

На правах рукописи

Алисейчик Антон Павлович

**МЕХАНИКА И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ
АВТОНОМНОГО МНОГОКОЛЕСНОГО АППАРАТА**

01.02.01 — теоретическая механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва — 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор
Павловский Владимир Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор
Ледовский Анатолий Дмитриевич
Балтийский государственный технический
университет имени Д.Ф. Устинова
заведующий кафедрой «Мехатроника и
робототехника»

кандидат физико-математических наук
Буданов Владимир Михайлович
Институт механики МГУ
им. М.В. Ломоносова
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Волгоградский государственный технический
университет

Защита состоится «__» октября 2013 г. в __-- часов на заседании диссертационного совета Д 002.024.01 при ИПМ им. М.В.Келдыша РАН по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМ им. М.В. Келдыша Российской академии наук.

Автореферат разослан «__» сентября 2013 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

д. ф.-м. н.



Полилова Татьяна Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время российские и иностранные разработчики уделяют большое внимание исследованию аппаратов с повышенной проходимостью. Во всем мире в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства, для исследования космоса, мирового океана и других труднодоступных областей ведутся разработки подобных аппаратов для реализации задач, с которыми не справляются существующие мобильные экипажи. Задача эта имеет несколько аспектов. С одной стороны крайне важно двигаться по поверхности с большой скоростью, с другой — аппарат не должен испытывать существенных перегрузок и ударов. Для того, чтобы аппарат надежно управлялся, необходим устойчивый и непрерывный контакт с поверхностью. Аппарат должен быть пригоден для транспортировки. Кроме того, аппарат (с характерными размерами порядка метра) должен преодолевать препятствия размеров, сравнимых с собственной высотой, и различной формы. Для увеличения быстродействия система управления должна принимать решения об изменении курса или способа перемещения во время движения в реальном времени.

Отмеченные факторы делают актуальной цель работы — создание и исследование системы управления и динамических моделей автономного адаптивного и маневренного многоколесного аппарата высотой порядка полуметра, способного быстро перемещаться по неподготовленной поверхности и преодолевать препятствия с размерами, сравнимыми с собственными.

Объект исследования

Основными объектами исследования являются: прототип аппарата, его компьютерные модели, а также вспомогательные и упрощенные субмодели.

Предмет исследования

Исследуется механика, динамика движения и синтез управления многоколесного мобильного робота с пассивной и активной подвеской.

Цель работы и Задачи

Цель состоит в разработке модели прототипа автономного шестиколесного аппарата (робота), способного преодолевать большие препятствия и

передвигаться по поверхности с макро- и микронеровностями со скоростью, большей по сравнению с существующими мобильными роверами (оцениваемой в 12 км/ч).

Задачи заключаются в выявлении закономерностей движения, анализе динамических особенностей, определении конструктивных параметров и синтезе рациональной системы управления. Выделяются следующие подзадачи:

1. Определение характеристик комфортабельности движения и нахождение их зависимости от геометрических и массово-инерционных параметров шасси для проектирования последнего «под задачу».
2. Формулировка рекомендаций по выбору параметров подвески и геометрических, массово-инерционных характеристик аппарата.
3. Построение алгоритмов распознавания препятствия и синтеза управления аппаратом с активной подвеской.

Методы исследования

Поставленные задачи решаются с применением методов теоретической механики, теории робототехнических систем, вычислительной математики и систем управления, компьютерного моделирования и распознавания образов.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту

Разработана концепция нового типа активной подвески, которая может быть успешно использована в качестве пассивной или полуактивной для малогабаритных мобильных роботов. Разработана модель и исследован прототип легкого маневренного аппарата, решающего поставленные задачи. Для него синтезировано управление для преодоления препятствий размеров, сравнимых с размерами аппарата, и приведена методика оптимизации параметров подвески. Разработан обучающий алгоритм для преодоления препятствий. Предложена система управления, принимающая решения в реальном времени.

Достоверность результатов

Основные научные результаты диссертации получены на основе фундаментальных положений и методов теоретической механики, динамики машин, экспериментальных методов исследования. Теоретические результаты

подтверждены экспериментальными данными и соответствуют теоретическим оценкам.

Практическая ценность

В работе предложена методика построения шасси быстроходных, маневренных аппаратов, способных также преодолевать препятствия размеров, сравнимых с размерами аппарата. Данная методика может быть использована на широком круге мобильных устройств. Система распознавания препятствий и синтеза управления может быть применена в разных отраслях робототехники.

Апробация диссертации

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Международных научно-технических конференциях: Aliseychik A.P., Orlov I.A. Mecanum-Wheel Mathematical Model / III Российско-тайваньский симпозиум «Современные проблемы интеллектуальной мехатроники, механики и управления» 2012

Алисейчик А.П., Павловский В.Е. Исследование динамики движения мобильного робота с меканум-колесами. / Тр. Международной молодежной научно-практической конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы», НИИ механики МГУ, 03-05.10.2011. М.: Изд. МГУ. с. 23-26.

Результаты докладывались на семинарах кафедры теоретической механики и мехатроники МГУ им. М.В. Ломоносова и семинарах Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в рецензируемом научном журнале «Проблемы управления».

Алисейчик А.П., Павловский В.Е. Модель и динамические оценки управляемости и комфортабельности движения многоколесного мобильного робота / Проблемы управления. 2013. №1. С. 70–78.

Алисейчик А.П., Павловский В.Е. Методика исследования динамической комфортабельности движения многоколесного мобильного робота / Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2010. №84. 27 с.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, дана общая характеристика диссертации, показана научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту. Приведен обзор колесных, шагающих и колесно-шагающих аппаратов, предназначенных для решения задач, подобных рассматриваемым в настоящей работе.

Первая глава

Рассматривается модель аппарата (ровера) с пассивной подвеской, приведенная на рис. 1. Исследуется динамика аппарата и определяются характеристики комфортабельности движения. Находятся их зависимости от геометрических и массово-инерционных параметров шасси для проектирования последнего «под задачу».

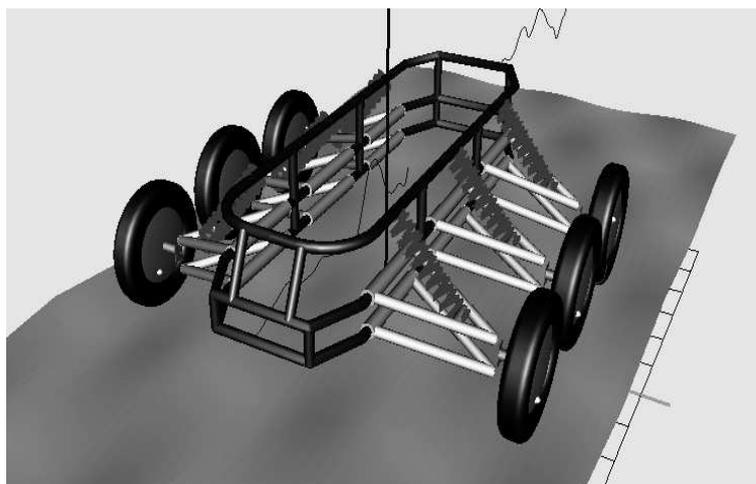


Рис. 1: Модель шестиколесного робота с классической подвеской, построенная в программном комплексе «Универсальный Механизм»

Определяются зависимости следующих характеристик комфортабельности движения от параметров подвески:

1. R_{MS} (считается по формуле: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}$, где N — число точек на графике, \bar{X} — среднее) среднеквадратичное отклонение вертикального ускорения некоторой точки корпуса — общепринятая (ISO 2631) характеристика качества подвески.

2. I_1 (площадь под графиком вертикального ускорения некоторой точки корпуса за модельное время) — характеристика комфортабельности для человека. ГОСТ 31319-2006 «Вибрация. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека».
3. I_2 (площадь под графиком вертикального ускорения некоторой точки корпуса за модельное время, превышающего заданное) — предлагаемая характеристика износа.
4. M_{abs} (максимальное вертикальное ускорение за время движения) — предлагаемая характеристика возможности поломок.

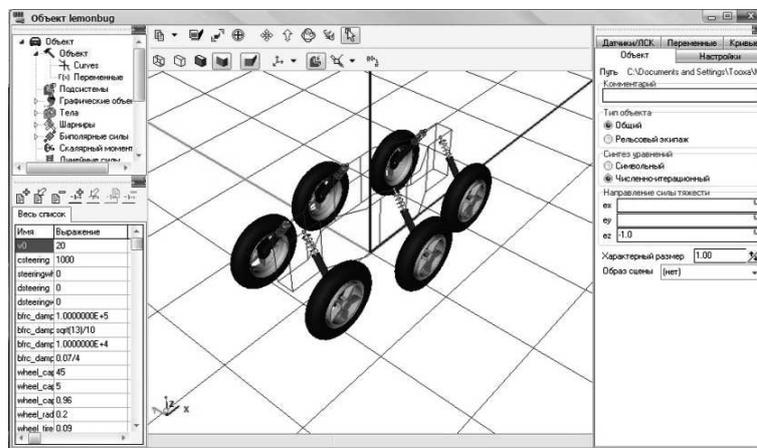


Рис. 2: Вид модели аппарата с оптимизированными характеристиками

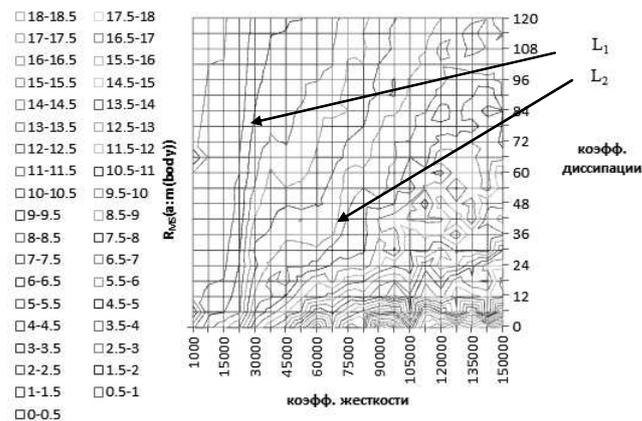


Рис. 3: L_1 — граница зоны безопасности, L_2 — граница зоны «хороших» значений R_{MS} . Функционал $R_{MS}(|a|)$ от коэффициентов жесткости и диссипации

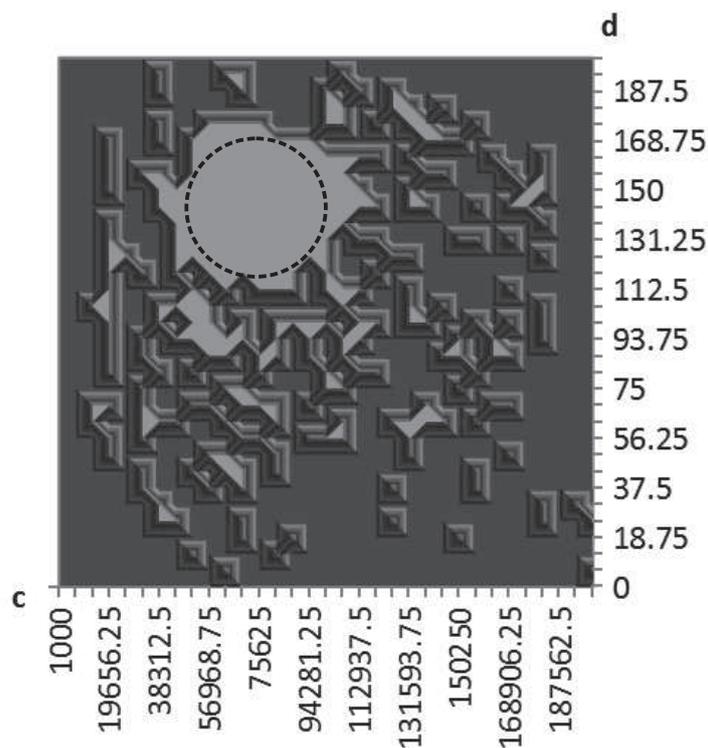


Рис. 4: Область оптимальных параметров подвески для устойчивости на траектории без отрыва от поверхности

Построена модель (рис. 2), имеющая характеристики, приближенные к реальным, и в то же время минимизирующая время проведения каждого эксперимента. Найдена зависимость характеристик комфортабельности движения от параметров подвески.

Для модели двухрычажной подвески разработаны методические приемы, позволяющие оптимизировать процессы интегрирования. Разработана модель блока управления, допускающая движение без поперечного крива по ровной поверхности (поворот на углы, обеспечивающие положение мгновенных центров скоростей колес в одной точке). При этом выбрана модель трения, при которой он возможен на неровной, так как при его отсутствии не действует подвеска.

Для пассивной подвески и активной в пассивном режиме найдены зависимости от параметров подвески характеристик комфортабельности движения.

По полученным диаграммам (рис. 3, рис. 4) можно выбирать динамические характеристики экипажа, позволяющие минимизировать приведенные функционалы вертикального ускорения.

В работе сформулированы следующие рекомендации по выбору геометрических характеристик аппарата с двухрычажной подвеской. Длину ры-

чага (вилки) подвески следует увеличивать, что увеличит ход подвески и уменьшит величину поперечного проскальзывания, неблагоприятно влияющий на управляемость аппарата. Отношение расстояния между управляемыми колесами к расстоянию между передними и средними (средними и задними) следует минимизировать, чтобы уменьшить максимальный угол поворота управляемых колес. Расстояние между средними колесами следует максимизировать для предотвращения переворота экипажа.

Параметры подвески следует выбирать по полученным диаграммам. Например, для робота с массой 75 кг и длиной 95 см, если максимум ускорения не должен превышать 24 м/с^2 , оптимальными коэффициентами подвески будут: коэффициент жесткости — $8 \cdot 10^4 \text{ кг/с}^2$, коэффициент диссипации — 10^2 кг/с .

Также при выборе характеристик подвески можно воспользоваться диаграммой, построенной для разработки конкретной модели, из приведенных выше диаграмм, методом, подобным методу весовых коэффициентов. Назначить вес каждой характеристике комфортабельности, сложить безразмерные функции $\overline{I}_1, \overline{I}_2, \overline{R}_{MS}, \overline{M}_{abs}$, умноженные на соответствующие весовые коэффициенты и выбрать параметры подвески по полученной диаграмме по формуле:

$$H_k = m_1 \overline{I}_1 + m_2 \overline{I}_2 + m_3 \overline{R}_{MS} + m_4 \overline{M}_{abs},$$

где $m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = 1$.

Зависимость вышеупомянутых функционалов качества подвески от скорости близка к квадратичной. На рис. 4 изображена диаграмма индикатора пройденного пути по некоторой траектории со скоростью — 9 м/с. Моделирование дает замкнутую область параметров c (коэффициент жесткости подвески) и d (коэффициент диссипации), в которой аппарат проехал всю траекторию с сохранением управляемости, без отрыва от поверхности.

Вторая глава

Управление описанным в первой главе аппаратом плохо реализуется поворотом передних и задних колес. Кроме того, реализация подобного типа управления существенно увеличивает вес и стоимость аппарата. Реализация поворотов исключительно в режиме проскальзывания неэкономична в смысле потребления энергии и затруднена в случае хорошего сцепления с дорогой. В качестве решения данной проблемы используется колесо специального типа (меканум-колесо, рис. 5), исследованию которого посвящена данная глава.

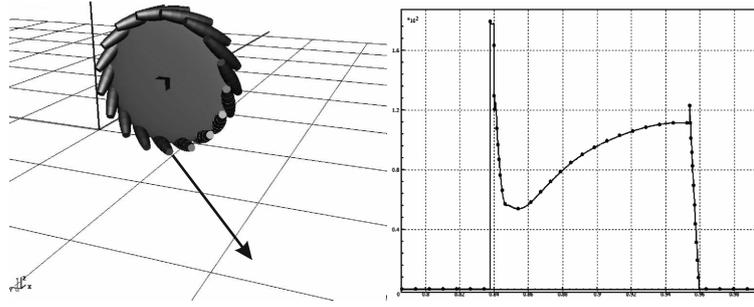


Рис. 5: Проекция контактной силы на плоскость (слева), и зависимость ее модуля от времени (справа)

Разработана компьютерная теоретико-механическая модель механум-колеса, учитывающая форму и инертность роликов, использующая модель вязко-упругого трения. Численно исследованы зависимости характеристик движения колеса от параметров контактных сил и от параметров модели. Найдены геометрические характеристики механум-ролика, необходимые при изготовлении механум-колес, минимизирующие вертикальные колебания точек корпуса во время движения. Показаны зависимости контактной силы от параметров модели. Для нормальной реакции используется линейная вязкоупругая модель, а касательная сила вычисляется в соответствии с моделью сухого трения:

$$N = -(c\Delta z + k\Delta\dot{z})\nu,$$

$$F = \begin{cases} -\frac{fNv}{|v|}, & |v| > v_f, \\ -\frac{fNv}{v_f}, & |v| \leq v_f \end{cases}$$

где ν — нормаль к поверхности, Δz — глубина внедрения, c, k — параметры поверхности, v — скорость проскальзывания, f — коэффициент трения, v_f — достаточно малая величина.

Исследована зависимость (рис. 6) траектории и ускорения колеса от коэффициента трения. Полученные результаты обосновывают поведение построенной модели механум-колеса, что позволяет применять ее в исследовании динамики движения многоколесного робота.

На рис. 6 в каждом из шести окон приведены зависимости $F_x(t)$ — проекции контактной силы средней контактной окружности одного из роликов на ось x от времени при различных коэффициентах трения. Коэффициент трения изменяется в окнах с равным шагом построчно слева направо, от нуля до некоторого порогового значения, после которого зависимость меняется мало.

На кинограмме (рис. 7) представлен пример плоско-параллельного движения корпуса робота по некоторой траектории. Отдельной кривой обозна-

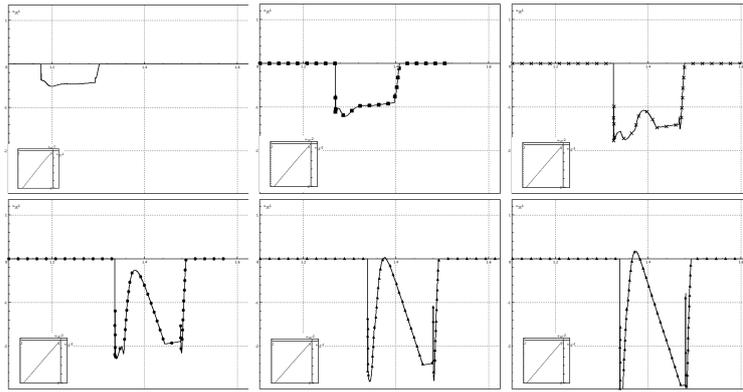


Рис. 6: Зависимость контактной силы от коэффициента трения

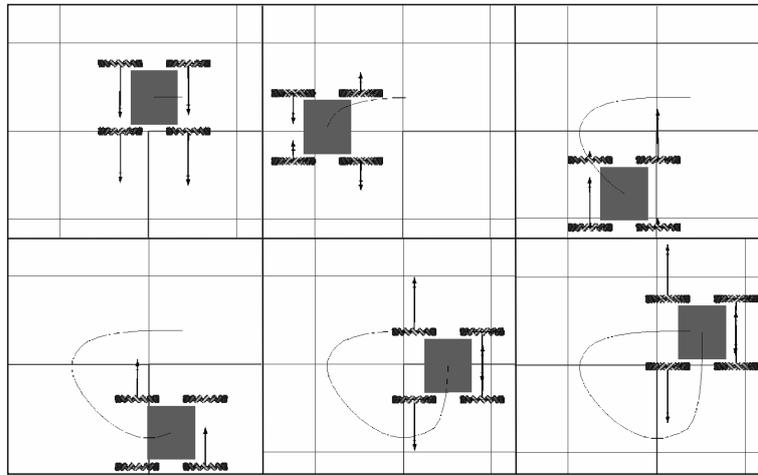


Рис. 7: Кинограмма движения четырехколесного робота

чена траектория движения центра корпуса, стрелками указаны направления и величины угловых скоростей колес.

Построена модель ровера в программном комплексе «Универсальный механизм» и построена система синтеза курсового управления.

Уравнения движения системы твердых тел (более 100 тел в данном случае) автоматически синтезируются в следующем общем виде.

$$M(q, t)\ddot{q} + k(q, \dot{q}, t) = Q(q, \dot{q}, t) + G^T(q)\lambda,$$

$$h(q, p) = 0,$$

где q — основные координаты объекта, p — вспомогательные координаты (локальные координаты в разрезанных шарнирах); M — матрица масс, k, Q — столбцы сил инерции и обобщенных сил; λ — множители Лагранжа, соответствующие силам реакций в разрезанных шарнирах; второе уравнение системы — алгебраические уравнения связей или условия замыкания

разрезанных шарниров. Матрица G является матрицей Якоби уравнений связей после исключения из них вспомогательных координат.

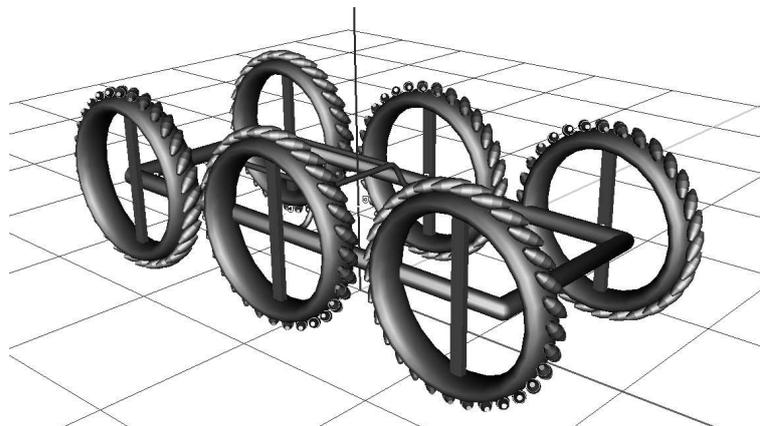


Рис. 8: Модель ровера в «Универсальном механизме»

Для приведенного на рис. 8 аппарата построена система программного управления движением аппарата по траектории с заданной ориентацией корпуса.

Третья глава

В программном комплексе «Универсальный механизм» исследуется динамика движения шестиколесного колесно-шагающего робота с активной подвеской и приводится методика синтеза его управления. При исследовании динамики используются численные методы моделирования состоящие из автоматического синтеза уравнений движения для системы твердых тел, и их численного анализа.

В процессе движения активная подвеска может использоваться в пассивном или полуактивном режиме, в этом случае ее параметры определяются в соответствии с методами, описанными в первой главе.

Модель трения и модель микронеровностей, описанная в первой главе, была использована для этого аппарата при решении задач синтеза управления. Препятствия, имеющие размеры, сравнимые с диапазоном хода ноги робота, рассматриваются далее. Как и в предыдущих главах несколькими способами задается контактная поверхность в качестве гладкой функции или ломаной.

Для исследования колесно-шагающих аппаратов был разработан, спроектирован и изготовлен прототип робота, показанный на рис. 9, описанию которого посвящена данная глава. Двухрычажная мягкая подвеска, подробно описанная и исследованная в первой главе, была заменена более

сложной подвеской, которую можно использовать как в качестве активной, так и в качестве пассивной подвески.



Рис. 9: Версия шестиколесного робота с пассивными колесами

Предполагалось, что проектируемый аппарат должен самостоятельно преодолевать препятствия порядка 0,5 м высотой и перемещаться по ровной поверхности на скорости около 30–40 км/ч, и, одновременно с этим иметь высокую профильную проходимость и быть способным поддерживать скорость более 12 км/ч на пересеченной местности. Подвеска по своим характеристикам, описанным в первой главе, должна не уступать стандартной двухрычажной подвеске.

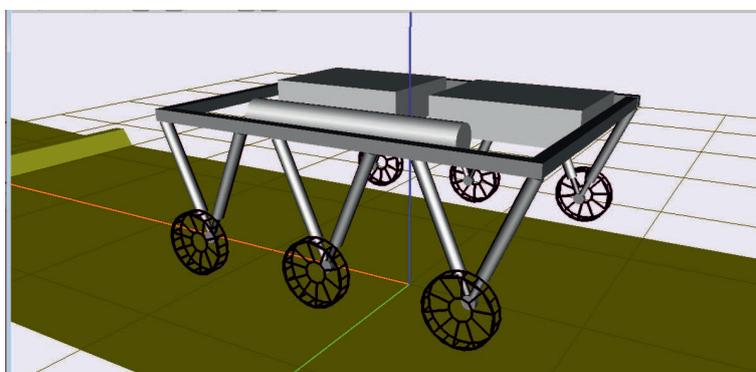


Рис. 10: Модель шестиколесного робота в «Универсальном механизме»

Исследуется модель робота, одна из версий которого показана на рис. 10. В программном комплексе «Универсальный механизм» была создана модель робота для выбора и оптимизации массово-инерционных и геометрических характеристик аппарата. Эта модель используется для машинного обучения преодолению препятствий системы, установленной на прототипе.

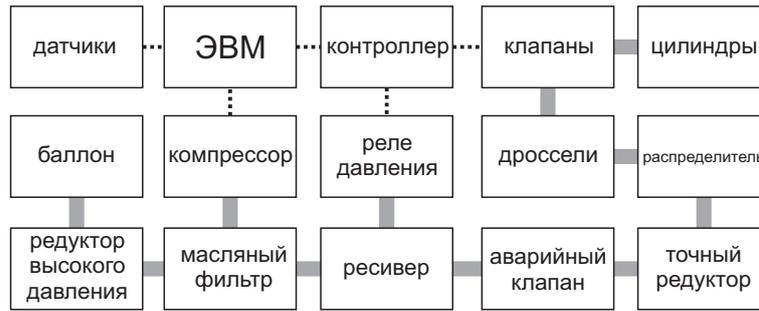


Рис. 11: Схема управления пневматическими приводами робота

На рис. 11 изображена схема управления подвеской робота. Пунктирными черными отрезками обозначены электрические связи, серыми сплошными — пневматические. Компрессор может быть установлен как на самом роботе, так и в помещении, в этом случае он соединяется с роботом гибким шлангом (лабораторный исследовательский вариант). Компрессор и баллон со сжатым газом могут использоваться или совместно, или заменять друг друга.

Для движения такого робота были построены базовые алгоритмы движения, такие как: разгон, торможение, поворот во время движения и поворот на месте, и другие. Все элементы этого алфавита выполнены без использования вращательных приводов и реализуются исключительно за счет изменения давления в пневмоцилиндрах и тормозов во вращательных шарнирах колес. Синтезировано 9 походок — управлений силами пневмоцилиндров и тормозов во вращательных шарнирах колес на коротком промежутке времени. Походкой здесь будем называть силовую характеристи-

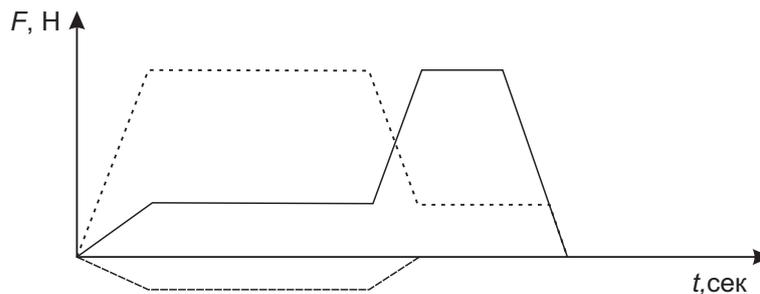


Рис. 12: Пример кусочно-линейно-постоянной функции

ку — распределение сил по пневмоцилиндрам и тормозам в колесных шарнирах. Каждая походка — набор из 18 кусочно-линейных функций (см. рис. 12) (для каждой силы пневмоцилиндра и силовой функции, отвечающей за торможение), построенных на отрезке времени, достаточном для преодоления одного препятствия. Область значений этой функции лежит в интервале $(-|\pi r^2(p_1 - p_2)|, |\pi r^2(p_1 - p_2)|)$, где r — внутренний радиус

пневмоцилиндра, p_1, p_2 — давления в камерах цилиндра. Далее $p_1 - p_2 = 7$ (допуск давления определен технической документацией пневмоцилиндра).

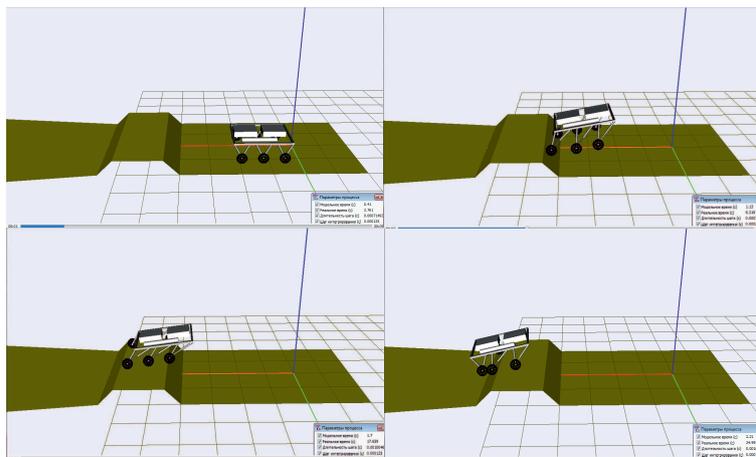


Рис. 13: Кинограмма прыжка для преодоления препятствия размера аппарата

Разработан следующий алгоритм преодоления препятствий для прототипа модели колесно-шагающего аппарата.

Модельная часть:

- Синтез m походок
- Генерация препятствий (80% преодолимых, 20% — непреодолимых)
- Проведение mn^2ki компьютерных экспериментов (k — количество кластеров, i — итераций)
- Составление обучающего файла (примеры успехов преодоления)
- Добавление непреодоленных в обучающий файл
- Обучение (первый шаг EM-алгоритма)
- Передача результатов обучения и списка неудач на робота

Система на роботе

- Распознавание препятствия (определение n параметров)
- Принятие решения (выбор типа походки — второй шаг EM)
- Проверка и корректировка решения

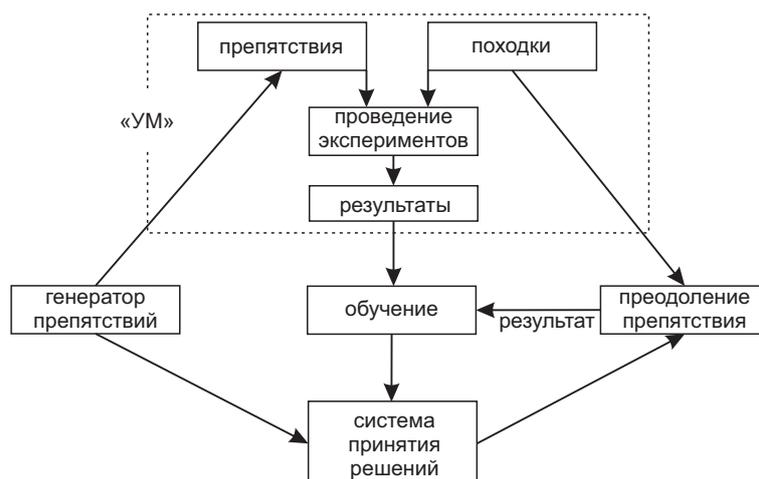


Рис. 14: Схема системы преодоления препятствий

- Запись результатов преодоления препятствия для самообучения

Разработанный алгоритм управления (рис. 14) состоит из двух частей. Первый этап происходит заблаговременно на нескольких компьютерах и требует нескольких недель. Сначала синтезируются походки и строится сетка экспериментов. Походки ранжируются, на данном этапе — по количеству затраченной энергии. После проведения моделирования составляется файл, подаваемый в обучающую программу. На данном этапе обучение происходит в программе, написанной на *C++* с использованием библиотеки *OpenCV*, так как в ней имеется реализация методов Expectation Maximization (EM). Для преодоления препятствий было синтезировано 9 классов походок со своими внутренними параметрами, которые оптимизируются отдельно. На рис. 13 приведена кинограмма одного из прыжков для преодоления препятствий. Все синтезированные походки на данном этапе преодолевают препятствия без остановок. Используются только усилия пневмоцилиндров и тормоза колесных дисков. Для выбора в режиме реального времени одного из девяти типов походки для преодоления конкретного препятствия было произведено машинное обучение методом EM на модели Гауссовых Смесей GMMs (Gauss Mixture Models).

Машинное обучение модели произведено с использованием моделей в программном комплексе «Универсальный механизм». После обучения данные передаются единообразно на робота, и выбор алгоритма преодоления реального препятствия производится EM-алгоритмом уже на борту устройства. На вход второй части алгоритма требуются геометрические параметры приближающегося препятствия и линейная скорость корпуса робота, получаемые с дальномеров и акселерометра, соответственно.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложена методика исследования комфортабельности движения шестиколесного робота с пассивной независимой подвеской. Разработаны алгоритмы управления роботом с пассивной и активной подвеской. Создана система распознавания препятствий и синтеза алгоритма управления, устанавливаемая на борт робота. Для аппаратов с пассивной и активной подвеской построены модели, минимизирующие время проведения каждого эксперимента, что крайне важно для машинного обучения.

1. Разработана модель блока управления, допускающая движение без бокового проскальзывания по ровной поверхности. При этом используется наиболее сложная модель трения, при которой боковое проскальзывание возможно на неровной поверхности, так как при его отсутствии не действует двухрычажная подвеска. Разработаны методы компьютерного моделирования механум-колес. Для аппарата с активной подвеской в случае использования механум-колес синтезирована система курсового управления, для аппарата с пассивными колесами разработан алфавит элементарных движений. Алфавит проверен и отработан на модели.
2. Для классической двухрычажной пассивной подвески и активной пневматической подвески, используемой в пассивном или полуактивном режиме, найдены зависимости от параметров подвески (жесткости и диссипации в случае двухрычажной подвески и давления и расхода газа в случае пневматической) таких характеристик комфортабельности движения как:
 - среднеквадратичное отклонение и максимум вертикального ускорения заданной точки корпуса
 - интеграл вертикального ускорения заданной точки корпуса и интеграл вертикального ускорения при превышении им заданной величины

По полученным данным, изображенным на диаграммах, системой робота с полуактивной подвеской могут выбираться параметры подвески экипажа, позволяющие минимизировать приведенные функционалы вертикального ускорения, что обеспечит движение в комфортабельном режиме. Показано, что, для аппарата легкого класса (до 100 кг) при выборе параметров подвески согласно приведенной методике возможно более чем в два раза уменьшить значение приведенных

функционалов комфортабельности. Уменьшение считается по сравнению со средним значением по области параметров, при которых возможно выполнение траектории.

3. Разработана модель прототипа колесно-шагающего аппарата с активной подвеской и система преодоления препятствий, самостоятельно принимающая решение о способе движения и преодоления препятствий. Система способна принимать решения для разных классов препятствий в реальном времени, исследована на модели и может быть установлена на робота.

В экспериментах показано, что на бортовом компьютере робота (с частотой 800 МГц) система способна принимать решения более 30 раз в секунду, что сравнимо с частотой поступления новой информации о местности с видеокамер. Даже при сокращении количества экспериментов обучения в 10 раз, вероятность преодоления случайного препятствия более чем в 4 раза (от 0,11 до 0,54) превышает вероятность его преодоления без обучения.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях

Алисейчик А.П., Павловский В.Е. Модель и динамические оценки управляемости и комфортабельности движения многоколесного мобильного робота / Проблемы управления. 2013. №1. С. 70–78.

Другие публикации

Алисейчик А.П., Павловский В.Е. Методика исследования динамической комфортабельности движения многоколесного мобильного робота / Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2010. №84. 27 с.

Aliseychik A.P., Orlov I.A. Mecanum-Wheel Mathematical Model / III российско-тайваньский симпозиум «Современные проблемы интеллектуальной мехатроники, механики и управления». М.: МГУ. 2012. С. 29–32.

Алисейчик А.П., Павловский В.Е. Исследование динамики движения мобильного робота с меканум-колесами / Тр. международной молодежной научно-практической конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы» НИИ механики МГУ. М.: МГУ. 2011. С. 23–26.

ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, 2013

Подписано в печать 12.09.2013. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 0,9. Тираж 75 экз. Заказ А-62.
ИПМ им.М.В.Келдыша РАН. 125047, Москва, Миусская пл., 4