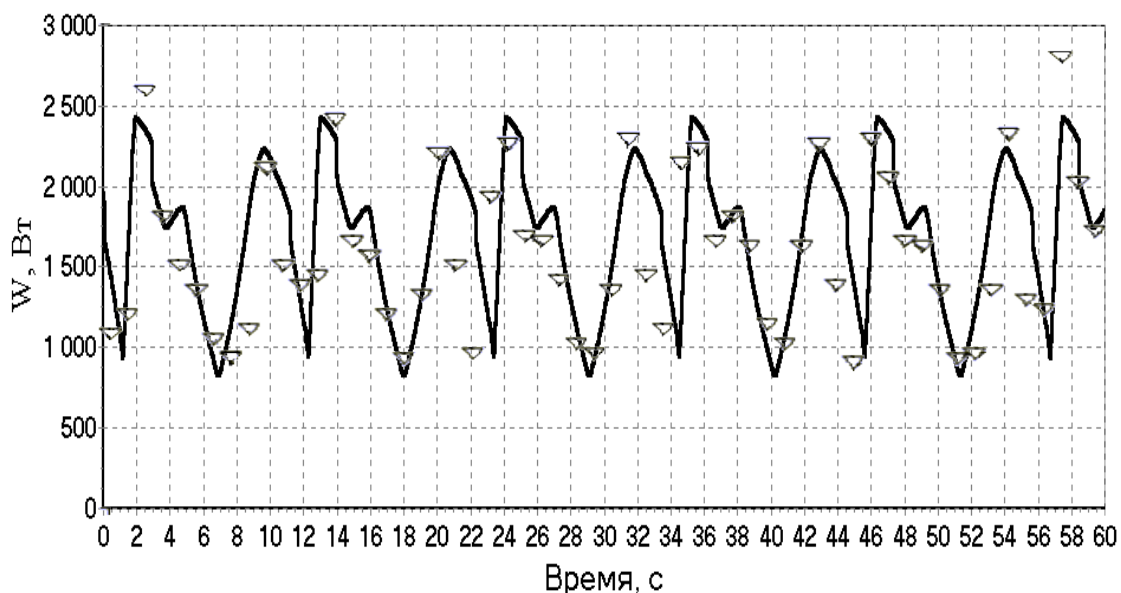


Рисунок 4 — Зависимости мощности от времени при движении шагающей машины «Восьминог»: расчётная (сплошная линия), экспериментальная (точки).

**В третьей главе** разработаны методы оптимизации алгоритмов и законов управления шагающими машинами. Практическое применение разработанных методов иллюстрируется на примере шагающих машин «Восьминог» и «Ортоног».

Шагающий робот имеет  $N$  степеней свободы и описывается вектором независимых обобщённых координат  $q = (q_i)^T, i = 1, \dots, N$ . Рассматриваются те частные критерии качества  $H_j$ , которые могут быть представлены в виде интегралов по времени, подынтегральная функция которых зависит от обобщённых координат и их производных. Для механических систем это как правило производные первого  $\dot{q} = (\dot{q}_i)^T$  и второго  $\ddot{q} = (\ddot{q}_i)^T$  порядков:

$$H_j = \int_0^\tau f_j(t, q, \dot{q}, \ddot{q}) dt \quad (21)$$

где  $f_j$  — функция механического состояния, конкретный вид которой определяется характером решаемой задачи;  $t$  — текущее время;  $\tau$  — рассматриваемый период времени — для шагающих машин обычно время одного шага или время одного цикла, состоящего из двух шагов. Примеры таких показателей: среднеквадратичное ускорение какой-либо точки; механическая работа сил, развиваемых каким-либо двигателем, и другие.

Тогда подынтегральная функция качества (6) определяется выражением:

$$\Phi = \sum_j k_j f_j(t, q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (22)$$

А поиск оптимальных по целевой функции (5) уравнений движения сводится к решению системы  $N$  уравнений Эйлера-Лагранжа:

$$\frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{q}_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_i} = 0 \quad (23)$$

при соответствующих начальных или граничных условиях.

В результате решения системы уравнений (23) получаются  $N$  зависимостей

$$q_i = q_i(t, k_1, k_2, \dots, k_j, \dots) \quad (24)$$

которые представляют собой программные движения шагающего аппарата, обеспечивающие экстремальность по критерию (5) и зависящие от выбора весовых коэффициентов  $k_j$ . В зависимости от особенностей решаемой задачи дополнительно может потребоваться проверка полученного экстремума на минимум или максимум. В большинстве технических задач проверка достаточности условий оптимальности не требуется в связи с физическим смыслом решаемой задачи. Однако, в общем случае необходима проверка достаточных условий Лежандра и Якоби.

Описанный подход применён при оптимизация работы линейного привода фирмы «Exlar» (рис. 5) использованного в приводах движителей шагающей машины «Ортоног».

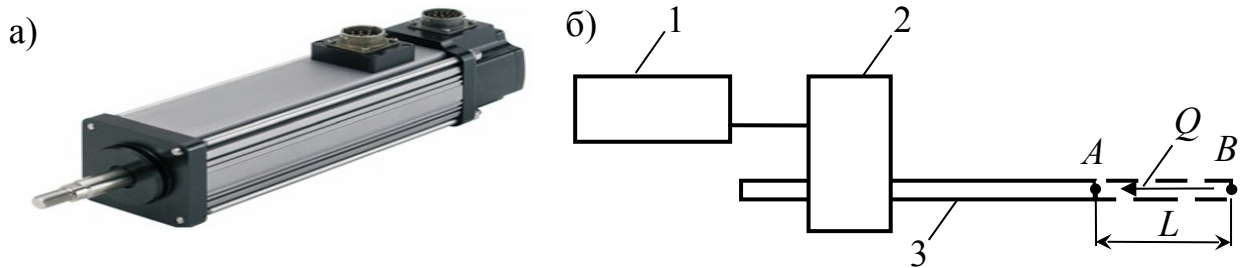


Рисунок 5 — Линейный привод фирмы «Exlar»: а) внешний вид, б) расчётная схема. 1 — двигатель, 2 — редуктор, 3 — шток.

Рассматривается перемещение штока из положения  $A$  в положение  $B$ . На границах участка  $AB$  скорость штока задаётся равной нулю. В качестве обобщенной координаты выбирается угол поворота вала двигателя  $\varphi$ . Заданному перемещению штока за время  $\tau$  на величину  $L$  соответствует поворот вала двигателя на угол  $\varphi_\tau$ . Затем осуществляется движение в обратную сторону по тому же закону. Поэтому  $\tau$  – время половины цикла. Приведённый к валу двигателя постоянный момент инерции обозначается через  $J$ . Полезная сила сопротивления движению  $Q$  задается пропорциональной угловой скорости  $\dot{\varphi}$ , коэффициент пропорциональности обозначается через  $\mu$ . Оптимизация осуществляется по обобщённому критерию (5) с подынтегральной функцией качества  $\Phi$ , не зависящей явным образом от времени и обобщенной координаты:

$$\Phi = k_1 f_1 + k_w f_w = \frac{k_1}{g^2} r^2 \ddot{\varphi}^2 + \frac{k_w \tau \alpha}{A} (J \ddot{\varphi} + \mu \dot{\varphi})^2 \quad (25)$$

где  $f_1$  — функция, соответствующая частному критерию комфортабельности движения (минимума среднеквадратичного ускорения

штока);  $f_w$  — функция, соответствующая частному критерию минимума тепловых потерь в электродвигателе постоянного тока;  $k_1, k_w$  — весовые коэффициенты;  $r$  — условный радиус, связывающий между собой перемещение штока и угол поворота вала двигателя;  $\alpha$  — постоянный коэффициент, характеризующий двигатель;  $g, \bar{A}$  — постоянные нормирующие коэффициенты, имеющие размерность ускорения и работы соответственно.

Оценка осуществляется по частным критериям:  $\tilde{H}_1$  — квадрату среднеквадратичного ускорения и  $\tilde{H}_w$  — квадрату среднеквадратичного значения момента развиваемого двигателем:

$$\begin{aligned} \tilde{H}_1 &= \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \ddot{\phi}^2 dt \\ \tilde{H}_w &= \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \left( \frac{J}{u} \ddot{\phi}^2 + \dot{\phi} \right)^2 dt \end{aligned} \quad (26)$$

Тогда, при соответствующем выборе нормирующих коэффициентов  $g$  и  $\bar{A}$ , можно получить зависимости частных показателей от соотношения весовых коэффициентов, представленные на рисунке 6. Их анализ позволяет осуществить субъективный выбор программного режима движения управляемого двигателя.

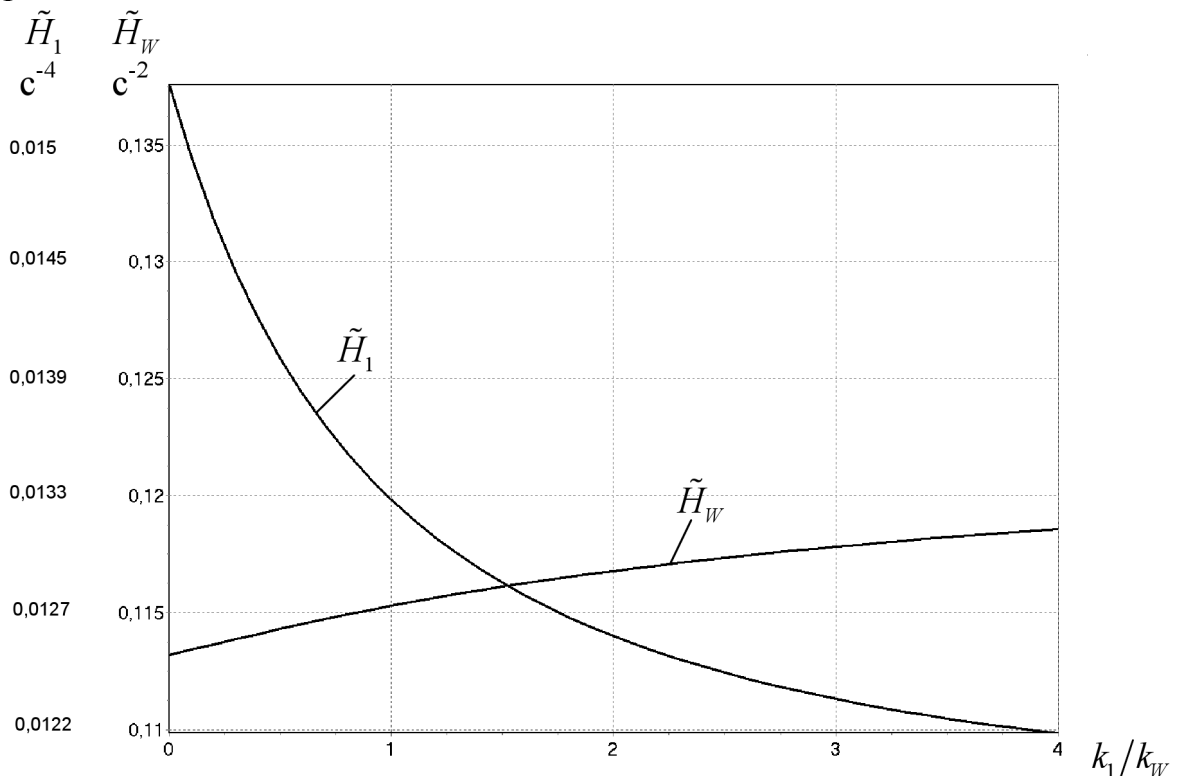


Рисунок 6 — Зависимости частных показателей качества от соотношения весовых коэффициентов.

Решения, получающиеся с помощью уравнения Эйлера-Лагранжа, являются Парето оптимальными, и обычно их принято изображать в виде

границы Парето в координатных осях  $H_1$  и  $H_W$  (рисунок 7). Однако форма представления, приведённая на рисунке 6 в ряде случаев более удобна, так как предоставляет инструмент выбора не только одного из решений, но и весовых коэффициентов, которые позволяют найти это решение. Например, наилучшее (в данном случае — минимальное) значение показателя  $H_W$  и одновременно наихудшее значение показателя  $H_1$  соответствует значению  $k_1 = 0$ . Стремясь улучшить показатель  $H_1$ , придётся согласиться на ухудшение показателя  $H_W$ , и по графикам 6 можно определить не только значения самих показателей, но и значения (точнее соотношение) весовых коэффициентов, которые при подстановке в уравнения Эйлера-Лагранжа дают возможность определить закон движения механизма, обеспечивающего получение требуемых значений показателей.

Законы изменения угловой скорости для различных соотношений весовых коэффициентов  $k_1/k_W$  показаны на рисунке 8.

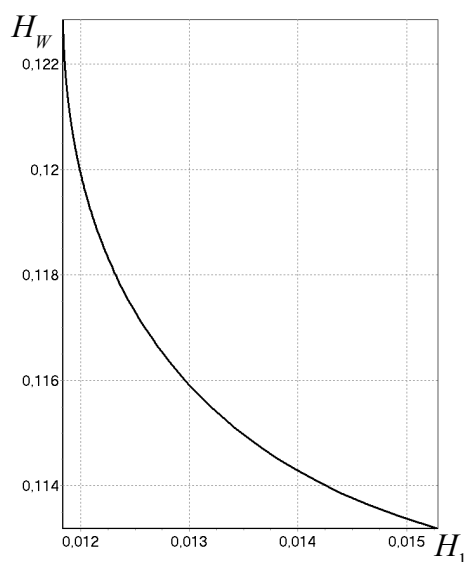


Рисунок 7 — Граница Парето.

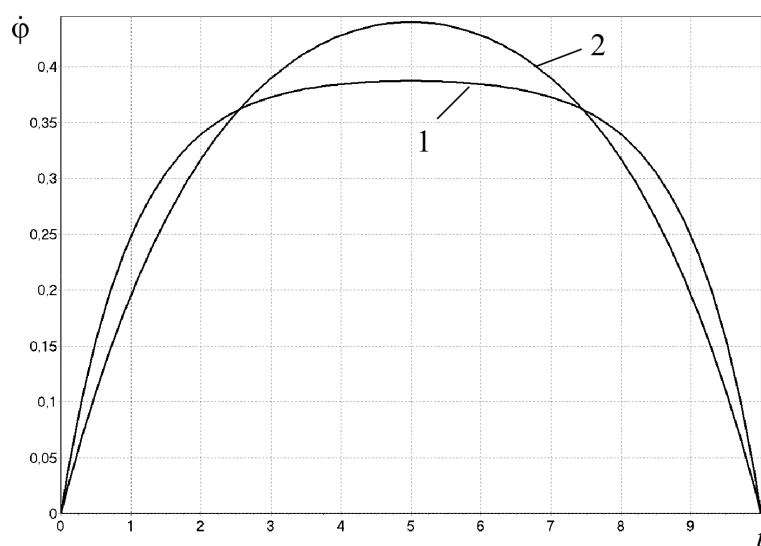


Рисунок 8 — Законы изменения угловой скорости: 1 —  $k_1/k_W = 0$ , 2 —  $k_1/k_W = 4$ .

При решении аналогичной задачи для шагающего движителя на основе шарнирных четырёхзвенников, использованного в машины «Восьминог», количество частных критериев равно 9:

$$\begin{aligned}
 H_{aj} &= \frac{1}{g^2 \tau} \int_0^{\tau} a_j^2 dt \\
 H_{\varepsilon j} &= \tau \int_0^{\tau} \varepsilon_j^2 dt \\
 H_W &= \frac{\alpha}{A} \int_0^{\tau} M_{\text{об}}^2 dt
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

где  $H_{aj}$ ,  $H_{\varepsilon j}$  — безразмерные квадраты среднеквадратичных ускорений центра масс  $j$ -го звена и углового ускорения  $j$ -го звена;  $j = 1, 2, 3, 4$  — номера звеньев механизма шагания;  $H_W$  — безразмерные тепловые потери.



Подынтегральная функция качества имеет вид:

$$\begin{aligned} \Phi = & \sum k_j \left( \beta_{1j}(\varphi) \dot{\varphi}^4 + \beta_{2j}(\varphi) \dot{\varphi}^2 \ddot{\varphi} + \beta_{3j}(\varphi) \ddot{\varphi}^2 \right) \frac{1}{g^2 \tau} + \\ & + \sum k_{N+j} \left( \gamma_{1j}(\varphi) \dot{\varphi}^4 + \gamma_{2j}(\varphi) \dot{\varphi}^2 \ddot{\varphi} + \gamma_{3j}(\varphi) \ddot{\varphi}^2 \right) \tau + \\ & + k_w \frac{\alpha}{A} \left( J(\varphi) \ddot{\varphi} + \frac{1}{2} \frac{\partial J}{\partial \varphi} \dot{\varphi}^2 + Q(\varphi) \right)^2 \end{aligned} \quad (28)$$

где  $\beta_{1j}, \beta_{2j}, \beta_{3j}, \gamma_{1j}, \gamma_{2j}, \gamma_{3j}$  — передаточные функции механизма,  $J$  — приведённый момент инерции.

Для численного решения уравнения Эйлера-Лагранжа (23) после подстановки в него функции  $\Phi$  (28) выписываются разностные схемы, соответствующие частным и полным производным  $\frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{\varphi}}, \frac{d}{dt} \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varphi}}, \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi}$ , в результате чего уравнение сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению четвёртого порядка относительно обобщённой координаты  $\varphi$ . Значения функции  $\Phi$ , входящие в разностные схемы, определяются из теоретико-механической модели движения аппарата.

Одним из результатов, полученных рассматриваемым методом для шагающих машин с цикловыми движителями, является решение задачи об энергетически оптимальном управлении маршевым режимом движения шагающей машины. Известным в теории шагающих машин фактом является рост мощности двигателей машины пропорционально кубу скорости при постоянной скорости движения корпуса за счёт разгона и торможения движителей на каждом шаге. Однако, если отказаться от требования равномерного движения корпуса, то можно синтезировать такие законы управления механизмами шагания, которые обеспечат равенство нулю суммарной мощности, требуемой на разгон/торможение корпуса и движителей. Эти законы должны подчиняться условию

$$\dot{T} + QV = \bar{Q}\bar{V} \quad (29)$$

где  $T$  — кинетическая энергия системы;  $Q$  — полезная сила сопротивления движению;  $V$  — скорость маршевого движения корпуса;  $\bar{Q}, \bar{V}$  — средние значения силы и скорости. В случае синхронной работы всех шагающих движителей, обеспечивающих поступательное движение корпуса машины, и при пренебрежении инерционными характеристиками механизмов шагания за исключением массивной стопы уравнение (29) может быть записано в виде

$$m_1 V_1 \dot{V}_1 + m_2 V_2 \dot{V}_2 + QV_1 = \bar{Q}\bar{V}_1 \quad (30)$$

где  $m_1$  — масса корпуса,  $m_2$  — суммарная масса стоп,  $V_1, \bar{V}_1$  — скорость и средняя скорость корпуса,  $V_2$  — скорость стоп.

Выполнение условий (29) или (30) требует от исполнительных двигателей отработки достаточно сложных законов управления и приводит к значительным ускорениям движителей и корпуса машины. Поэтому более целесообразным представляется поиск компромиссного варианта управления, учитывающего кроме энергетической эффективности и такие показатели как

сложность системы управления, инерционные нагрузки, определяемые главным образом ускорениями стоп  $\dot{V}_2$ , и комфортабельность движения, определяемая ускорением корпуса  $\dot{V}_1$ .

В ряде случаев решение точной вариационной задачи затруднительно. Для определения законов движения в таких ситуациях использовался прямой метод задания программных движений, состоящий из двух этапов: этапа обучения и рабочего этапа. На этапе обучения определяются весовые коэффициенты согласно следующему алгоритму.

1. Ставится тестовая цель и формируются не менее  $L$  законов управления, обеспечивающих достижение заданной цели, где  $L$  — количество частных показателей качества, подлежащих оптимизации.

2. Для каждого из законов вычисляются значения всех частных показателей  $H_{ij}$ , где  $i$  — номер теста,  $j$  — номер показателя.

3. Результат движения машины для каждого из законов управления оценивается экспертом с выставлением количественной оценки  $I_i$ , которая трактуется как значение обобщённого критерия качества.

4. Значения весовых коэффициентов  $k_j$  определяются в результате решения системы линейных уравнений

$$\sum_{j=1}^L H_{ij} k_j = I_i, \quad i=1, \dots, L \quad (31)$$

при совпадении количества законов и количества частных показателей или методом наименьших квадратов если количество тестовых законов больше количества показателей.

5. Если система уравнений (31) окажется близка к линейно зависимой, то следует вернуться к пункту 1 и сформировать другие законы управления.

На рабочем этапе система управления машиной осуществляет выбор лучшего закона управления из ограниченного числа таких законов по следующему алгоритму.

1. Ставится очередная цель и формируются несколько законов управления, обеспечивающих достижение этой цели.

2. Выполняется расчёт динамики движения машины под управлением каждого из этих законов с вычислением частных показателей.

3. С использованием весовых коэффициентов, определённых на этапе обучения, вычисляются значения общего критерия для каждого из законов управления и выбирается закон, обеспечивающий лучшее значение критерия.

Прямой метод задания программных движений позволяет выбрать лучшее решение из ограниченного заранее сформированного набора вариантов. Метод обладает простотой реализации, относительно высоким быстродействием, на рабочем этапе не требует участия человека, позволяет учитывать частные критерии без каких-либо ограничений.

Этот метод был использован для решения задачи прокладки трассы шагающей машины «Ортоног» в реальных условиях движения. При

управлении корпусом шагающей машины в плоскости опорной поверхности матрица-столбец (18) записывается в виде

$$V = (V_x, V_y, r, \dot{\rho}_1, \dots, \dot{\rho}_4, \dot{\psi}_1, \dots, \dot{\psi}_4)^T \quad (32)$$

Уравнения управления (17) приобретают вид:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times V = \begin{bmatrix} B_x(t, q) \\ B_y(t, q) \\ B_r(t, q) \end{bmatrix} \quad (33)$$

где  $B_x, B_y, B_r$  — законы изменения продольной и поперечной скоростей центра корпуса машины и угловой скорости корпуса в плоскости движения.

Обеспечивается перемещение аппарата за определённое время в заданное положение с нулевыми начальными и конечными скоростями с обходом препятствий или перешагиванием зон, запретных для наступания. Вводятся частные показатели:  $H_1, H_2$  — показатели комфортабельности движения, оцениваемые максимальным ускорением  $a_{max}$  полюса С и максимальным угловым ускорением  $\varepsilon_{max}$  корпуса;  $H_3$  — максимальное усилие  $F_{max}$  в приводах курсового движения;  $H_4$  — максимальный момент  $M_{max}$  в приводах поворота движителей;  $H_5$  — максимальная мощность приводов  $W_{max}$ ;  $H_6$  — экологичность, оцениваемая количеством оставленных машиной следов  $N_{sh}$ . Показатели нормализуются:

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{1}{g} a_{max}, & H_2 &= \frac{S}{g} \varepsilon_{max}, & H_3 &= \frac{1}{Q} F_{max}, \\ H_4 &= \frac{1}{SQ} M_{max}, & H_5 &= \frac{\tau}{SQ} W_{max}, & H_6 &= \frac{1}{n} N_{sh} \end{aligned} \quad (34)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения,  $S$  — расстояние до цели,  $Q$  — средняя сила сопротивления движению,  $\tau$  — заданное время движения,  $n$  — нормирующий коэффициент. Законы изменения обобщённых скоростей задаются в виде многочленов второго порядка и гармонических функций, коэффициенты при которых подбираются из условия выполнения граничных условий и условий обхода или перешагивания препятствий.

**В четвёртой главе** разработаны методы структурно-параметрической оптимизации шагающих машин. Методы изменения структуры включают в себя добавление новых механизмов или звеньев механизмов, изменение числа степеней свободы механизмов, удаление или отключение механизмов или приводов. Как правило, в задачах структурной оптимизации происходит скачкообразное изменение показателей при изменении структуры машины, например, при изменении количества механизмов шагания. При изменении структуры, как правило, требуется и подбор новых значений параметров аппарата. В задачах многокритериальной оптимизации сложность изменённых механизмов, которая может оценена количеством звеньев, обычно выступает в качестве одного из частных критериев. На этапе создания машины вычислительная сложность методов оптимизации имеет сравнительно малое значение. Поэтому для структурно-параметрической

оптимизации допустимо использование методов поиска на многомерных кубах или в многомерных областях другой формы, которые редко используются для получения оптимальных законов управления из-за больших затрат времени для расчётов.

Основным достоинством цикловых механизмов шагания, использованных в шагающей машине «Восьминог», является простота их конструкции и управления. Такие движители позволяют эффективно решать задачи грунтовой проходимости при постоянной в пределах шагового цикла скорости вращения входного звена механизма. В то же время несовершенство траектории опорной точки приводит к значительным вертикальным перемещениям корпуса машины при каждом шаге, а неравномерность горизонтальной скорости стопы в опорной фазе приводит периодическому разгону и торможению корпуса. Кроме того, в моменты постановки стопы на грунт её вертикальная скорость отличается от нуля, что приводит к ударным нагрузкам. Устранения этих недостатков можно добиться путём управления угловой скоростью входных звеньев движителей, однако это значительно усложняет систему управления машиной.

Альтернативой является внесение структурных изменений в схему машины: увеличение количества совместно работающих механизмов шагания или использование дополнительных механизмов в трансмиссии, изменяющих закон вращения входного звена движителя при постоянной угловой скорости вала двигателя. Однако при этом могут уменьшаться длина шага и увеличиваться ускорения звеньев механизмов. Таким образом, задача многокритериальной оптимизации машины с цикловыми механизмами шагания включает в себя учёт следующих частных критериев качества:

- сложность структуры  $H_1$ , определяемая количеством механизмов или звеньев механизмов;
- длина шага, для удобства показатель  $H_2$  определяется как разность между постоянной длиной траектории и длиной шага;
- высота вертикальных перемещений корпуса на каждом шаге  $H_3$ ;
- неравномерность горизонтальной скорости в опорной фазе  $H_4$ ;
- максимальное ускорение стопы в опорной фазе, определяющее некомфортность движения корпуса  $H_5$ ;
- максимальное ускорение стопы в фазе переноса, определяющее инерционные нагрузки на привод  $H_6$ ;
- скорость стопы в момент постановки её на грунт, определяющая удары при смене ног  $H_7$ .

Могут быть учтены и другие показатели.

Для цикловых механизмов шагания, объединённых в один движитель, программные режимы движения обеспечиваются голономными связями между звеньями механизмов, реализующими такую разность фаз между ведущими кривошипами, чтобы в каждый момент времени только один из входящих в движитель механизмов шагания находился в контакте с опорной поверхностью. Таким образом, количество механизмов, включающихся в

один движитель ограничено только целесообразностью и сложностью технической реализации. На рисунке 9 представлена принципиальная схема шагающей машины с несколькими движителями, каждый из которых состоит из трёх механизмов шагания. На рисунке 10 показаны зависимости показателей качества при изменении весового коэффициента сложности структуры при фиксированных значениях других коэффициентов.

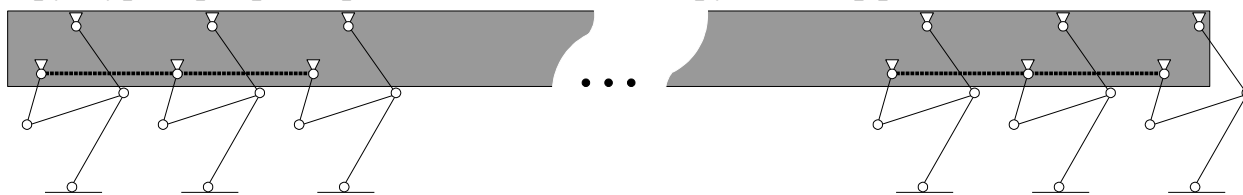


Рис. 9 — Схема машины с движителями, состоящими из трёх механизмов.

Штриховые линии обозначают голономные связи между ведущими звеньями.

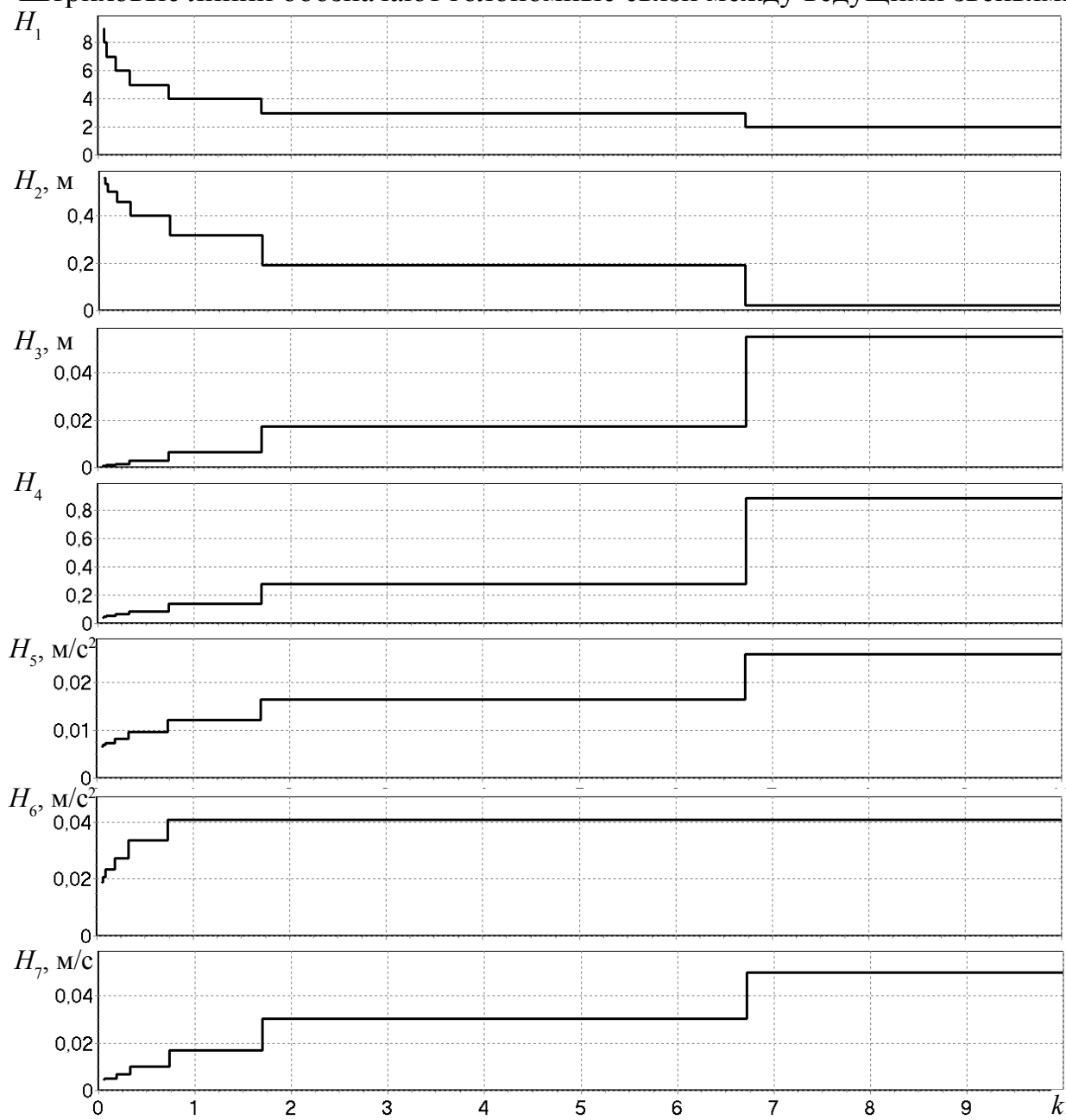


Рисунок 10 — Изменение частных показателей качества в зависимости от весового коэффициента сложности структуры

Другой подход связан с использованием в трансмиссии движителей дополнительных механизмов, обеспечивающих корректировку закона движения ведущего звена основного механизма. Одним из рассмотренных в исследовании механизмов-корректоров является рычажный четырёхзвенный механизм, показанный на рисунке 11.а. Ведущее звено — кривошип 5 механизма-корректора вращается с постоянной угловой скоростью, второй кривошип механизма корректора является одновременно кривошипом 1 основного механизма шагания и вращается неравномерно. Траектория опорной точки остаётся неизменной (рисунки 11.б, 11.в), а закон движения зависит от соотношения размеров механизма-корректора. При соответствующем выборе параметров — размеров механизма-корректора можно добиться оптимума по любому из частных критериев качества, но поскольку критерии находятся в противоречии друг с другом, то решается задача поиска компромиссного решения.

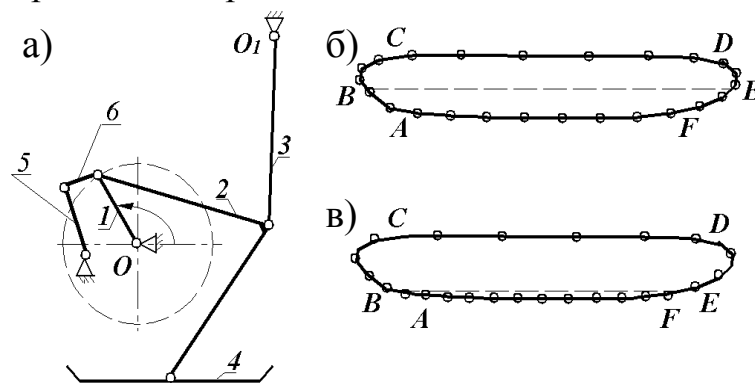


Рисунок 11 — Механизм шагания с рычажным механизмом коррекции. а) схема механизма, б) относительная траектория опорной точки механизма без корректора, в) относительная траектория опорной точки механизма с корректором, 1 — кривошип, 2 — шатун, 3 — коромысло, 4 — стопа, 5 — кривошип корректора, 6 — шатун корректора.

Решение задачи многокритериальной оптимизации такого механизма основывалось на методе поиска в многомерном кубе параметров механизма-корректора. Количество меняющихся параметров равно четырём: длины звеньев 5 и 6, координаты оси вращения кривошипа 5 в системе координат, связанной с осью кривошипа 1.

На рисунке 12 показаны зависимости от весового коэффициента, соответствующего вертикальным перемещениям корпуса машины на каждом шаге, следующих частных критериев качества:

- длина шага  $H_1$ ;
- высота вертикальных перемещений корпуса на каждом шаге  $H_2$ ;
- неравномерность горизонтальной скорости в опорной фазе  $H_3$ ;
- максимальное ускорение стопы в опорной фазе  $H_4$ ;
- максимальное ускорение стопы в фазе переноса  $H_5$ ;
- скорость стопы в момент постановки её на грунт  $H_6$ .

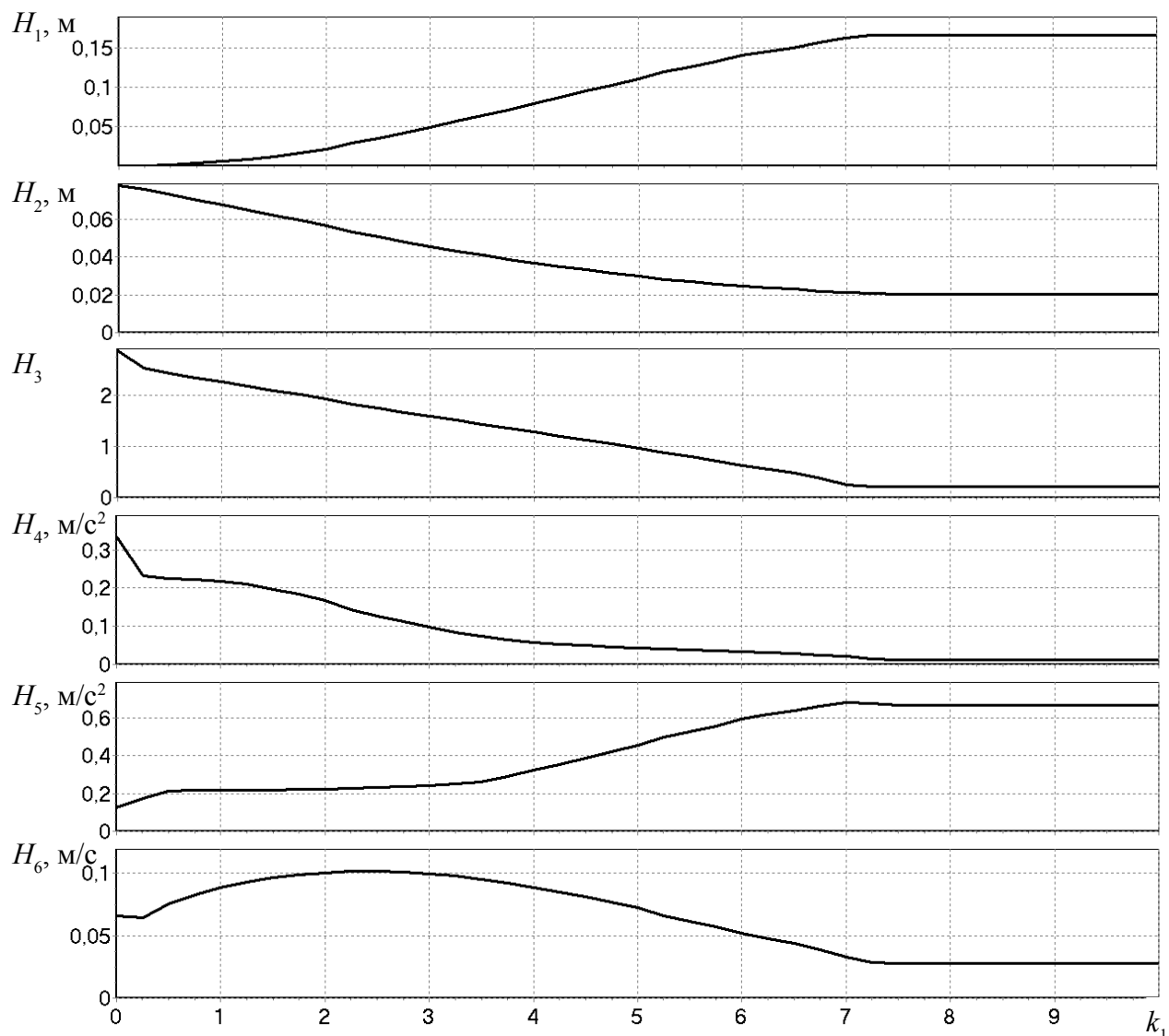


Рисунок 12 — Изменение частных показателей качества в зависимости от весового коэффициента высоты вертикальных перемещений корпуса при использовании механизма-корректора.

Методы структурной оптимизации особенно актуальны для машин, построенных на модульном принципе, который использовался например при разработке машины «Ортоног» и дождевальная машины с шагающими двигателями. Применение отдельных модулей позволяет наращивать возможности машины, собирая из однотипных модулей транспортный агрегат необходимого состава, а также предполагает возможность реконфигурации аппарата во время движения путём отключения или включения некоторых приводов (механизмов шагания, двигателей) и блокировки соответствующих степеней свободы.

В шагающей машине «Ортоног» имеются 4 сдвоенных шагающих двигателя (рисунок 13), каждый из которых состоит из двух плоских ортогональных механизмов шагания с общим поворотным приводом и имеет таким образом 5 управляемых степеней свободы. Каждый привод, каждый механизм шагания и каждый двигатель представляют собой отдельные

модули, которые можно заменять или отключать, считая отключённые модули отсутствующими. Двигатели также можно целиком добавлять в кинематическую схему машины или исключать из неё.

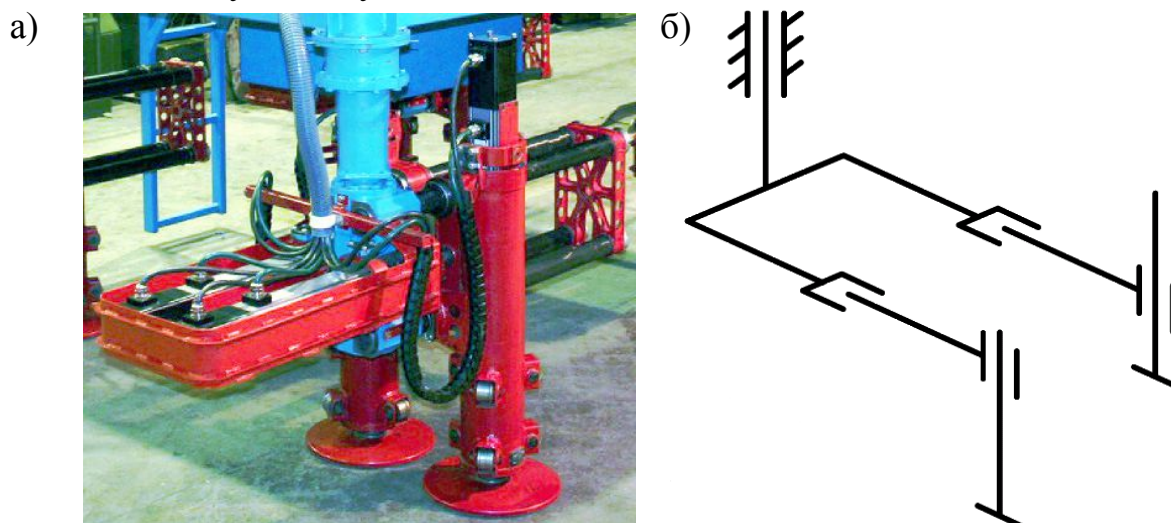


Рисунок 13 — Ортогонально-поворотный движитель машины «Ортоног».

Кинематический анализ показывает, что 20 управляемых степеней свободы, имеющиеся в машине «Ортоног», являются избыточными. Использование меньшего количества приводов, позволит эксплуатировать машину и в тех ситуациях когда использование всех приводов нежелательно или невозможно. Например: при выходе некоторых приводов из строя, при невозможности опирания на один из механизмов шагания из-за особенностей опорной поверхности, и в других ситуациях. Развитие такого подхода позволяет ставить задачу об оценке отказоустойчивости шагающего аппарата.

Разработаны методы: определения необходимого количества и типа приводных модулей, позволяющих осуществлять произвольное программное движение корпуса машины; автоматического определения допустимых походок и ограничений на движение корпуса машины, связанных с исключением некоторых приводных модулей.

Практическая реализация движения с использованием меньшего количества механизмов шагания представляет определённые сложности, связанные с необходимостью контролировать положение центра масс машины относительно опорного многоугольника. Например, при использовании трёх движителей (15 приводов) и нахождении центра тяжести машины в геометрическом центре корпуса для значительного диапазона углов поворота движителей обеспечить статическую устойчивость невозможно. Ограничения на относительное положение движителей должны учитываться при оптимизации структуры реконфигурируемого шагающего аппарата. В исследовании рассмотрены различные способы оценки запаса статической устойчивости: по расстоянию от проекции центра масс до границ опорного многоугольника, по площади опорного многоугольника, по потенциальной энергии сил тяжести, работа против которых необходима для



опрокидывания машины. Соответствующий частный критерий качества определялся как отношение запаса статической устойчивости к максимальному его значению при движении машины при отсутствии отключённых приводов. На рисунке 14 показаны зависимости показателей относительного запаса статической устойчивости  $H_1$ , определённого по потенциальной энергии, и количества отключённых приводов  $H_2$  от соотношения весовых коэффициентов этих показателей.

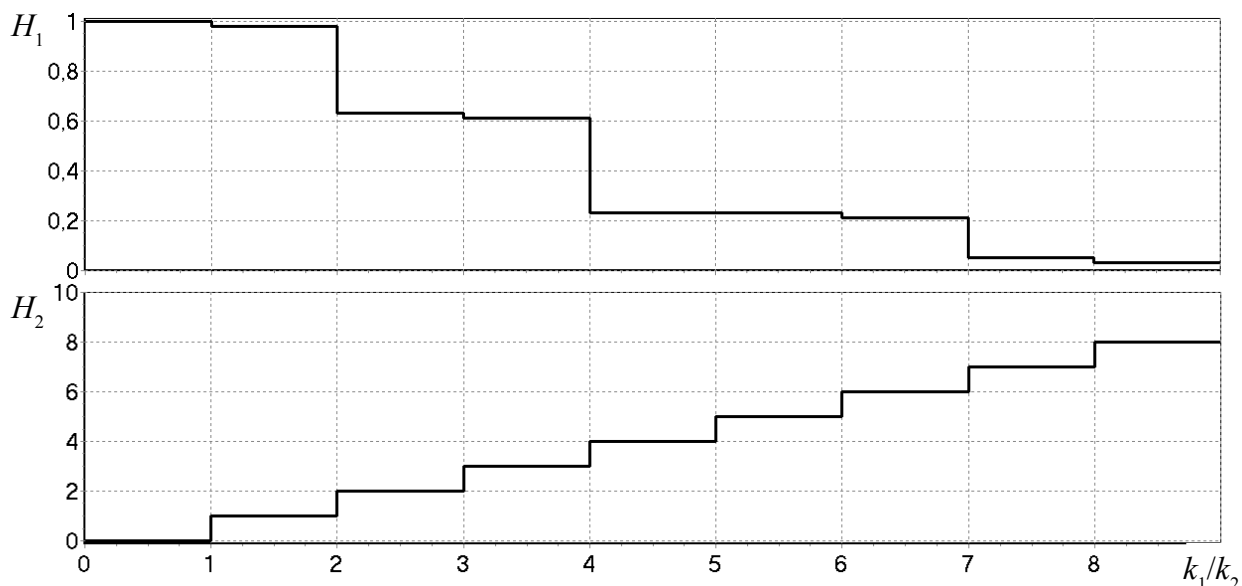


Рисунок 14 — Изменение показателей относительного запаса статической устойчивости  $H_1$  и количества отключённых приводов  $H_2$ .

**В пятой главе** разработаны методы структурно-алгоритмической оптимизации шагающих машин. Изменение структуры шагающей машины в ряде случаев требует не столько оптимизации параметров, сколько разработки новых алгоритмов управления.

Одним из недостатков дождевальных машин кругового действия является наличие значительных участков необрабатываемой земли (рисунок 15.а). Применение шагающих приводов в опорах дождевальных машин позволяет менять форму фермы дождевальной машины во время движения таким образом, чтобы обрабатываемый участок поля был не круглым, что увеличит коэффициент использования земли. В качестве критерия оптимальности здесь принимается минимум механической работы сил, реализуемых приводами, при равномерном вращении фермы изменённой формы вокруг точки  $O$ . Силы сопротивления движению принимаются одинаковыми для всех шагающих опор в связи с одинаковой нагрузкой на каждую опору и однородностью и изотропностью почвенного покрова. Изменением усилий в приводах шагающих движителей в пределах шага пренебрегается. В этом случае задача поиска оптимальной формы сводится к поиску минимума функционала

$$I = \int_{R_0}^R r \sqrt{r^2 \varphi_r^2 + 1} dr \quad (35)$$

с изопериметрическим условием

$$\int_{R_0}^R \sqrt{r^2 \varphi_r^2 + 1} dr = L - R_0 \quad (36)$$

где  $r$ ,  $\varphi$  — полярные координаты кривой,  $\varphi_r$  — производная  $\varphi$  по  $r$ . При решении вариационной задачи, уравнение Эйлера имеет вид:

$$\varphi_r = \frac{c}{r \sqrt{r^2 (r + \mu)^2 - c^2}} \quad (37)$$

где  $c$  — произвольная постоянная,  $\mu$  — множитель Лагранжа, для нахождения которого решение (37) нужно подставить в условие (36). Форма дождевальная машины должна стремиться к кривой, получающейся в результате интегрирования уравнения (37) (рисунок 15.б).

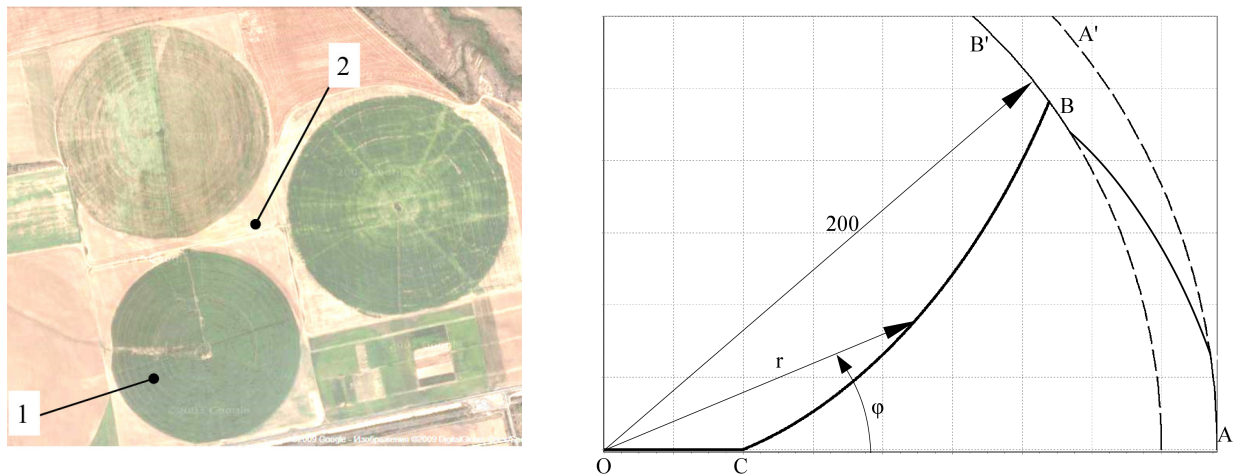


Рисунок 15 — Дождевальная машина кругового действия: а) спутниковая фотография сельскохозяйственных угодий, обрабатываемых круговыми дождевальными машинами, 1 — обрабатываемое поле, 2 — необрабатываемый участок; б) схема изменения формы обрабатываемого поля.

К задачам структурно-алгоритмической оптимизации относится применение разнотипных движителей в одной шагающей машине и построение алгоритмов управления ими. Примерами аппаратов с разнотипными движителями являются шагающая машина «Восьминог М», колёсно-шагающие машины ВНИИТМ (СССР, РФ), ATHLETE (США), Kaiser (Германия) и многие другие. Шагающая машина «Восьминог М» (рисунок 16) отличается от первоначального варианта «Восьминог» наличием дополнительных подъёмно-поворотных движителей.

Дополнительные движители увеличивают сложность конструкции машины и системы управления, но значительно увеличивают её

проходимость и снижают энергозатраты при выполнении некоторых манёвров.

При преодолении препятствий типа выступа противоречие возникает между высотой преодолеваемого препятствия (чем больше, тем лучше) и высотой подъёма машины на подъёмных движителях (чем меньше, тем лучше; высота подъёма равная нулю соответствует отсутствию подъёмных движителей). Зависимость этих показателей от соотношения их весовых коэффициентов показана на рисунке 17.

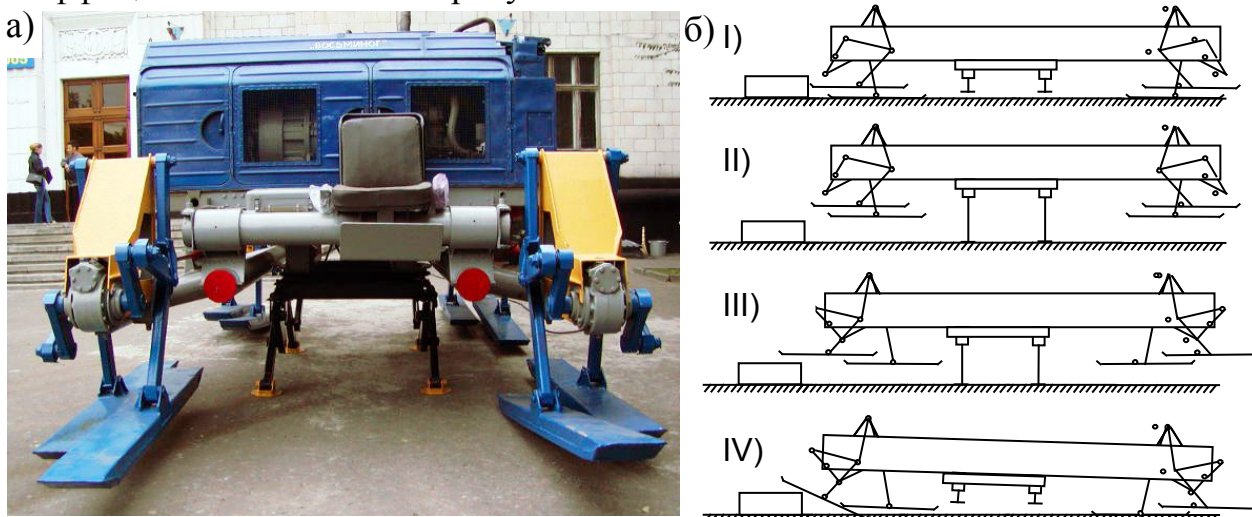


Рисунок 16 — Шагающая машина «Восьминог М» с подъёмно-поворотными движителями: а) внешний вид машины, б) схема преодоления препятствия

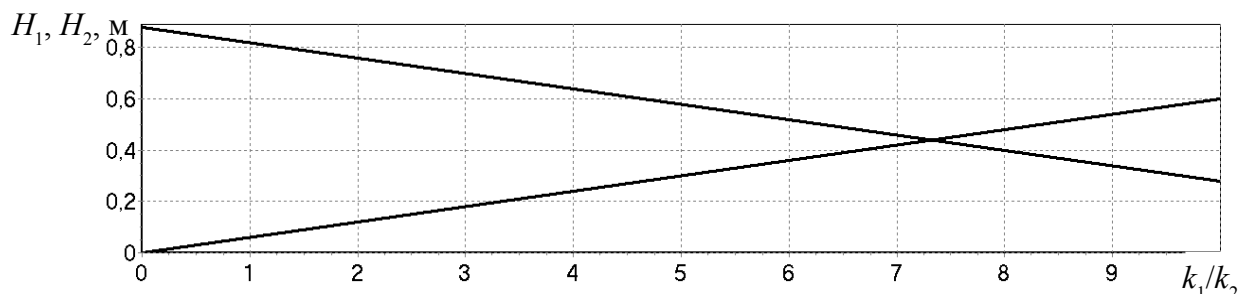


Рисунок 17 — Показатели высоты преодолеваемого препятствия  $H_2$  и подъёма машины  $H_1$  в зависимости от соотношения весовых коэффициентов

### Основные результаты и выводы

Предложена и обоснована система показателей качества шагающих машин, позволяющая оценивать качество шагающих машин со сдвоенными движителями и формировать общий критерий качества при решении задач многокритериальной оптимизации.

На основе системы показателей качества построена функция механического состояния шагающей машины, позволяющая находить оптимальные законы управления методами вариационного исчисления.

Разработаны теоретико-механические модели шагающих машин, реализованные в виде программно-алгоритмических комплексов, позволяющие осуществлять расчёт динамики движения машин, вычислять

показатели качества, осуществлять оптимизацию структуры, параметров и алгоритмов управления.

Разработаны методы многокритериальной оптимизации параметров, структуры и алгоритмов управления движением шагающих машин со сдвоенными шагающими двигателями, позволяющие определять структуру и параметры шагающей машины и разрабатывать алгоритмы управления её движением на этапе проектирования и эксплуатации.

Разработаны методы повышения эффективности шагающих аппаратов на основе целенаправленного изменения структуры и параметров, позволяющие улучшать показатели качества машины.

Разработанные методы использовались при разработке и управлении лабораторными образцами шагающих машин «Восьминог», «Восьминог М», «Ортоног».

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

***Монографии***

1. Основы расчета и проектирования шагающих машин с цикловыми двигателями: монография / Е.С. Брискин, В.В. Жога, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**; под ред. Е.С.Брискина; ВолгГТУ. - М.: Машиностроение-1, 2006. - 163 с.
2. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми двигателями: монография / Е.С. Брискин, В.В. Жога, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**; под ред. Е.С. Брискина. - М.: Машиностроение, 2009. - 191 с.

***Статьи в периодических изданиях по перечню ВАК***

3. Чернышев, В.В. Многофункциональный механизм поворота для транспортно - технологических шагающих машин / В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов** // Изв. вуз. Машиностроение. - 2001. - N 1. - С. 48-52.
4. Мобильный робототехнический комплекс на базе многоопорной шагающей машины: динамика движений / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**, А.В. Тельдеков // Мехатроника: Механика. Автоматика. Электроника. Информатика. - 2001. - N3. - С. 19-27.
5. Шагающая машина "Восьминог" / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**, В.В. Жога, Н.Г. Шаронов, К.В. Шаров, Н.Е. Фролова, Д.Н. Покровский // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2004. - №5. - С. 48-49.
6. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч.1. Концепция проектирования / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, В.В. Жога, **А.В. Малолетов**, Н.Г. Шаронов, Н.Е. Фролова // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2005. - №5. - С. 22-27.
7. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч.2. Динамика движения шагающих машин серии "Восьминог" / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, В.В. Жога, **А.В.**

- Малолетов, Н.Г. Шаронов, Н.Е. Фролова // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2005. - №6. - С. 19-26.**
8. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч.3. Алгоритмы управления движением шагающих машин серии "Восьминог" и экспериментальные исследования / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, В.В. Жога, **А.В. Малолетов**, Н.Г. Шаронов, Н.Е. Фролова // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2005. - №7. - С. 13-18.
  9. Курсовая устойчивость шагающей машины "Восьминог" / Е.С. Брискин, В.А. Шурыгин, В.В. Жога, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов** // Информационно - измерительные и управляющие системы. - 2006. - № 1-3. - С. 56-58.
  10. Брискин, Е.С. Об управлении движением шагающей машины с двигателем минимальной мощности / Е.С. Брискин, В.В. Жога, **А.В. Малолетов** // Известия РАН. Механика твёрдого тела. - 2009. - № 6. - С. 21-30.
  11. Еременко, А.В. Микропроцессорная система управления роботизированными манипуляторами / А.В. Еременко, **А.В. Малолетов**, В.Н. Скакунов // Известия ВолгГТУ. Серия "Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь". Вып. 4 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2010. - № 3. - С. 88-94.
  12. Об определении предельно допустимых нагрузок, действующих на ортогонально-поворотные движители / Е.С. Брискин, А.М. Колесов, **А.В. Малолетов**, В.А. Серов // Справочник. Инженерный журнал. - 2010. - № 9. - С. 19-23.
  13. Об управлении движением двуногого робота при помощи маховика / Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**, А.М. Колесов, И.П. Вершинина // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 8 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2010. - № 6. - С. 9-13.
  14. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальная машины / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, В.В. Жога, **А.В. Малолетов** // Тракторы и сельхозмашины. - 2011. - № 9. - С. 27-31.
  15. Малолетов, А.В. О походках реконфигурируемой модульной шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями / **А.В. Малолетов**, Е.С. Брискин, А.М. Колесов // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2012. - № 5. - С. 50-55.
  16. О статически устойчивой походке шагающей машины с тремя сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**, А.М. Колесов, В.А. Серов // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2012. - № 7. - С. 22-27 + рис., 2-я стр. обл.
  17. Выделение и подсчёт избыточных связей при построении моделей в Autodesk Inventor / Рогудеев А.Б., Сомов В.В., Константинов В.М., Пивоваров А.О., **Малолетов А.В.** // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и

- информатики в технических системах". Вып. 19 : межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 24 (127). - С. 74-79.
18. Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Брискин Е.С., Калинин Я.В., **Малолетов А.В.**, Чернышев В.В. // Известия РАН. Механика твёрдого тела. - 2014. - № 1. - С. 18-25.
19. Брискин, Е.С. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Брискин Е.С., Вершинина И.П., **Малолетов А.В.**, Шаронов Н.Г. // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. - 2014. - № 3. - С. 168.
20. **Малолетов, А.В.** Управление цикловым шагающим движителем на основе шарнирного четырёхзвенника с изменяемой длиной коромысла / Малолетов А.В., Брискин Е.С. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 21 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - № 12 (139). - С. 163-169.

#### *Статьи и доклады в российских изданиях*

21. Кондаков, В.Д. Способ снижения суммарной мощности исполнительных двигателей двуногих шагающих роботов / В.Д. Кондаков, **А.В. Малолетов**, М.И. Шаров // Новые технологии управления робототехническими и автотранспортными объектами: Труды Всерос. науч.-техн. конф., Ставрополь, 27-29.11.97 г. / Ставроп. гос. техн. ун-т. - Ставрополь, 1998. - С. 202-204.
22. **Малолетов, А.В.** Научная программная система "двуногий шагающий робот антропоморфного типа" / А.В. Малолетов, М.И. Шаров, В.Д. Кондаков // 4 межвузовская конференция студентов и молодых ученых Волгограда и Волгоградской области, Волгоград, 8-11 дек. 1998 г.: Тезисы докл. / ВолгГТУ и др.. - Волгоград, 1999. - С. 63-64.
23. О выборе рациональных параметров шестизвенного механизма шагания / Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**, В.В. Чернышев, С.В. Шерстобитов // Наземные транспортные системы: Межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. - Волгоград, 1999. - С. 95-99.
24. Кузнецов, С.А. О плоском движении восьминой статически устойчивой шагающей машины / С.А. Кузнецов, **А.В. Малолетов** // Прогресс транспортных средств и систем: Матер. междунар. науч.-практ. конф., 7-10 сент. 1999 г. / ВолгГТУ и др. - Волгоград, 1999. - Часть II. - С. 150-152.
25. Об энергетической эффективности, маневренности, вибронегруженности и управлении шагающими машинами грунтовой проходимости / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, С.В. Шерстобитов, **А.В. Малолетов**, А.В. Тельдеков, М.Г. Демидов // Мобильные роботы и мехатронные системы: Докл. науч. школы-конф.(с междунар.участ.), 7-8 дек. 1999 г. / МГУ и др.. - М., 1999. - С. 89-108.

26. **Малолетов, А.В.** Исследование и проектирование одностепенных движителей для шагающей машины грунтовой проходимости / А.В. Малолетов, Е.С. Брискин // Тез. докл. юбилейного смотра-конкурса науч., конструктор. и технолог. работ студентов ВолгГТУ, Волгоград, 15-17 мая 2000г. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2000. - С. 69-71.
27. **Малолетов, А.В.** О применении объектно-ориентированного подхода к исследованию шагающих машин / А.В. Малолетов, Е.С. Брискин // Тез. докл. юбил. смотра-конкурса науч., конструкторских и технологических работ студ. ВолгГТУ, Волгоград, 15-17 мая 2000г. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2000. - С. 101-103.
28. О проблемах проектирования шагающих машин грунтовой проходимости / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, С.В. Шерстобитов, **А.В. Малолетов** // Проблемы механики современных машин: Матер. междунар. конф. / Вост.-Сибир. гос. технол. ун-т и др.. - Улан-Удэ, 2000. - С. 206-211.
29. Брискин, Е.С. Об изменении траектории и закона движения опорной точки механизма шагания / Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**, С.В. Шерстобитов // Наземные транспортные системы: Межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2000. - С. 44-48.
30. Опыт практического использования транспортно - технологических шагающих машин / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, С.В. Шерстобитов, **А.В. Малолетов**, А.С. Набатов // Региональные проблемы энергосбережения и пути их решения: Тез. докл. IV Всерос. конф. и семинара РФФИ, 24-25 окт. 2000 г. - Нижний Новгород, 2000. - С. 91-93.
31. Особенности управления и стабилизации положения корпуса многоногих статистически устойчивых шагающих машин / В.В. Чернышев, Е.С. Брискин, В.М. Буданов, Е.А. Девянин, В.В. Жога, **А.В. Малолетов**, А.В. Тельдеков, С.В. Шерстобитов, А.Г. Дудкин // Мобильные роботы и мехатронные системы: Мат. науч. шк.-конф., Москва, 5-6 дек. 2000 г. / Под ред. Формальского А.М., Буданова В.М.; МГУ. - М., 2000. - С. 256-273.
32. Исследование динамики движения многоногих шагающих роботов / Е.С. Брискин, В.В. Жога, В.Ф. Каблов, **А.В. Малолетов**, В.В. Чернышев // Восьмой Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, Пермь, 23-29 авг. 2001 г.: Аннотации докладов / Перм. гос. техн. ун-т и др.. - Пермь, 2001. - С. 122.
33. **Малолетов, А.В.** Исследование динамики плоского движения шагающих машин / А.В. Малолетов, Е.С. Брискин, В.В. Чернышев // V региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, Волгоград, 21-24 нояб. 2000 г.: Тез. докл. / ВолгГТУ и др.. - Волгоград, 2001. - С. 63-64.
34. Брискин, Е.С. О выборе рациональных алгоритмов управления движением шагающих машин / Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**, А.Ю. Савин // Интеллектуальные робототехнические системы (ИРС-2001):

- Матер. науч. молод. школы, 1-6.10.01, пос.Дивноморское, Геленджик / Таганрог. гос. радиотехнич. ун-т и др. - Таганрог, 2001. - С. 32-38.
35. О повороте шагающих машин с двигателями на основе цикловых механизмов шагания / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**, А.В. Тельдеков, В.В. Жога // Мобильные роботы и мехатронные системы: Материалы научной школы - конференции, г.Москва, 3-4 декабря 2001 г. / Ин-т механики Московского гос. ун-та. - М., 2001. - С. 152-163.
36. Брискин, Е.С. Динамика бортового поворота шагающей машины с двигателями на основе цикловых механизмов / Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов** // Прогресс транспортных средств и систем - 2002: Матер. междунар. науч.-практич. конф., Волгоград, 8-11 октября 2002 г. / ВолгГТУ и др. - Волгоград, 2002. - Часть 2. - С. 285-287.
37. Разработка шагающего двигателя для транспортных машин высокой маневренности и проходимости / Е.С. Брискин, В.В. Жога, В.В. Чернышев, А.Е. Русаковский, **А.В. Малолетов**, С.А. Ермаков, А.М. Селиванов, В.И. Карев // Отчетная конф.-выставка по подпрограмме "Транспорт" науч.-техн. программы Мин.образ. РФ "Науч. исслед. высшей школы ...": Тез. докл., 11-13 февр. 2002 г., Москва - Звенигород / Московский гос. авиационный ин-т (Технический ун-т). - М.; Звенигород, 2002. - С. 237-239.
38. Чернышев, В.В. Разработка шагающего робототехнического комплекса для ликвидации последствий аварийного разлива нефти в труднопроходимой местности / В.В. Чернышев, Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов** // Экология. Наука, образование, воспитание: Сборник науч. тр. / Брянск. гос. инж.- технологич. академия и др. - Брянск, 2002. - Выпуск 3. - С. 72-74.
39. Стратегия управления коллективом робототехнических объектов / **А.В. Малолетов**, Р.В. Лещенко, К.Ю. Лепетухин, Е.В. Ветошкина // Искусственный интеллект - 2002: Матер. Междунар. науч.-техн. конф., п.Кацивели (Крым, Украина), 16-20 сентября 2002 г. / Таганрогский гос. радиотехнический ун-т и др. - Таганрог; Донецк, 2002. - Том 2. - С. 253-256.
40. Теоретические и экспериментальные исследования управляемого движения шагающих машин / Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**, А.Е. Русаковский, В.В. Чернышев // Российская наука: дорога жизни: Сборник научно - популярных статей / Рос. фонд фундаментальных исследований. - М., 2002. - С. 27-34.
41. **Малолетов, А.В.** Интеллектуализация программно - алгоритмического обеспечения шагающего робототехнического комплекса / А.В. Малолетов // Экстремальная робототехника. ЭР - 2003: Матер. Второй научной молодежной школы, пос.Дивноморское (Россия), 22-27.09.2003 / Таганрог. гос. радиотехн. ун-т и др. - Таганрог, 2003. - С. 27-29.
42. Брискин, Е.С. О концепции проектирования шагающих машин / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов** // Проблемы механики



- современных машин: Материалы второй международной конференции / Восточно-Сибирский гос. технологич. ун-т и др. - Улан-Удэ, 2003. - Том 3. - С. 25-28.
43. Повышение профильной проходимости и адаптивности шагающих машин с движителями на базе цикловых механизмов / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, В.В. Жога, **А.В. Малолетов**, А.Ю. Савин // Экстремальная робототехника: Матер. XIII науч.-техн. конф. / Санкт-Петерб. гос. политехнич. ун-т и др. - СПб., 2003. - С. 125-132.
  44. Брискин, Е.С. Алгоритмы управления движением шагающей машины при преодолении препятствий / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов** // Экстремальная робототехника: матер. XIV науч.-техн. конф. / СПбГПУ, ЦНИИ РТК. - СПб, 2004. - С. 191-196.
  45. Брискин, Е.С. Динамика группы шагающих машин при совместном выполнении транспортных операций / Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**, Н.Г. Шаронов // Проблемы динамики и прочности исполнительных механизмов и машин: Тез. докл. II научной конф., Астрахань, 7-10 сент. 2004 г. / Астрахан. гос. техн. ун-т и др. - Астрахань, 2004. - С. 40-41.
  46. Брискин, Е.С. Динамика и согласованное управление группой мобильных шагающих машин при совместном выполнении транспортных операций / Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**, Н.Г. Шаронов // Мехатроника, автоматизация, управление: Труды I Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ., Владимир, 28-30 июня 2004 / Владимир. гос. ун-т. - М., 2004. - С. 224-227.
  47. Исследование механизма преодоления локальных препятствий мобильными робототехническими системами с шагающими движителями / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**, К.В. Шаров, Н.Г. Шаронов // Мобильные роботы и мехатронные системы: Материалы научной школы - конференции, Москва, 17-18 ноября 2003 г. / МГУ им. М.В.Ломоносова, Ин-т механики. - М., 2004. - С. 167-179.
  48. Экспериментальные исследования механизма взаимодействия шагающего движителя с локальными препятствиями / В.В. Чернышев, К.В. Шаров, Н.Г. Шаронов, **А.В. Малолетов** // Поволжский экологический вестник: [Сб. статей] / Волгогр. отд-ние Рос. экол. академии. - Волгоград, 2004. - Вып.10. - С. 127-132.
  49. **Малолетов, А.В.** Динамика движения шагающей машины в условиях недостаточного сцепления / А.В. Малолетов // Прогресс транспортных средств и систем - 2005: матер. междунар. науч.-практ. конф. (20-23 сентября 2005 г.) / ВолгГТУ и др. - Волгоград, 2005. - Ч.2. - С. 617-618.
  50. Концепция проектирования шагающих машин / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, В.В. Жога, **А.В. Малолетов**, Н.Г. Шаронов, Н.Е. Фролова // Наука - производству. - 2005. - №1. - С. 33-38.
  51. **Малолетов, А.В.** Моделирование динамики и системы управления группы робототехнических объектов / А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов // Международная конференция по теории механизмов и механике машин, посвящ. 100-летию со дня рожд. акад. И.И.Артоболевского: сб. докл., 9-

- 16 октября 2006 г. / Кубанский гос. технол. ун-т и др. - Краснодар, 2006. - С. 153.
52. Брискин, Е.С. Модульный транспортный комплекс на основе шагающей машины "Восьминог" / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов, **А.В. Малолетов** // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Экстремальная робототехника: тр. Девятой Всерос. науч.-практ. конф., 3-6 апр. 2006 г. / Рос. акад. ракетных и артиллерийских наук, НПО спец. матер. - СПб., 2006. - Т.5. - С. 236-244.
53. Автоматизированная информационно-поисковая система "Методы теоретической механики" / Е.С. Брискин, И.П. Вершинина, В.В. Жога, **А.В. Малолетов**, А.В. Петрухин // Инновации в науке и образовании : телеграф отраслевого фонда алгоритмов и программ : [газета].-2007.- № 11.- С.17.
54. Выбор алгоритма управления автономным движением шагающей машины с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, В.В. Жога, **А.В. Малолетов**, Д.Н. Покровский, Н.Г. Шаронов, В.А. Шурыгин // Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ 2007): матер. междунар. н.-т. конф., Дивноморское, Россия, 24-29 сент. 2007: в рамках междунар. науч.-техн. мультikonференции ИКТМ-2007 / Ин-т машиновед. им. А.А. Благонравова РАН [и др.]. - Таганрог; М., 2007. - С. 44-48.
55. Брискин, Е.С. Динамика управляемого движения шагающей машины "Восьминог М" / Е.С. Брискин, В.В. Жога, **А.В. Малолетов** // Проблемы динамики и прочности исполнительных механизмов и машин: тез. докл. III науч. конф., Астрахань, 10-16 сент. 2007 г. / Астрахан. гос. техн. ун-т [и др.]. - Астрахань, 2007. - С. 14-15.
56. Мысливый, О.А. Нейронная сеть для управления движением механических объектов / О.А. Мысливый, **А.В. Малолетов** // XI Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г.Волгоград, 8-10 ноября 2006 г.: тез. докл. / ВолгГТУ и др. - Волгоград, 2007. - С. 229-230.
57. **Малолетов, А.В.** Основы расчёта и проектирования шагающих машин с цикловыми движителями: курс лекций: учеб. пособие / А.В. Малолетов, Н.Е. Фролова; ВолгГТУ. - Волгоград, 2007. - 166 с.
58. Шагающие машины ВолгГТУ (опыт разработки, результаты исследований, практическое применение) / Е.С. Брискин, В.В. Жога, **А.В. Малолетов**, В.В. Чернышев // Мехатроника и робототехника: тез. докл. междунар. науч.-техн. выставки-конгресса, Санкт-Петербург, 2-5 октября 2007 г. / ОАО "Ленэкспо" [и др.]. - СПб., 2007. - С. 99-101.
59. Колесов, А.М. Двухногий шагающий робот с динамической стабилизацией / А.М. Колесов, **А.В. Малолетов** // XII региональная конференция молодых исследователей Волгогр. обл., г. Волгоград, 13-16 нояб. 2007 г.: тез. докл. / ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2008. - С. 117-118.

60. Динамика и управление шагающими роботами / А.В. Леонард, А.М. Колесов, Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов** // XIII региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г.Волгоград, 11-14 нояб. 2008 г.: тез. докл. / ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2009. - С. 105-109.
61. **Малолетов, А.В.** Динамическая модель шагающей машины с ортогональными движителями / А.В. Малолетов // Прогресс транспортных средств и систем - 2009: матер. междунар. н.-пр. конф., Волгоград, 13-15 окт. 2009 г.: в 2 ч. Ч. 2 / ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2009. - С. 184.
62. О программном движении сдвоенных ортогонально-поворотных движителей шагающих машин / Е.С. Брискин, Н.В. Умнов, В.В. Жога, **А.В. Малолетов**, Н.Г. Шаронов // Экстремальная робототехника. Нано-, микро- и макророботы (ЭР-2009), (28 сент.- 3 окт. 2009, Дивноморское): матер. XX междунар. науч.-техн. конф. / Юж. Федеральный ун-т [и др.]. - Таганрог ; СПб., 2009. - С. 265-267.
63. Алгоритмы управления сдвоенными ортогональными шагающими движителями при преодолении типовых препятствий / Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**, В.А. Серов, Н.Г. Шаронов // Матер. 7-й науч.-техн. конф. "Мехатроника, автоматизация, управление" (МАУ-2010), проводимой в рамках 3-й мультikonф. по проблемам управления (МКПУ-2010), 12-14 окт. 2010 г. / Гос. науч. центр РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ Электроприбор" [и др.]. - СПб., 2010. - С. 91-94.
64. Об управлении дождевальными машинами с шагающими движителями / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**, В.А. Серов, Н.Г. Шаронов // Робототехника. Взгляд в будущее : тр. междунар. науч.-техн. семинара (Санкт-Петербург, 10-11 марта 2010 г.) / С.-Петерб. гос. политехн. ун-т [и др.]. - СПб., 2010. - С. 202-205.
65. Брискин, Е.С. Об энергетически эффективных механизмах мобильных роботов / Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**, Я.В. Калинин // Экстремальная робототехника : тр. междунар. конф. с элементами науч. школы для молодёжи, 12-14 окт. 2010 г. / С.-Петерб. гос. политехн. ун-т, ЦНИИ робототехники и техн. кибернетики. - СПб., 2010. - С. 214-217.
66. Обеспечение заданных режимов перемещения шагающих движителей / А.В. Леонард, А.М. Колесов, Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов** // XIV региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области (Волгоград, 10-13 нояб. 2009 г.) : тез. докл. / ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2010. - С. 77-81.
67. Брискин, Е.С. Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки / Е.С. Брискин, А.В. Леонард, **А.В. Малолетов** // Теория механизмов и машин. - 2011. - Т. 9, № 1. - С. 14-24.
68. Энергетически эффективные движители шагающих машин / Е.С. Брискин, Я.В. Калинин, **А.В. Малолетов**, В.В. Чернышев // Четвёртая Всероссийская мультikonференция по проблемам управления. МКПУ-

- 2011 (с. Дивноморское, Геленджик, 3-8 окт. 2011 г.) : матер. / Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, НИИ многопроцессорных вычислит. систем им. проф. А.В. Каляева ЮФУ [и др.]. - М. ; Таганрог, 2011. - Т. 2. - С. 179-181.
69. Калинин, Я.В. Методы повышения энергетической эффективности шагающих машин с цикловыми движителями / Я.В. Калинин, **А.В. Малолетов**, С.А. Устинов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ–25 : сб. тр. XXV междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 3. Секция 5 (г. Волгоград, 29-31 мая 2012 г.) / ВолгГТУ [и др.]. - Саратов, 2012. - С. 174-175.
70. Моделирование движения шагающей машины со сдвоенным ортогонально-поворотным движителем / Н.Г. Шаронов, Я.В. Калинин, **А.В. Малолетов**, К.Б. Мироненко // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ–25 : сб. тр. XXV междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 3. Секция 5 (г. Волгоград, 29-31 мая 2012 г.) / ВолгГТУ [и др.]. - Саратов, 2012. - С. 151-153.
71. Об управлении поворотом шагающих машин со сдвоенными движителями [Электронный ресурс] / Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**, Н.Г. Шаронов, А.В. Леонард, К.Б. Мироненко // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах – УТЭОСС-2012 : матер. конф. (Санкт-Петербург, 9-11 окт. 2012 г.) : в рамках 5-й рос. мультikonф. по пробл. управления / ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор" [и др.]. - СПб., 2012. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - С. 698-701.
72. Проблемы разработки шагающих машин [Электронный ресурс] / Е.С. Брискин, В.Е. Павловский, В.А. Шурыгин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**, В.А. Серов // Экстремальная робототехника : сб. докл. всерос. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 25-26 сент. 2012 г. / ЦНИИ робототехники и техн. кибернетики, С.-Петерб. гос. политехн. ун-т. - СПб., 2012. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - С. 43-50.
73. Основы расчёта и проектирования шагающих машин с цикловыми движителями : учеб. пособие / Шурыгин В.А., Калинин Я.В., **Малолетов А.В.**, Шаронов Н.Г.; ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - 108 с.
74. Брискин, Е.С. О задачах управления движением многоопорных роботов со сдвоенными поворотными шагающими движителями / Брискин Е.С., Шаронов Н.Г., **Малолетов А.В.** // Прогресс транспортных средств и систем – 2013 : матер. междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 24-26 сент. 2014 г. / ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2013. - С. 321.
75. Отработка методов удалённого управления движением шагающего робота «Ортоног» / Брискин Е.С., Чернышев В.В., **Малолетов А.В.**, Шаронов Н.Г., Серов В.А., Мироненко К.Б., Устинов С.А. // Электротехнические системы и комплексы : [ежегодник / МГТУ им. Г.И. Носова]. - Магнитогорск, 2013. - № 21. - С. 153-160.
76. Брискин, Е.С. Системный анализ колёсных, гусеничных и шагающих машин / Брискин Е.С., Шурыгин В.А., **Малолетов А.В.** // Прогресс

транспортных средств и систем – 2013 : матер. междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 24-26 сент. 2014 г. / ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2013. - С. 322.

77. **Малолетов, А.В.** Управление шагающей машиной с ортогонально-поворотными движителями при обходе препятствий / Малолетов А.В. // Прогресс транспортных средств и систем – 2013 : матер. междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 24-26 сент. 2014 г. / ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2013. - С. 323.
78. Comparative analysis of wheeled and walking machines / Брискин Е.С., Чернышев В.В., **Малолетов А.В.**, Шаронов Н.Г. // Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды (7th IARP RISE-ER`2013) : тр. 7-го междунар. симпозиума, Санкт-Петербург, 2-3 окт. 2013 г. / РФФИ, ЦНИИ робототехники и технической кибернетики. - СПб., 2013. - С. 99-107. - Англ.
79. Обработка методов удалённого управления движением шагающего робота «Ортоног» / Брискин Е.С., Чернышев В.В., **Малолетов А.В.**, Шаронов Н.Г., Серов В.А., Мироненко К.Б., Устинов С.А. // Электротехнические системы и комплексы : [ежегодник / МГТУ им. Г.И. Носова]. - Магнитогорск, 2013. - № 21. - С. 153-160.
80. Сравнительный анализ колёсных, гусеничных и шагающих машин / Брискин Е.С., Чернышев В.В., **Малолетов А.В.**, Шаронов Н.Г. // Робототехника и техническая кибернетика. - 2013. - № 1. - С. 6-14.
81. Построение алгоритмов движения шагающего робота / Брискин Е.С., Калинин Я.В., **Малолетов А.В.**, Шаронов Н.Г. // Экстремальная робототехника : тр. междунар. науч.-техн. конф. (г. Санкт-Петербург, 1-2 окт. 2014 г.) / ЦНИИ робототехники и технической кибернетики. - СПб., 2014. - С. 293-297.

#### *Статьи и доклады в иностранных изданиях*

82. On Dynamics of Movement of Walking Machines with Gears on the Basis of Cycle Mechanisms / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**, С.В. Шерстобитов // Theory and Practice of Robots and Manipulators. ROMANSY 13: Proc. of the 13-th CISM-IFTOMM Symposium / International Centre for Mechanical Sciences. - Wien; New York, 2000. - С. 313-322.- Англ.
83. On dynamics of movement of walking machines with gears made on the basis of cycle mechanism of walking / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**, С.В. Шерстобитов // Thirteenth CISM - IFTOMM Symposium on the Theory and Practice of Robots and Manipulators =Ro. Man. Sy 2000: Book of Abstracts, July 3-6, 2000. - Zakopane, Poland, 2000. - С. 38.
84. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**, С.В. Шерстобитов, Г.Г. Григорян, А.Г. Савин // Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proceedins of the Fourth International Conference, 24-26th September 2001. - London, 2001. - С. 1005-1012.-Англ.

85. Брискин, Е.С. О выборе рациональных алгоритмов управления движением шагающих машин / Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**, А.Ю. Савин // Искусственный интеллект. - 2001. - №3. - С. 593-598.
86. On the Turn of Walking Machines with Moving Propellers Made on the Basis of Cycled Mechanisms / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**, А.В. Тельдеков, В.В. Жога // Theory and Practice of Robots and Manipulators. ROMANSY 14: Proc. of the 14-th CISM-IFTOMM Symposium / International Centre for Mecanical Sciences. - Wien; New York, 2002. - С.423-430. - Англ..
87. The control of compound eight-legged walking machine movement wiht the individual drives / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**, А.Ю. Савин, А.В. Тельдеков, В.В. Жога // Climbing and Walking Robots and their Supporting Technologies. CLAWAR 2002: Proc. of the Fifth Int. Conf., Paris, 25-27 September 2002 / Inst. of Mechanical Engineers etc. - London (UK), 2002. - С. 487-493.- Англ.
88. Моделирование стратегии управления группой робототехнических объектов / **А.В. Малолетов**, Р.В. Лещенко, К.Ю. Лепетухин, Е.В. Ветошкина // Искусственный интеллект (Украина). - 2002. - №4. - С. 574-579.
89. Брискин, Е.С. On conception of walking machines designing / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов** // Proceeding of the 11th International Conference on Advanced Robotics 2003 (ICAR 2003), Coimbra, Portugal, June 30 - July 3, 2003 / Univ. of Coimbra [etc.]. - Coimbra (Portugal), 2003. - Vol. 3. - P. 1763-1768. - Англ.
90. Брискин, Е.С. Power efficiency and control algorithms of walking machine with cycle propellers / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов** // Climbing and Walking Robots and their Supporting Technologies for Mobile Machines. CLAWAR 2003 : proc. of the Sixth Int. Conf., Catania (Italy), 17-19 September 2003 / Univ. of Catania [etc.]. - [UK], 2003. - С. 861-870. - Англ.
91. Выбор алгоритма управления автономным движением шагающей машины с цикловыми двигателями / Е.С. Брискин, В.В. Жога, **А.В. Малолетов**, Д.Н. Покровский, Н.Г. Шаронов, В.А. Шурыгин // Искусственный интеллект. - 2007. - №3. - С. 357-366.
92. The Investigation of Walking Machines with Movers on the Basis of Cycle Mechanisms of Walking / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**, В.В. Жога // The 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (Changchun, Jilin, August 9-12, 2009) : conf. proceedings.- [China], 2009.- P. 3631-3636.- Англ.
93. Брискин, Е.С. Control of motion of a legged locomotion machine with minimal-power motor / Е.С. Брискин, В.В. Жога, **А.В. Малолетов** // Mechanics of Solids. - 2009. - Vol. 44, № 6. - С. 828-836.- Англ.
94. Walking machines (elements of theory, experience of elaboration, application) / Е.С. Брискин, В.В. Жога, В.В. Чернышев, **А.В. Малолетов**, Я.В. Калинин, Н.Г. Шаронов // Emerging Trends in Mobile Robotics : proc.

- of the 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, 31 Aug.- 3 Sept. 2010 / Nagoya Inst. of Technology, Japan.- [Nagoya, Japan], 2010.- P. 769-776.- Англ.
95. Modeling of the Dynamics of the Walking Machine with the Cyclic Propulsors as System Solids with Elastic and Damping Relations / Чернышев В.В., Брискин Е.С., Жога В.В., **Малолетов А.В.**, Шаронов Н.Г. // The 3rd Joint International Conference on Multibody System Dynamics. The 7th Asian Conference on Multibody Dynamics, Busan, Korea, June 30 – July 3, 2014 : book of abstracts / The Korean Society of Mechanical Engineers (KSME). – Busan (Korea), 2014. – P. 447-448.
  96. Modeling of the Dynamics of the Walking Machine with the Cyclic Propulsors as System Solids with Elastic and Damping Relations [Электронный ресурс] / Чернышев В.В., Брискин Е.С., Жога В.В., **Малолетов А.В.**, Шаронов Н.Г. // The 3rd Joint International Conference on Multibody System Dynamics. The 7th Asian Conference on Multibody Dynamics, Busan, Korea, June 30 – July 3, 2014 / Busan Exhibition and Convention Center (BEXCO). – Busan (Korea), 2014. – 9 p. (pdf). – Режим доступа : <http://imsd-acmd2014.ksme.or.kr/>.
  97. On the control of motion of a walking machine with twin orthogonal rotatory movers / Брискин Е.С., Вершинина И.П., **Малолетов А.В.**, Шаронов Н.Г. // Journal of Computer and Systems Sciences International. - 2014. - Vol. 53, Issue 3 (May). - С. 464-471.
  98. On the energy efficiency of cyclic mechanisms / Брискин Е.С., Калинин Я.В., **Малолетов А.В.**, Чернышев В.В. // Mechanics of Solids. - 2014. - Vol. 49, No. 1. - С. 11-17.
  99. Problems of Increasing Efficiency and Experience of Walking Machines Elaborating / Брискин Е.С., Шурыгин В.А., Чернышев В.В., **Малолетов А.В.**, Шаронов Н.Г., Калинин Я.В., Леонард А.В., Серов В.А., Мироненко К.Б., Устинов С.А. // Advances on theory and practice of robots and manipulators : proceedings of ROMANSY 2014 XX CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (Moscow, 23-26 June 2014) / ed. by Marco Ceccarelli, V.A. Glazunov ; Bauman Moscow State Technical University [etc.]. – [Switzerland] : Springer International Publishing, 2014. – P. 383-390. – (Mechanisms and Machine Science ; Vol. 22).
- Патенты РФ и свидетельства о регистрации программ***
100. Пат. 2171194 РФ, МПК 7 В 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных транспортно - погрузочных средств повышенной проходимости / В.В. Чернышев, Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**; ВолгГТУ. - 2001.
  101. Пат. 2174085 РФ, МПК 7 В 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / В.В. Чернышев, Е.С. Брискин, **А.В. Малолетов**; ВолгГТУ. - 2001.
  102. Свидетельство № 9462 об отраслевой регистрации разработки "Автоматизированная информационно-поисковая система "Методы

