

Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М.В.Келдыша  
Российской академии наук

**МЕХАНИКА И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ  
АВТОНОМНОГО МНОГОКОЛЕСНОГО АППАРАТА**

Алисейчик Антон Павлович

Специальность:  
01.02.01 — теоретическая механика

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
проф., д. ф.-м. н. Павловский В.Е.

Москва — 2013

# Содержание

<b>1</b>	<b>Обзор публикаций, посвященных колесным, шагающим и колесно-шагающим роботам</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Методика исследования комфортабельности движения шестиколесного робота с пассивной независимой подвеской</b>	<b>38</b>
2.1	Модель шестиколесного робота . . . . .	39
2.2	Модель подвески . . . . .	39
2.3	Метод управления . . . . .	42
2.4	Модель контакта колеса с дорогой . . . . .	49
2.5	Модель неровностей дороги . . . . .	50
2.6	Построение списка экспериментов . . . . .	50
2.7	Структуризация и анализ результатов . . . . .	52
2.8	Основные заключения о пассивной подвеске . . . . .	58
<b>3</b>	<b>Управление движением шестиколесного робота с меканум-колесами</b>	<b>60</b>
3.1	Математическая модель меканум-колеса . . . . .	60
3.2	Построение модели колеса. Препроцессинг . . . . .	63
3.3	Моделирование движения меканум-колеса . . . . .	66
3.4	Управление движением шестиколесного робота на меканум-колесах . . . . .	70
<b>4</b>	<b>Исследование динамики движения и синтез управления робота с активной подвеской</b>	<b>74</b>
4.1	Оптимизация и выбор массово-инерционных и геометрических характеристик аппарата . . . . .	74
4.2	Управление, движение по поверхностям разного типа с пассивной подвеской для шестиколесного пневматического аппарата . . . . .	79
4.3	Силовое управление активной подвеской . . . . .	81
4.4	Движение по поверхностям с микро/макро неровностями . . . . .	84

## **Список используемых сокращений**

**АБМ** Адамс–Бэшфорд–Моултон

**АМС** Автоматическая межпланетная станция

**ВМС** Военно-морские силы

**ГДЛ** Газодинамическая лаборатория

**ИПМ** Институт прикладной математики

**МГТУ** Московский Государственный Технический Университет

**МГУ** Московский Государственный Университет

**НМША** Натурный макет шагающего аппарата

**ОАО** Открытое акционерное общество

**ОС** Операционная система

**ПрОП-М** Прибор оценки проходимости–Марс

**РИТЭГ** Радиоизотопный термоэлектрический генератор

**СК** Система координат

**СКБ ПА** Спец. конструкторское бюро приборостроения и автоматики

**УМ** Универсальный Механизм

**ШИМ** Широтно-импульсная модуляция

**ЭВМ** Электронная вычислительная машина

**ASIMO** Advanced Step in Innovative MObility

**ATHLETE** All-Terrain Hex-Legged Extra-Terrestrial Explorer

**CMU** Carnegie Mellon University

**CV** Computer Vision

**EM** Expectation-maximization

**EPFL** Ecole Polytechnique Federale de Lausanne

**ESA** European Space Agency

**GMMs** Gaussian Mixture Models

**JPL** Jet Propulsion Laboratory

**KUKA** Keller und Knappich Augsburg

**M.U.L.E.** Multifunction Utility/Logistics and Equipment

**NASA** National Aeronautics and Space Administration

**ODV** Omni-Directional Vehicle

**PC** Personal computer

**PECE** Prediction-evaluation-correction-evaluation

**PEGASUS** Perspective Gait Supervisory System

**PPM** Park-Parallel Method

**QRIO** Quest for cuRIOsity

**ReCUS** Remotely Controlled Underwater Surveyor

**RMS** Root mean square

**SOLERO** Solar-Powered Exploration Rover

**TARDEC** Tank Automotive Research, Development and Engineering Center

**TITAN** Tokyo Institute of Technology, Aruku Norimono

**UM** Universal Mechanism

**WFM** The Walking Forest Machine

# Введение

## 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 [1]. Существует два основных требования к таким аппаратам: 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.

Отметим, что задача построения аппаратов, в том числе автоматических, перемещающихся по неровной сплошной поверхности, в настоящее время остается крайне актуальной. Создание роботов, перемещающихся по бездорожью или по поверхности со значительными препятствиями, важно как для наземной робототехники при работе в условиях отсутствия дорог или, например, при исследовании вулканов, так и для космических планетных задач, типа новых задач создания транспортных роботов Лунной

Базы [2].

Задача эта имеет несколько аспектов: I — это задача перемещения по местности со значительными препятствиями. Ей зарубежные и российские (рис. 1) разработчики уделяют большое внимание как исследованию аппаратов с повышенной проходимостью. В статье [3] приведена одна из возможных классификаций этих аппаратов, она дана в табл. 1.

Таблица 1. Классификация аппаратов с повышенной проходимостью

Назначение	Способ управления	Конструктивные особенности (по типу движителя)
Научно-исследовательские; Разведывательные; Аварийно-спасательные; Аварийно-ремонтные; Грузовые; Пассажирские; Землеройные; Дорожно-строительные; Строительно-монтажные.	Управляемые водителем, находящимся на борту; Управляемые оператором дистанционно; Управляемые дистанционно стационарной ЭВМ; Управляемые бортовой ЭВМ.	Колесные; Гусеничные; Гусенично-модульные; Шагающие; Колесно-шагающие; Прыгающие.

Для передвижения по сложной неровной поверхности могут применяться и иные решения. Один из современных примеров — аппарат с «ломающимся» корпусом, разработанный французской компанией «Robosoft» (рис. 2). Модель рассчитана в большей степени на преодоление сложных неровностей, чем на развитие высокой скорости, у аппарата также отсутствует подвеска.

В качестве других примеров можно привести американский аппарат LandShark и отечественный мобильный робот легкого класса ТМ-3, раз-

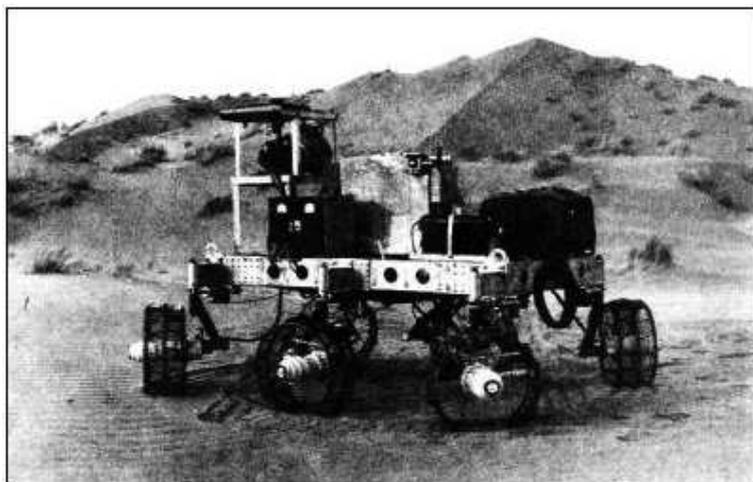


Рис. 1. Аппарат с поворотными колесами



Рис. 2. Аппарат *robuROC-6*

работанный в МГТУ им. Н.Э.Баумана. Отметим, что все эти аппараты предназначены для движения по пересеченной местности со средними скоростями.

II — это задача разработки аппаратов и роботов, способных перемещаться по неровной поверхности со скоростями, сравнимыми со скоростями движения по обычным дорогам. Здесь весьма важным элементом для колесных роботов становится подвеска колес аппарата. Ниже даны их типы.

## Типы подвесок

1. По способу соединения с корпусом (рамой) машины:

- Жесткие;
- Полужесткие (тракторные);
- Мягкие (эластичные и упругие).

2. По связи колес с упругими элементами:

- С продольными рычагами (маятниковая);
- С поперечными рычагами:
  - многорычажная
  - двухрычажная
  - о однорычажная (типа «Макферсон» на рулевой оси, типа «Чепмен» на задней оси);
- Телескопическая.

3. По способу соединения колес между собой:

- Независимая (индивидуальная);
- Блокированная (зависимая);
- Смешанная.

4. По типу упругого элемента:

- Пневматическая;
- Пружинная;
- С листовой рессорой;
- Торсионная.

5. По управляемости:

- Активная (управляемая);

- Полуактивная (управляется только дорожный просвет);
- Пассивная (неуправляемая).

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **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.

# 1 Обзор публикаций, посвященных колесным, шагающим и колесно-шагающим роботам

## Планетоходы

Значительная часть аппаратов, подобных исследуемому в данной работе, является планетоходами. Подобные устройства, предназначенные для эксплуатации на земле, стали появляться значительно позже. Таким образом, разработка и исследование изучаемых моделей опираются на работы [3], [4], [16], посвященные описанию различных планетоходов. Все внеземные планетные аппараты (планетоходы), когда-либо реально перемещавшиеся по поверхности планет, были либо исследовательскими, либо транспортными. Теоретически возможно использование подобных роботов и для других целей, например, в качестве передвижных ретрансляторов и убежищ, а также для проведения строительных работ. Кроме того, подобные планетоходам дистанционно управляемые или автономные аппараты могут использоваться на Земле для выполнения работ в условиях, представляющих опасность для жизни или здоровья людей — например, в условиях высокой радиоактивности или при разминировании.

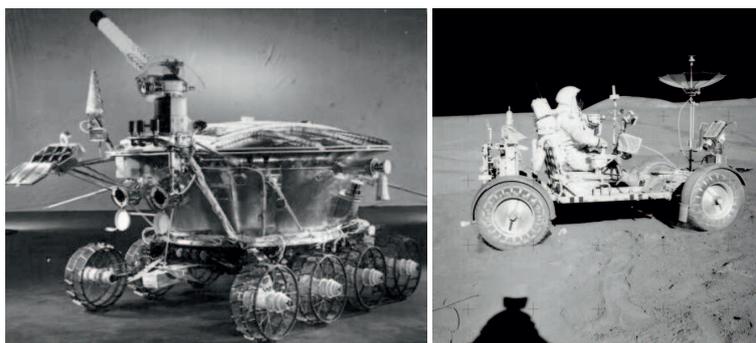


Рис. 3. «Луноход-1» и «Lunar Rover»

Первый планетоход, «Луноход-1» (рис. 3 слева), был доставлен на поверхность Луны 17 ноября 1970 года автоматической межпланетной стан-

цией «Луна-17». Его целью было изучение особенностей лунной поверхности, химического состава и свойств грунта, а также радиоактивного космического излучения на луне. Этот аппарат успешно проработал до 14 сентября 1971 года, после чего вышел из строя. За время нахождения на поверхности Луны проехал 10540 м и передал на Землю 25 тысяч фотографий и 211 лунных панорам. Более чем в 500 точках по трассе движения изучались физико-механические свойства поверхностного слоя грунта, а в 25 точках проведен анализ его химического состава.

«Лунный автомобиль» (рис. 3 справа) (англ. «*Lunar Rover*») — четырехколесный транспортный планетоход для перемещения людей по поверхности Луны, использовавшийся в ходе последних экспедиций программы «Аполлон» — «Аполлон-15», «Аполлон-16» и «Аполлон-17» в начале 1970-х годов. Аппарат представлял собой электромобиль на двух непerezаряжаемых 36-вольтных батареях емкостью 121 А·ч. Управление электромобилем поручалось командиру экипажа. Лунный ровер был снабжен четырьмя двигателями постоянного тока (по одному двигателю для каждого из колес) и двумя рулевыми двигателями (по одному для передних и задних колес). Конструкцией предусматривалась возможность питания от батарей электромобиля устройства связи или телекамеры. Батареи и электроника были снабжены системой пассивного охлаждения. Использование вездеходов должно было значительно расширить доступную площадь лунной поверхности, т.к. ранее астронавты могли перемещаться только в непосредственной близости от места посадки из-за скафандров и других приборов жизнеобеспечения, которые существенно сковывали их движения. Пользуясь же вездеходом, можно было развивать скорость до 13 км/ч. В ходе экспедиции «Аполлон-16» был установлен рекорд скорости передвижения по Луне — 18 км/ч. Общая длина пути, пройденного вездеходами в экспедициях Аполлон-15, -16 и -17, составила соответственно 28, 27 и 36 км. Электромобиль имел массу 210 кг и грузоподъемность в условиях лунной силы тяжести 490 кг. Алюминиевая рама длиной в 3 м с колесной базой в 2,3 м состояла из трех частей, скрепленных шарнирами, благодаря чему она складывалась и во время полета к Луне хранилась в лунном модуле в

сложенном виде. Максимальная высота автомобиля составляла 1,1 м [21].

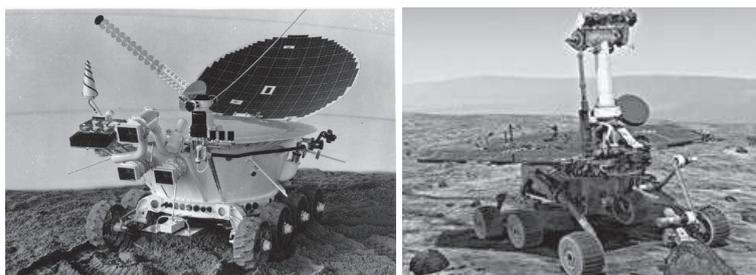


Рис. 4. «Луноход-2» и «Mars Exploration Rover»

«Луноход-2» — второй из серии советских лунных дистанционно-управляемых самоходных аппаратов-планетоходов «Луноход» (рис. 4 слева). Он предназначался для изучения механических свойств лунной поверхности, фотосъемки и телесъемки Луны, а также для наблюдений за солнечным излучением и прочих исследований. По своей конструкции «Луноход-2» почти не отличался от предыдущей модели — «Лунохода-1», масса «Лунохода-2» составляла 836 кг.

*Прибор оценки проходимости — Марс (ПрОП-М)* — название советских марсоходов, построенных в 1971 году. Среди других планетоходов эти аппараты выделяются прежде всего своей системой передвижения: для перемещения по поверхности марса данные аппараты были снабжены двумя параллельными шагающими «лыжами», размещенными по бокам. Такая необычная система передвижения была выбрана из-за отсутствия каких-либо сведений о поверхности планеты.

Марсоход «Соджонер» являлся частью миссии аппарата «Марс Патфайндер», совершившего посадку на Марсе 4 июля 1997 года [42]. Это был первый случай удачного запуска марсохода. За время своей миссии, продолжавшейся до 27 сентября 1997 года, этот небольшой марсоход сделал и передал 550 фотографий и более 15 раз провел химический анализ камней и грунта с марса.

*Mars Exploration Rover* — продолжающаяся миссия по исследованию Марса (рис. 4 справа) двумя схожими марсоходами «Спирит» и «Оппортьюнити». Посадочный модуль со «Спиритом» совершил посадку на Марсе 4 января 2004 г., а модуль с «Оппортьюнити» — 25 января 2004 г. Задача

миссии состоит в изучении поверхности Марса и его геологии. Среди основных задач — обнаружение и описание различных типов скал и грунтов, что может помочь в исследовании вопроса о наличии и формах воды на этой планете [19].

В рамках экспедиции «*Чандраян-2*» планируется использование шестиколесного лунохода весом 58 кг, работающего на солнечных батареях, для изучения района южного полюса Луны в течение одного года [46].

Для участия в миссии «*ЕхоMars*» Европейским космическим агентством разрабатывается марсоход весом 205 кг, сравнимый по размерам со *Спиритом* и *Оппортьюнити*. Этот аппарат также будет использовать солнце в качестве источника энергии, для чего будет оснащен двумя солнечными батареями. Запуск его к Марсу планируется на 2016 г.

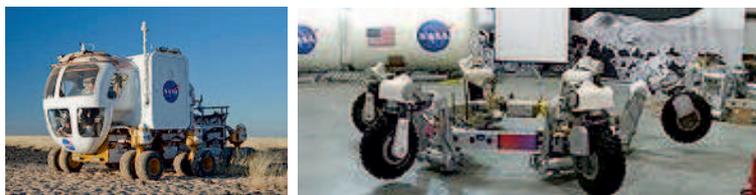


Рис. 5. «*Lunar Electric Rover*» и «*ATHLETE*»

*Lunar Electric Rover* — транспортный луноход (рис. 5 слева) размером с грузовик. Данный вездеход обладает 6 ведущими колесными осями. Аппарат работает от аккумуляторов, позволяющих ему в условиях лунной гравитации и поверхности развивать скорость до 10 км/час. В герметичной кабине устроены места для двух астронавтов и небольшой отсек для грузов.

Луноход *ATHLETE* (дословно «Аппарат для исследования внеземных поверхностей любого типа, снабженный шестью конечностями») — автоматический шестиногий транспортный вездеход (рис. 5 справа), разрабатываемый Jet Propulsion Laboratory (JPL) и NASA с 2008 г. [25].

## Колесные роботы

Колесные роботы являются одними из первых появившихся робототехнических систем. Основные принципы работы и устройства таких аппаратов описаны в публикациях [48] и [35]. Ниже приведены некоторые примеры колесных роботов. В 1986 г. для ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы советскими учеными был спроектирован, изготовлен и прошел всесторонние испытания *специализированный транспортный робот (СТР)*. Это шестиколесная машина (рис. 6 слева) с дистанционным управлением (по радиоканалу и с телевизионной обзорной системой). В конструкции СТР отражены многие принципы и технические решения из планетоходного задела: мотор-колеса с индивидуальным приводом, электромеханический привод, дистанционное управление по радиоканалу, наблюдение за окружающим пространством по телевизионному изображению (с помощью бортовых телевизионных камер), автоматизация рабочего процесса, источники энергии (аккумуляторы, которые периодически подзаряжались), в конструкции использованы легкие сплавы — в частности, титан. Несколько СТР работали на крыше третьего блока Чернобыльской АЭС, в зоне с повышенной радиоактивностью. Следует отметить, что модель имеет похожую кинематическую схему с исследуемым в данной работе аппаратом. Однако, аппарат, разработанный в 1986 году, не был предназначен для развития высоких скоростей, в конструкции отсутствовала подвеска, что для скоростных аппаратов неприемлемо.



Рис. 6. «СТР» и «Вездеход-ТМЗ»

«*Вездеход-ТМЗ*» — разработка Ковровского электромеханического завода (рис. 6 справа) совместно с ОАО «СКБ ПА» и МГТУ им. Баумана. Данная модель аппарата повышенной проходимости сверхлегкого класса

имеет ряд преимуществ по сравнению с прочими аналогичными разработками. Т.к. робот имеет небольшие размеры (40 на 60 сантиметров), а также маленький вес (около 40 килограммов), он может быть использован в труднодоступных местах и ограниченных пространствах. Аппарат без проблем перемещается в условиях городской инфраструктуры, по пересеченной местности и даже под водой. На корпусе установлены две цветные камеры, обеспечивающие четкое изображение окружающего пространства для простоты удаленного управления. Робот способен двигаться на одном заряде аккумуляторов в течение двух часов и пройти до 600 метров в условиях как нормальной, так и слабой освещенности (в темноте). Аппарат предназначен для дистанционного разминирования. Может управляться как с пульта по радио, так и по кабелю. При этом стоимость «Вездехода-ТМЗ» приблизительно 25-30 тысяч долларов, что вдвое меньше стоимости зарубежных аналогов. Разработка удостоена почетного диплома выставки высоких технологий оборонного и двойного назначения «Российский щит».

*Small Pressurized Rover* — прототип лунного транспортного планетохода. Данная модель представляет собой небольшой вездеход с 6 ведущими колесными осями, способный развивать скорость до 10 км/час в условиях лунной гравитации и поверхности. В герметичной кабине предусмотрены посадочные места для двух астронавтов, а также небольшой отсек для грузов. Расчетное время автономной работы 2 недели или 1000 км. В Научно-исследовательском бронетанковом центре США (TARDEC) разработан мобильный шестиколесный робот *APD*. Планируется, что данный аппарат будет использоваться для доставки грузов на позиции во время военных действий. Робот может передвигаться самостоятельно по заранее намеченному маршруту или управляться оператором, для чего на корпус установлены видеокамеры. Кроме камер наблюдения, на робот установлено устройство для обнаружения подвижных объектов. Часть сенсоров машины размещена на четырехметровой мачте. Максимальная скорость аппарата около 80 км/час, вес 9,6 т, длина 4,6 м. Планируется его оснащение сенсорами для определения препятствий. Бортовой компьютер будет проводить необходимые расчеты и корректировать маршрут робота с пре-

одолением или объездом различных препятствий. Сейчас машина способна взбираться на горку с уклоном в 37 град. (60%) и разворачиваться на месте за счет вращения колес по бортам в разные стороны. ADP оснащен колесами, каждое из которых имеет собственный электромотор, питающийся от литий-ионных аккумуляторов. Их подзарядка осуществляется дизельным генератором.



Рис. 7. «robuCAR» и совместная разработка CMU и компании Caterpillar

Компанией Robosoft на данный момент разработано 5 колесных платформ: robuLAB 10 (Компактный и быстрый мобильный робот с полезной нагрузкой 30 кг и максимальной скоростью 4 м/с), robuCAR (Открытая мобильная платформа (рис. 7 слева) с полезной нагрузкой 300 кг и максимальной скоростью 35 км/ч), robuROC-6 (Прочный и быстрый мобильный робот для пересеченной местности с полезной нагрузкой 80 кг и максимальной скоростью 5 м/с), Wifibot4G и Pioneer. Компании Carnegie Mellon University (CMU) и Caterpillar объявили, что поставили перед своими инженерами задачу автоматизировать управление гигантского карьерного самосвала (рис. 7 справа) весом 700 тонн, способного перевозить до 240 тонн груза. Мощность автомобиля 3550 лошадиных сил, максимальная скорость 67 км/ч. Таким образом, самый большой грузовик в мире вероятно скоро станет самым большим роботизированным транспортным средством.

## Шагающие роботы

Гусеничные и колесные движители достаточно известны. Менее известны шагающие движители, т.к. из-за технической сложности конструкции и

управления они пока не получили в реальной жизни большого распространения. Тем не менее, такой принцип передвижения иногда используется в наземной практике (например, шагающие экскаваторы). Шагающему способу передвижения уделяется много внимания в исследовательских и поисковых работах, так как это позволяет преодолевать достаточно большие препятствия. Шагоходы, или шагающие роботы — разнообразные механизмы, передвигающиеся с помощью ног. Главной проблемой в создании шагающих аппаратов является отсутствие достаточно мощной, емкой и компактной энергоустановки, обеспечивающей собственно шагание, а также высокая себестоимость таких конструкций. Однако, в данный момент во многих странах ведутся разработки полноценных шагающих аппаратов военного или прочего назначения. Наиболее известные аппараты такой конструкции описаны в работах [28], [45], [33], [31]. Так, представители американской «Mechanized Propulsion Systems» обещают создать образец пригодный для боя к 2025 году. А японская «Sakakibara Kikai» уже создала первый двигающийся образец: развиваемая скорость — 1,5 км/ч, вес 1 т, высота 3,4 м.

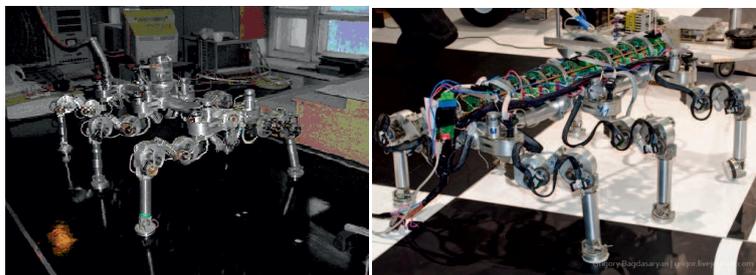


Рис. 8. Шагающий аппарат «Маша»

В 1968 году Р. Мошер завершил работу над созданием четырехногого механизма с ручным управлением под названием General Electric Walking Truck. В 1972 году в МГУ была разработана модель под именем «Рикша». Она приводилась в движение с помощью двух ног, но имела также четыре колеса. В 1973 году группа советских ученых завершила работу над практической реализацией шестиногой машины (доктор наук, профессор В.С. Гурфинкель, доктор наук А. Ю. Шнейдер). В 1977 году началось «соревнование» между США и СССР. В Америке разработкой шагающих

механизмов занимался МакГи со своей командой, в Советском Союзе — профессор Гурфинкель и коллеги. Русские «шестиноги» (рис. 8) назывались — «Маша». В ответ на «Машу» МакГи и команда предложили свою версию шестиногого робота, которая весила 136 кг. С 1976 года по 1979 в исследовательском центре Komatsu Ltd. (Япония) велась работа по созданию аппарата ReCUS (Remotley Controlled Underwater Surveyor). Он имел восемь ног, и был достаточно крупным — 8 м в длину, 5,35 м в ширину и 6,4 м в высоту. Весить такая конструкция должна была порядка 29 тонн. Максимальная скорость — 0,07 м/с. В настоящее время сохранились только его чертежи. В 1979 году группой ученых из Санкт-Петербурга был разработан и сконструирован «шестиног», со следующими параметрами: вес — 40 кг, длина — 60 см, ширина — 25 см, высота ног — 20 см. В период 1980-1983 гг. американцы продолжили развитие тяжелых роботов с большим количеством ног. Изобретатели Сазерленд и Спрулл создали машину длиной в 2,4 метра, развивающую скорость 0,11 м/с. Следующими по хронологии являются японские разработки TITAN III и TITAN IV (TITAN — аббревиатура от Tokyo Institute of Technology, Aruku Norimono). Ноги TITAN III были оснащены сенсорами, связанными с электронной системой управления, именуемой PEGASUS (Perspective Gait Supervisory System). Данная система позволяла адаптировать движение механизма согласно с изменениями поверхности. Длина ног TITAN III была 1,2 м и весил он 40 кг.

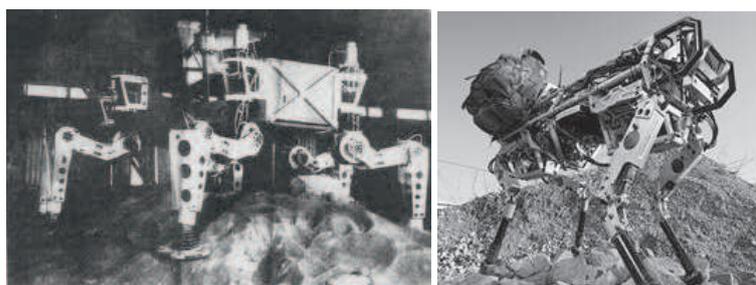


Рис. 9. «HMMA» и «BigDog»

Наиболее полно был разработан экспериментальный российский натуральный макет (рис. 9 слева) шагающего аппарата (HMMA). Этот аппарат длиной 2,25 м, высотой 1,5 м и шириной около 2 м имеет шесть программ-

но управляемых многозвенных ног. Благодаря удачной адаптивной системе он может идти по завалам, хорошо приспособляясь к неровностям поверхности. Ноги аппарата также могут быть использованы в качестве манипуляторов.

Прибор оценки проходимости — Марс (ПрОП-М) — так назывались первые в мире марсоходы, созданные в СССР. Они были доставлены на поверхность Марса в 1971 году при помощи АМС «Марс-2» (27 ноября) и «Марс-3» (2 декабря), однако свою миссию не выполнили. Спускаемый аппарат «Марс-2» стал первым рукотворным объектом, достигнув поверхности Марса, однако он разбился при посадке, а «Марс-3» проработал лишь 20 секунд (предположительно вышел из строя из-за пылевой бури). Аппараты были оснащены двумя лыжами, находящимися по бокам и немного приподнимающими аппарат над поверхностью, чтобы перемещаться по неисследованной поверхности Марса. Манипулятор должен был поместить аппарат на поверхность Марса в область видимости телекамер. Два тонких бруска впереди являются датчиками обнаружения препятствий. Подвижный аппарат мог определить, с какой стороны находится препятствие, отступить от него и попытаться обойти. Каждые 1,5 метра предусматривались остановки для подтверждения правильности курса движения. Этот простейший искусственный интеллект был необходим для запуска на Марсе подвижных устройств, т.к. сигнал от Земли до Марса идет от 4 до 20 минут, что делает практически невозможным дистанционное управление роботом с Земли. К моменту прихода команд с Земли, аппарат, возможно, уже вышел бы из строя.

- Масса — 4,5 кг
- Размеры корпуса (д×ш×в) — 25 см×22 см×4 см
- Способ передвижения — шагающее шасси с датчиками обнаружения препятствий.
- Скорость передвижения — 1 метр/час. (После перемещения на 1 метр, марсоход останавливался для получения команд управления с Зем-

ли).

- Научные приборы — динамический пенетрометр и гамма-лучевой плотномер.
- Управление — дистанционное, по кабелю от спускаемого аппарата АМС. Длина кабеля — 15 метров.
- Миссия — измерение плотности грунта.
- Проектировщик и изготовитель — ВНИИТрансМаш
- Главный конструктор — Александр Леонович Кемурджиан

Не летавший экземпляр марсохода выставлен в музее ГДЛ в Петропавловской крепости в Санкт-Петербурге.

Шагающий экскаватор — экскаватор на шагающем ходу, чаще всего оснащенный оборудованием драглайна. Гидравлический шагающий движитель применяется в этих устройствах для того, чтобы снизить нагрузку на грунт (масса машин может достигать сотен и даже тысяч тонн) и повысить надежность. Достигнув точки назначения экскаватор опирается на грунт опорной плитой в основании; при необходимости перемещения на шаг вес переносится на опорные платформы («лыжи»); каждая платформа приводится в действие двумя парами гидроцилиндров. Экскаватор приподнимается над грунтом, смещается на некоторое расстояние и снова садится на грунт опорной плитой. Опорные платформы, в свою очередь, приподнимаются над грунтом и переносятся вперед; Этот циклический процесс позволяет аппарату успешно перемещаться на небольшие расстояния. Емкость гидросистемы экскаватора ЭШ-20/90 вмещает 18т масла, давление в системе достигает 200 атм. Фактическая скорость перемещения составляет 60–80 метров в час, максимальная паспортная — до 200 м/ч.

В 2005 году фирмой Boston Dynamics при финансовой поддержке Defense Advanced Research Projects Agency был создан четырехногий шагающий робот «*BigDog*» (рис. 9 справа), предназначенный для транспортировки снаряжения и помощи солдатам на пересеченной и сложнорельефной

местности, где не способен передвигаться обычный транспорт [44]. Вместо колес и гусениц BigDog использует четыре ноги, оснащенные большим количеством разнообразных сенсоров. Также у BigDog имеется лазерный гироскоп и система бинокулярного зрения. Длина робота — 0,91 м, высота 0,76 м, вес 110 кг. Аппарат может достигать скорости 6,4 км/ч при перемещении по труднопроходимой местности, он способен перевозить 154 кг груза и подниматься на 35 градусную наклонную плоскость. Движения робота контролируются компьютерной системой, которая получает данные от различных сенсоров. Эта же система контролирует навигацию и равновесие. BigDog упоминается в статьях New Scientist, Popular Science, Popular Mechanics и Wall Street Journal, а также в нескольких видео на сайте youtube.com. 18 марта 2008 года Boston Dynamics выпустила видео о новом поколении робота BigDog, где продемонстрирована возможность аппарата ходить по ледяной поверхности и восстанавливать равновесие после удара сбоку. BigDog оснащен двухтактным одноцилиндровым двигателем со скоростью вращения 9000 об/мин (двигатель карта). Мотор служит приводом для гидронасоса, который питает гидродвигатели ног — по 4 для каждой ноги, два для бедренного сустава, один для коленного и один для голеностопного суставов. Гидродвигатель представляет собой гидроцилиндр с сервоклапаном, оснащенный датчиками положения и усилия. Робот обладает хорошей устойчивостью: во время испытаний он не падал при проходе по льду и при сильных толчках. Однако, автомобильный двигатель работает довольно шумно, из-за чего слышен громкий звук мотора при шагании аппарата, что может быть крайне нежелательно при использовании BigDog в военных операциях. Бортовой компьютер представляет собой упрочненный вариант платформы PC/104 с процессором класса Pentium под управлением ОС QNX.

В 2006 году компанией Sony были выпущены два шагающих робота-игрушки (рис. 10 слева) QRIO (андроидный робот 0,6 м высоты 7,3 кг) и AIBO (робот-собака). В 2000 году компания Honda начала разработку андроидного робота AISMO высотой 130 см и весом 54 кг, развивающего скорость 6 км/ч. К 2009 году было произведено 100 штук ценой 1 млн

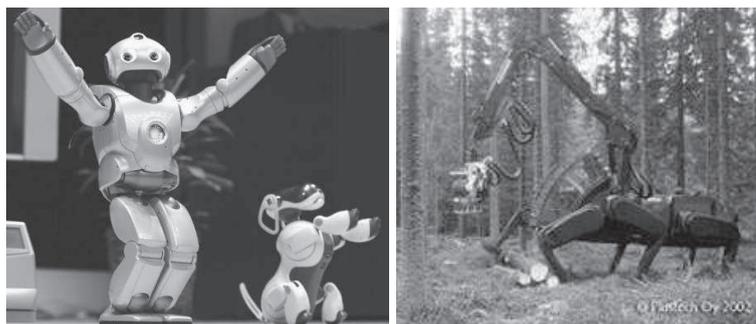


Рис. 10. «QRIO», «AIBO» и «The Walking Forest Machine»

долларов каждый.

Финское подразделение компании Timberjack, именуемое Plustech Oy, уже несколько лет занимается выпуском и модернизацией идеи The Walking Forest Machine (WFM). Plustech Oy — это не только обычное подразделение, но и европейский исследовательский центр данной компании. Основное направление Timberjack — лесозаготовка и все, что с ней связано. WFM (рис. 10 справа) — это шестиногая машина, управляемая специальной компьютерной системой, позволяющей автоматически адаптироваться под неровности почвы. Информация, поступающая со специальных сенсоров, обрабатывается определенным образом, и как результат вычислений — точный расчет устойчивости машины. Она позволяет производить лесозаготовку на наклонных и сильно неровных поверхностях. WFM может двигаться вперед, назад, в стороны, по диагонали. Оператор управляет всем с помощью единственного джойстика. За дизайн и инновационные идеи WFM получил уже несколько премий. Причем, стоит отметить, что это одна из первых реализаций действительно полезных шагающих машин.

Также, к шагающим роботам можно отнести Экзоскелет (от греч.  $\epsilon\xi\omega$  — внешний и  $\sigma\kappa\epsilon\lambda\epsilon\tau\omicron\varsigma$  — скелет) — устройство, предназначенное для увеличения мускульной силы человека за счет внешнего каркаса. Экзоскелет повторяет биомеханику человеческого тела для пропорционального увеличения усилий при движениях. Такое устройство может быть, например, интегрировано в скафандр. По сообщениям открытой печати реально действующие образцы в настоящее время созданы в Японии и США.

## Роботы со сложной кинематической схемой



Рис. 11. «robuROC-6» и «Galileo»

Робот-разведчик (рис. 11 слева) «robuROC-6» — новейшая разработка компании Robosoft в области многоколесных роботов для решения задач рекогносцировки и выполнения других операций на пересеченной местности. Первая модель робота была создана в рамках исследовательской программы Minirac при финансовой поддержке французской военно-промышленной компании DGA/SPART. Модель «robuROC-6» — мобильный робот, отличающийся высокой скоростью и повышенной проходимостью. Робот оснащен шестью большими колесами с глубоким протектором, обеспечивающим надежное сцепление с мягким грунтом, песком или травой. Специальная гидравлическая подвеска трех платформ с колесами позволяет роботу не терять опору, даже если одно из колес наедет на высокое препятствие. Платформы могут поворачиваться друг относительно друга на угол до 30 градусов в обе стороны, что еще больше увеличивает проходимость робота. Эта система дает возможность перебираться через препятствия и ямы, в которые колесо может провалиться, без потери устойчивости. Для повышения скорости движения по ровной поверхности предусмотрена возможность подъема средней платформы, что позволяет увеличить скорость движения робота и снизить потребление энергии. Модульная система «robuROC-6», технология формирования команд управления «Icorescontrol command technology™» и открытая архитектура позволяют установить множество модулей, оптимальных для конкретной поставленной задачи, например: систему машинного зрения, инфракрасные и ультразвуковые датчики, лазерные системы широкого профиля, наклон-

ные контейнеры для крепления произвольного полезного груза, устройства беспроводной связи, манипуляторы и многое другое.

Одна из основных проблем транспортных средств — необходимость двигаться по различным типам поверхности: по асфальту, пашне, жидкой грязи и, наконец, по камням или по лестнице. Очевидно, что по более-менее ровной дороге лучше ездить на колесах, а на труднопреодолимом грунте — нужно ездить на гусеницах. Робот «Galileo» (рис. 11 справа) совмещает и гусеницы и колеса, благодаря чему становится универсальным транспортным средством, предназначенным для движения как по ровной, так и по пересеченной местности. Как правило, робот перемещается на четырех колесах, но при необходимости он может трансформировать эти колеса в гусеницы. Разработчик — Galileo Mobility Instruments — использует данный принцип, чтобы создать инвалидное кресло, которое может подниматься по лестнице, а также для создания сельскохозяйственных машин и роботов прочего назначения.

В настоящее время в связи с развитием потенциально опасных производств все большее внимание уделяется разработкам устройств, способных свободно перемещаться в замкнутых и тесных пространствах и проникать в различные труднодоступные или опасные для человека места. К таким устройствам относится и «Транспортное средство для перемещения по произвольно-ориентированным в пространстве поверхностям» — патенты РФ №2042558, №2042559, №2057046 и др. Это шагающий аппарат, перемещающийся с помощью пневмоцилиндров с выдвигающимися штоками. На концах штоков находятся вакуумные присоски, способные двигаться перпендикулярно поверхности перемещения. Движение робота предусматривает выдвижение штоков, опускание присосок, их вакуумирование, подтягивание корпуса и фиксирование его с помощью присосок. Известна также «Система управления шагающего транспортного средства» — патент РФ №2057046, обеспечивающая управление движением робота-паука.

Исследователи из Израильского технологического университета «Технион» работают над созданием и улучшением робота-змеи. Последняя версия устройства, в отличие от предыдущей, представленной в 2009 году,

оснащена независимыми элементами управления каждой подвижной частью — сервоприводами, источниками питания, процессорами, инерционными датчиками и приборами связи. Новый робот в данный момент проходит тестирование в лаборатории, после чего планируется его поступление на испытание в подразделение Армии обороны Израиля. Предполагается, что робот-змея может быть использован военными для наблюдения в канализациях, узких тоннелях или трубах, недоступных другим устройствам. Израильский робот представляет собой чрезвычайно маневренную механическую змею, которая может быстро и незаметно перемещаться в замкнутых тесных пространствах, узких трубах и по пересеченной местности и передавать на пункт управления информацию с различных датчиков. Также робот может расставлять «одноразовые» датчики или заряды взрывчатки в различных частях здания (или любых других точках пространства), предоставляя подразделению полную ситуационную осведомленность и преимущество внезапности. В числе базовых датчиков устройства тепловизор и миниатюрные низкоуровневые камеры. Возможна также установка лазерного радара. Благодаря подвижности «змеино» тела робот обеспечивает 360-градусный обзор. Робот-змея имеет восемь участков, каждый из которых оснащен двигателями и инерциальной системой, согласующей положение данной части робота с другими. Такая система обеспечивает автоматическое передвижение по самому сложному рельефу местности, а также позволяет повысить надежность работы устройства. Прототип сделан из алюминия и весит 7 кг. Его корпус достаточно прочный для выполнения большинства боевых операций. А новые, более легкие и прочные композитные материалы позволят усилить корпус, снизив вес устройства примерно в два раза. Благодаря малым размерам и мобильности робот-змея является уникальным устройством для разведки и ведения боя, предоставляя возможности, недоступные ни одному роботу и даже человеку. По возможностям преодоления препятствий внутри зданий со змеей не сравнится ни один современный шагающий или гусеничный робот. При этом малый вес позволяет переносить робота-змею в рюкзаке, а малые габариты делают робота практически незаметным в поле или в лесу.

## Колесно-шагающие роботы

Колесно-шагающие движители в основном работают в режиме колесного качения. Но на трудных участках, например, при подъеме в гору по сыпучему грунту, колеса простого колесного ровера зарываются в грунт, а колесно-шагающий аппарат может выдвинуть передние колеса вперед, а затем, одновременно или по очереди, подтянуть к ним остальные колеса. Проходимость машины с колесно-шагающим движителем значительно выше, чем у аппаратов с простыми колесными движителями. Известны схемы, при которых «шагание» колес не требует остановки аппарата.

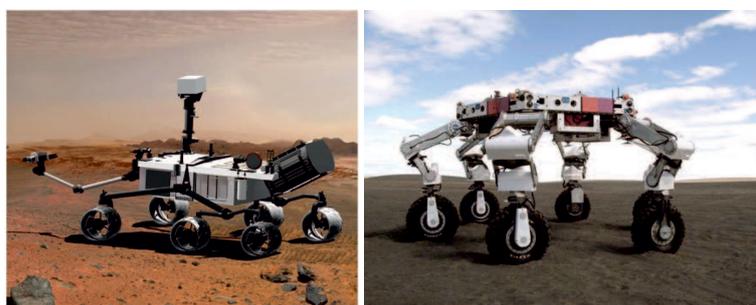


Рис. 12. «Curiosity» и All-Terrain Hex-Legged Extra-Terrestrial Explorer

«*Curiosity*» (русск. Любопытство) (рис. 12 слева) (Mars Science Laboratory) — американский марсоход нового поколения, представляющий собой автономную химическую лабораторию в несколько раз больше и тяжелее прежних марсоходов «Spirit» и «Opportunity» [50]. Планируется, что аппарат за несколько месяцев проедет от 5 до 20 километров и проведет подробный анализ почвы и компонентов атмосферы Марса. Космический корабль доставки был снабжен вспомогательными ракетными двигателями для контролируемого снижения при посадке, что позволило снизить риск повреждения аппарата при соприкосновении с поверхностью. На поверхность Марса Curiosity приземлился 6 августа 2012 года в районе кратера Гейл. Участок для посадки был выбран при помощи спутника Mars Reconnaissance Orbiter. MSL имеет 3 метра в длину, 2,1 метра в высоту с разложенной камерой и 2,7 метра в ширину. Диаметр колес составляет примерно 51 сантиметр. Вес марсохода чуть больше 800 кг, также он несет

на борту 80 килограмм исследовательского оборудования. На поверхности Марса MSL будет способен преодолевать препятствия высотой до 75 см. Ориентировочная максимальная скорость на пересеченной местности составляет 90 м/ч при автоматической навигации. Средняя же скорость, предположительно, составит 30 м/ч. Ожидается, что за время двухлетней миссии MSL пройдет не менее 19 километров. Конструкция прибора подобна тем, что использовались ранее — платформа с научными приборами на шести колесах. При этом он втрое тяжелее прежних марсоходов и стоимость его составила около 1,5 миллиарда долларов. Вместо солнечных батарей в качестве источника энергии используется радиоизотопный термоэлектрический генератор (РИТЭГ), что позволяет аппарату работать в темное время суток, а также дает стабильное энергообеспечение, не зависящее от загрязнений и пылевых наносов, вызванных пылевыми бурями. Выбранный РИТЭГ нового поколения способен снабжать марсоход энергией в течение 14 лет. Запущенный космический аппарат включал в себя 3 модуля — перелетный, посадочный и непосредственно ровер-марсоход.

*All-Terrain Hex-Legged Extra-Terrestrial Explorer* (рис. 12 справа) «*ATHLETE*» (дословно «Аппарат для исследования внеземных поверхностей любого типа, снабженный шестью конечностями») — автоматический шестиногий транспортный вездеход, разрабатываемый совместно Jet Propulsion Laboratory (JPL) и Калифорнийским технологическим институтом и NASA. Ровер предназначен для высадки на Луну (в возможной перспективе также на Марс) и транспортировки грузов, жилых и лабораторных модулей по поверхности. Разработка ведется в рамках комплексной программы NASA «Созвездие». Прототип, созданный в 2009 г. состоит из трех прикрепленных к грузовой платформе независимых частей. Каждая часть в свою очередь состоит из двух конечностей, несущих по одному колесу. Все три части могут работать независимо, а при подсоединении к грузовой платформе функционируют как единое целое. При движении по сложным поверхностям колеса могут быть заблокированы и конечности будут использоваться как шагающие движители. Высота «стоящего» ровера составляет 4 м, грузоподъемность — 450 кг в условиях земной гравита-

ции. Максимальная скорость передвижения ATHLETE составляет приблизительно 2 км/ч [25].



Рис. 13. Multifunction Utility/Logistics and Equipment и «WorkPartner»

Компания Lockheed Martin, известная своими «самолетами невидимками» (F-117 «Steath»), провела испытания прототипа новой транспортной системы (рис. 13 слева) Multifunction Utility/Logistics and Equipment (M.U.L.E.). Во время тестирования на препятствиях с заранее запрограммированным описанием колесный робот взобрался на 76-сантиметровую ступень и прополз над провалом шириной 1,78 метра, используя только собственный искусственный интеллект, без вмешательства оператора. Аппарат может двигаться с креном в 40%, взбираться на ступеньку высотой до 1 м и преодолевать ров шириной более 1 м, а также преодолевать водную преграду глубиной более полуметра. Мул представляет собой multifunctionальное модульное транспортное средство, способное перемещаться по пересеченной местности под управлением собственного искусственного интеллекта. Также устройство может управляться оператором удаленно. Робот может быть транспортирован в точку применения на борту самолета C-130 или вертолета CH-47, либо на внешней подвеске вертолета UH-60. Мул оснащен шестью ведущими колесами с системой централизованной подкачки давления в шинах и независимой активной подвеской с интеллектуальным управлением, благодаря которой он может произвольно управлять перемещением каждого колеса вверх-вниз, поднимая либо одно (или оба) из передних колес, либо колеса в центре, либо приподнимая над дорогой сам кузов (полностью или его передний или задний конец отдельно).

Система принятия решений о способе преодоления того или иного препятствия, которую инженеры активно тестировали в последнее время, не только выбирает тактику преодоления бездорожья, но и использует управляемую подвеску для компенсации смещения центра тяжести при транспортировке груза. Планируется серийное производство сразу трех модификаций Мула: в качестве автоматического средства доставки грузов и оборудования, автоматического миноискателя и беспилотной машины поддержки пехоты (возможное вооружение пулемет M240 или противотанковая ракетная установка Javelin). Интересно, что в грузовом варианте на машине предусмотрено множество разнообразных мест крепления вещей, складные и съемные модульные рейлинги, способные удерживать не только ящики с боеприпасами или другими необходимыми материалами, но и носилки с раненым. Один «Мул» в таком исполнении может перевозить все необходимое для взвода морской пехоты по по поверхности с практически любой сложностью рельефа [40].

*WorkPartner* (рис. 13 справа) мобильный робот, предназначенный для решения повседневных задач во внешней среде, который способен к интерактивному взаимодействию с человеком [38]. Робот оснащен двумя манипуляторами и гибридной колесно-шагающей системой передвижения. Механическая часть робота была разработана и изготовлена Rover Company Ltd, Санкт-Петербург, Россия. Это высокоадаптивный модульный колесно-шагающий аппарат, который может управляться как удаленным оператором, так и при помощи интерактивного взаимодействия.

Компанией Zanthic Technologies Inc. также был разработан колесно-шагающий робот. Высокая проходимость аппарата достигается благодаря относительно небольшой высоте и способности поднимать колесо выше его вертикальных размеров, а также благодаря независимым приводам колес. Сотрудники компании утверждают, что этот робот может балансировать на трех колесах с одним поднятым, что позволяет называть эту машину именно шагающей. Ломанный корпус придает аппарату большую свободу при прохождении крутых поворотов. Все вышеперечисленное делает данное устройство идеально подходящим для выполнения задач в замкнутых,

ограниченных по высоте пространствах, а также на сложной пересеченной местности.

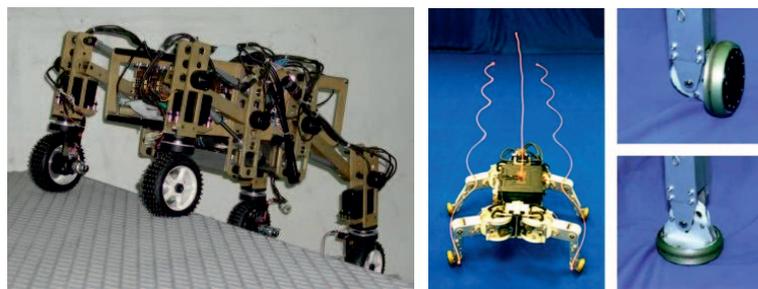


Рис. 14. «Hylos» и «Roller-Walker»

*Hylos* (разработчики Laboratoire de Robotique de Paris – University de Paris 6). «Hylos» (рис. 14 слева) значительно меньше по размеру, чем «WorkPartner», и не предназначен для промышленной эксплуатации. Этот небольшой мобильный аппарат используется для проведения экспериментов по методам управления и отработки автономного передвижения по пересеченной местности. В работах [18], [26] подробно описаны алгоритмы управления таким роботом. На рис. 15 приведена иллюстрация процесса моделирования движения «Hylos» по пересеченной местности [26].

«*Roller-Walker*» (рис. 14 справа) — колесно-шагающий мобильный робот, оснащенный четырьмя ногами, который может и только ездить или только ходить, убрав колеса. Каждая конечность робота заканчивается свободноповорачивающимся колесом, которое можно повернуть на 90 градусов. Аппарат шагает для перемещения по неровной поверхности, а по гладкой поверхности *Roller-Walker* едет на колесах, совершая волнообразные движения ногами и используя значительно меньше энергии при качении по сравнению с обычными шагающими роботами. Устройство было разработано Японской компанией Hirose-Fukushima Robotics Lab [30], [24], [23], [22].

*Octopus* (рис. 15 слева) («Осьминог») (рис. 16) – восьмиколесный робот весьма оригинальной конструкции, созданный Швейцарским федеральным институтом технологий в Лозанне (EPFL). Одной из основных особенностей аппарата является распознавание препятствий не с помощью «зри-



Рис. 15. «Octopus» и «Kaiser S2»

тельной», а с помощью «тактильной» чувствительности. Внутри каждого колеса спрятаны 16 инфракрасных датчиков, которые измеряют деформацию шины, вызванную контактом с грунтом, камнями и прочими предметами, таким образом, каждое из восьми колес выступает в роли тактильного сенсора. Датчики установлены фактически на ступице колеса, вследствие чего они остаются неподвижными, пока шина вращается вокруг них. Шина же опирается своими краями на два отдельных кольца, вращающихся на подшипниках с уплотнением. Таким образом, робот может в любой момент определять положение препятствий в пространстве, как бы ощупывая их. Колеса закреплены на системе рычагов, также снабженных двигателями, что позволяет роботу не только катиться, но и шагать. Эта особенность имеет большое значение при подъеме и преодолении высоких препятствий. Хотя машина внешне крайне мало напоминает осьминога, именем которого названа, ее способ передвижения сходен с действиями этого моллюска. Так, робот ощупывает камни подобно тому, как это делает осьминог. Также, подобно тому как осьминог, желая забраться повыше, забрасывает на препятствие передние щупальца, потом подтягивает тело, затем подбирает задние «ноги», Octopus, почувствовав препятствие передним колесом, поднимает его вверх, одновременно сдвигаясь вперед, пока второе колесо не коснется ступеньки. Затем робот продолжает подъем, действуя системой рычагов на передних конечностях так, чтобы переднее колесо, следуя за профилем ландшафта, снова достигло ровного горизонтального участка. Тогда начинает подтягиваться остальная конструкция. В этот момент весь вес робота распределен лишь между внешними колесами. Примеча-

тельно, что в программу управления Октопуса заложена способность оценивать серьезность препятствия и выбирать «штурм» или поиск обхода в зависимости от результатов анализа. При этом, как подчеркивают разработчики, единственное уравнение, которое должно быть удовлетворено, чтобы достигнуть равновесия машины — уравнение вращающих моментов относительно различных ее осей [37]. Существует целый ряд немецких и швейцарских колесно-шагающих экскаваторов, таких как: Kaiser S2 (рис. 15 справа), Menzi A111, управляемых оператором.

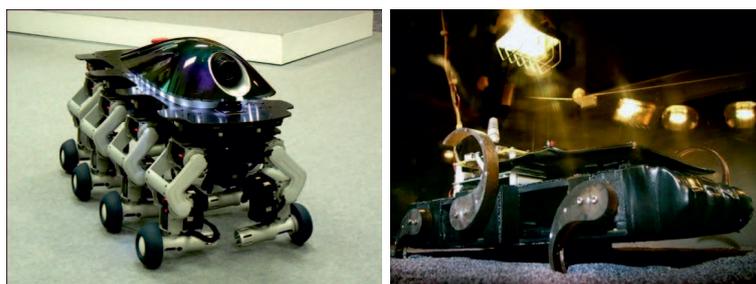


Рис. 16. «Halluc II» и «SandBot»

Гигантский робот-таракан (Giant Cockroach Robot) «*Halluc II*» (рис. 16 слева) — на самом деле небольшой мобильный аппарат весом 20 кг и около 80 см в длину. Конструкция робота позволяет ему перемещаться и «на колесах», и «на лапах», а также совмещать эти способы передвижения. Программное обеспечение устройства разработано в ОС Linux.

Существуют и другие варианты колесного шагания. Например, робот *SandBot* (рис. 16 справа) имеет вращающиеся «ноги», позволяющие ему передвигаться с высокой скоростью по песку. На Луне и на Марсе большие области поверхности засыпаны толстым слоем пыли или песка, вследствие чего передвижение и, соответственно, исследование в этих областях посредством современных луно- и марсоходов весьма затруднено. Конструкция нового «*SandBot*» может стать эффективным техническим решением для выполнения подобных задач. Для создания робота, способного двигаться достаточно быстро по сыпучим средам, группа ученых во главе с Даниэлем Голдманом (Daniel Goldman) постарались симитировать способ передвижения естественных обитателей пустынь — от тараканов до ящериц.

Перемещение их конечностей оказывается очень неравномерным: пока лапка касается песка, она перемещается чрезвычайно медленно и осторожно, а как только лапка поднимается в воздух — она становится почти молниеносной. Этот подход реализован и в шестиколесном роботе SandBot: вращаясь вокруг оси, его «колеса», имеющие форму неполных спиралей (или сильно изогнутых ног) касаются песка с осторожностью, при этом в каждый момент времени на песок давят не менее 3 «колес», а остальные быстро совершают оборот в воздухе для подготовки к следующему шагу. На данный момент, после более чем года усовершенствований, робот способен развигать по глубокому песку скорость до 0,3 м/с — то есть в 15 раз быстрее современных марсоходов [39].



Рис. 17. «LegVan» и «Solero»

«*LegVan*» (рис. 17 слева) является полноценным колесно-шагающим мобильным роботом, оснащенным системой управления, датчиками и специальной системой подвески. Данный аппарат имеет определенный уровень автономности. Это означает, что он может выполнять свои функции, основываясь только на информации, поступающей с датчиков. При этом программа выбирает один из возможных алгоритмов действий в зависимости от вновь полученной информации, способной повлиять на эффективность его работы [27]. Проект «*LegVan*» был разработан компанией Wrocław University of Technology, Польша. Основной задачей робота является перемещение в пространстве путем шагания при поддержании горизонтального уровня установленной на нем платформы. Стратегия робота основана на поведенческой концепции водителя. Если во время работы происходит событие, то это событие интерпретируется ПО и осуществляется соответствующий ответ.

Solar-Powered Exploration Rover «Solero» (рис. 17 справа) — аппарат повышенной проходимости, разработанный как прототип марсианских роверов-разведчиков для демонстрации возможностей передвижения, грузоподъемности, существования, питания и управления подобными устройствами. Важной отличительной особенностью «Solero» является его способность работать почти исключительно от энергии солнечных батарей, с использованием аккумулятора только как экстремального резерва или в момент пиковой мощности. На Земле достаточно солнечной энергии для функционирования транспортных средств, работающих в таком режиме. Однако, так как Марс находится дальше от Солнца, чем Земля, мощности, получаемые при использовании энергии солнечного света, снижаются, что значительно усложняет задачу разработчиков, т.к. при таких условиях гораздо сложнее добиться того, чтобы конструкция работала и система оставалась надежной [36]. Данная модель разработана при поддержке Швейцарского федерального института технологии в Лозанне (EPFL) (CH) по контракту ESA.

## Модели данной работы

Предметы исследования данной работы — мягкая двухрычажная независимая пружинная пассивная подвеска, пневматическая активная подвеска и механум-колесо.

Механум-колесо (mecanum wheel) — колесо специальной конструкции (см. рис. 18 и [32], [41], [47]), которое может перемещаться в любом направлении по поверхности (плоскости). В зарубежной литературе его иногда называют шведским колесом или колесом Айлона в честь шведского изобретателя Бенгта Эрланда Айлона, которому принадлежат идея и патент США на эту конструкцию. Он придумал идею [32] в 1973 г., когда был инженером в шведской компании Mecanum AB. Механум-колеса являются одной из возможных моделей омни-колес (всенаправленного движения), но имеют ряд отличий, главным из которых является использование специальных роликов, установленных на ободе под углом (обычно 45 град.) к оси и

плоскости колеса. В результате меканум-колесо демонстрирует ряд специфических свойств сложной механической природы, среди которых весьма интересное — движение под углом к плоскости колеса.

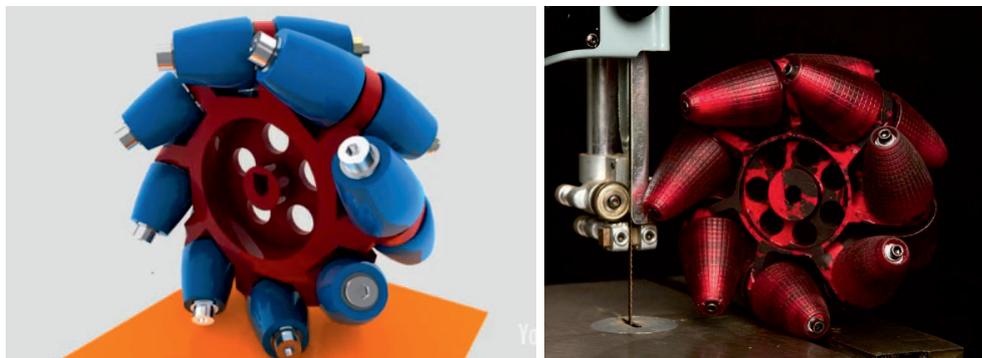


Рис. 18. Модели меканум-колес, принцип конструкции

Типичная конфигурация аппарата на меканум-колесах — четырехколесный аппарат, хотя есть и другие решения. Использование меканум-колес приводит к тому, что каждое колесо развивает тянущую силу, направленную приблизительно вдоль оси ролика, находящегося в контакте с опорой, при этом изменяя скорость и направление вращения каждого колеса можно обеспечить движение корпуса аппарата обычным для четырехколесных шасси образом, реализовать поступательное движение корпуса или произвольное его вращение и повороты. Можно создать, например, поперечное движение аппарата, комбинации движений колес позволяют строить движение в любом направлении с любым вращением. Разработано уже значительное число меканум-роботов и аппаратов [14], [20], [29], [34], [41], [47], [49]. Укажем лишь несколько коммерческих разработок.

На рис. 19 слева показан аппарат *Omni-Directional Vehicle (ODV)* для транспортировки грузов [29], разработанный лабораторией ВМС США в Панама-Сити по патенту Айлона (ВМС США купили этот патент в 1980-х, аппарат построен к 1997 г., в настоящее время находится в производстве). Аппарат используется для транспортировок в узких пространствах, например, на служебных палубах кораблей. Подобные погрузчики используются также при загрузке самолетов. На рис. 19 справа показана современная версия подобного аппарата — транспортное шасси фирмы КУКА (Германия),

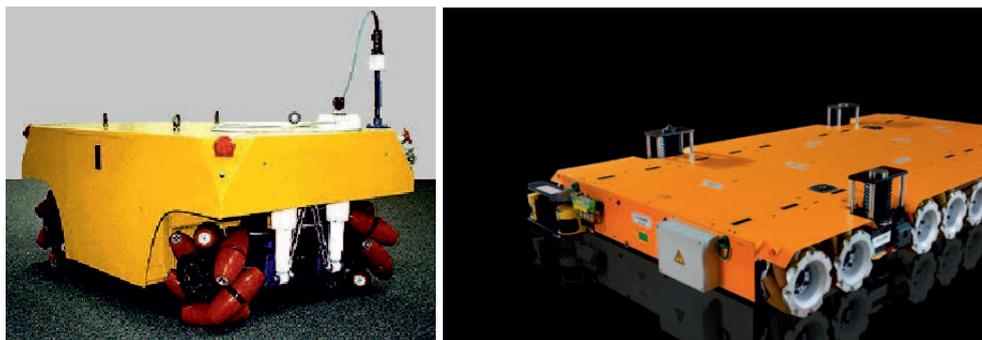


Рис. 19. Аппарат ВМС США (слева) и транспортное шасси фирмы КУКА (справа)

2011 г. [34]. На рис. 20 слева — вилочный погрузчик на механум-колесах, разработка фирмы Airtrax, ныне производится компанией Vetex (США), аппарат поставляется по Северной Америке, в Израиль и Индию [49]. Справа на рис. 20 — футуристический дизайн «машины будущего», автор концепции — дизайнер из Германии Себастьян Тодденрот, концепция получила название *Volkswagen Rescue Rover*, аппарат имеет функции всенаправленного движения, при этом способен плыть, предназначен в качестве спасательного средства [14].



Рис. 20. Погрузчик фирмы *Airtrax* (слева), концепт С. Тодденрота (справа)

При анализе динамики аппаратов на механум-колесах возникает задача исследования и точного учета движущих аппарат сил, обеспечиваемых механум-колесами. Для ее решения в ходе данной работы была создана модель в программном комплексе «Универсальный механизм». Конкретной целью разработки модели было исследование силового контактного взаимодействия колеса и роликов с опорой при разных геометрических условиях

контакта и моделях трения. Получены первые результаты, объясняющие некоторые эффекты в рассмотренной модели.

## 2 Методика исследования комфортабельности движения шестиколесного робота с пассивной независимой подвеской

Предмет исследования данной главы — мягкая двухрычажная независимая пружинная пассивная подвеска. Такую подвеску начали применять в 30-х годах прошлого века и она постоянно совершенствуется. Ее используют для задних колес как гоночных, так и обычных автомобилей, так как с ней кузов менее подвержен воздействию неровностей дороги, возможна регулировка углов развала и схождения, обеспечиваются минимальные перемещения колес (поперечные; угловые при ходе вверх и вниз). Благодаря независимому восприятию неровностей, подвеска позволяет экипажу оставаться в устойчивом состоянии, что улучшает сцепление с дорогой. Целью настоящей работы является построение модели, имеющей характеристики, приближенные к реальным. И далее, —

1. Нахождение зависимости следующих характеристик комфортабельности движения от параметров подвески:

- (a)  $R_{MS}$  (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.
- (b)  $I_1$  (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»
- (c)  $I_2$  (площадь под графиком вертикального ускорения некоторой

точки корпуса за модельное время, превышающего заданное) — предлагаемая характеристика износа.

(d)  $M_{abs}$  (максимальное вертикальное ускорение за время движения — предлагаемая характеристика возможности поломок.

2. Разработка модели блока управления, допускающей движение без поперечного крена (бокового проскальзывания).
3. Нахождение зависимости от геометрических и массово-инерционных параметров некоторых характеристик комфортабельности движения.
4. Формулировка рекомендаций по выбору геометрических и массово-инерционных характеристик аппарата и параметров подвески.

Отметим, что настоящая работа продолжает исследования адаптивных многоколесных роботов, начатые в [7].

## 2.1 Модель шестиколесного робота

Построена модель шестиколесного робота, включающая следующие 4 субмодели: модель подвески колес, модель блока управления, модель контакта колеса с дорогой, модель неровностей дороги. Моделируется движение робота с разными скоростями. Результаты представлены в виде рабочей модели робота и двумерных диаграмм, отражающих зависимость вертикальных ускорений конкретных точек корпуса от динамических характеристик аппарата. Приведенные зависимости позволяют определить характеристики подвески, минимизирующие функционалы в зависимости от вертикального ускорения точек корпуса. Опишем введенные субмодели.

## 2.2 Модель подвески

Смоделирована подвеска, обеспечивающая параллельное расположение ступицы колеса к борту корпуса (такая подвеска используется в автомобилях типа «багги»). Вид этой модели показан на рис. 21.

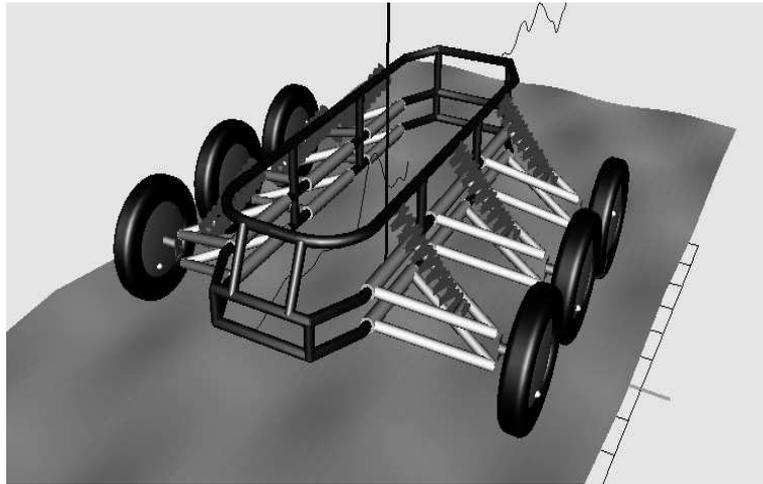


Рис. 21. Модель шестиколесного робота, построенная в программном комплексе «Универсальный Механизм» [10]

Параллельность ступицы каждого колеса и борта корпуса обеспечивают четыре цилиндрических шарнира, расположенных в углах параллелограмма подвески колеса.

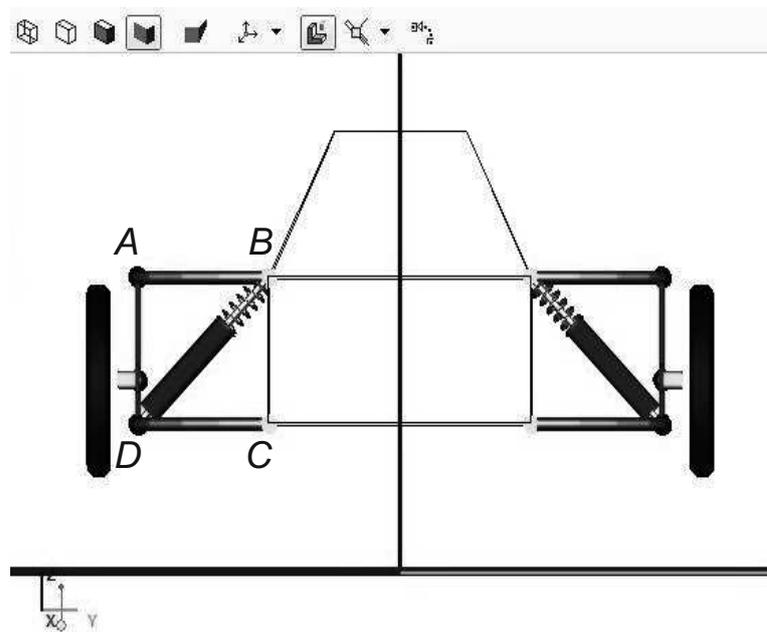


Рис. 22. Вид аппарата спереди

На рис. 22 изображена эта же модель без перспективы, вид спереди. Оказалось, однако, что эта конструкция неудобна для моделирования, так как разрезанные шарниры (A-B-C-D-A) отрицательно влияют на скорость

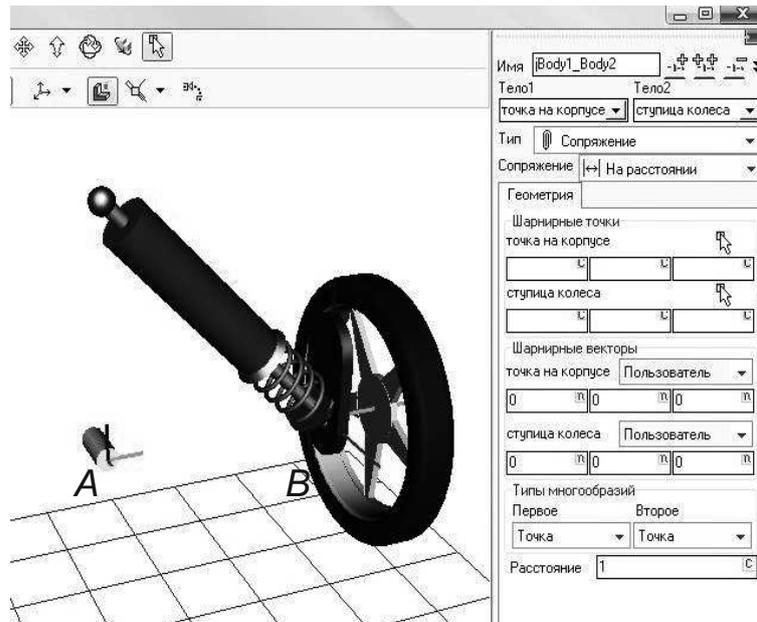


Рис. 23. Сопряжение

и точность вычислений. Так, например, при интегрировании методом Парка (PARK, Неявный метод второго порядка с переменным/постоянным шагом) погрешность достигала 10% от характерного размера подвески. Поэтому далее, чтобы избавиться от разрезанных шарниров для использования метода АБМ (Адамса-Бэшфорта-Моултона, явный метод в форме РЕСЕ прогноз-оценивание-коррекция-оценивание) принимается следующее допущение: вместо цепи из четырех шарниров вводится эквивалентная система — один шарнир и «сопряжение» — термин программного комплекса «Универсальный Механизм», описанный ниже. Шарнир между корпусом и ступицей колеса для передних и задних колес реализует 3 степени свободы: поступательные — вдоль векторов  $y$  и  $z$  и вращательную — вокруг вектора  $z$ . Для средних — 2 степени свободы: поступательные - вдоль векторов  $y$  и  $z$ . Сопряжения являются связями, то есть ограничениями на относительное положение и движение пары тел. В данном случае сохраняется расстояние между точками  $(0, 0, 0)$  корпуса и  $(0, 0, 0)$  ступицы колеса, что обеспечивает ту же кинематическую схему, то есть ступица колеса относительно корпуса движется плоскопараллельно в плоскости  $Oyz$ . Локальные системы координат здесь и далее изображены тремя перпендикулярными

отрезками: вертикальный — вдоль оси  $z$ , вдоль направления движения — ось  $x$ , дополняющий до правого трехгранника — ось  $y$ .

Также между точками  $A(0, 0, 1)$  корпуса и  $B(0, 0, 0)$  ступицы колеса (рис. 23) назначена биполярная линейная сила:  $F = -c(x - x_0) - dv$ , где  $c$  — коэффициент жесткости пружины,  $x_0$  — длина пружины в нерастянутом состоянии,  $d$  — коэффициент диссипации демпфера.

Геометрические характеристики подвески выбираются из следующих соображений:

1. Расстояние от колеса до корпуса максимизируется, так как это минимизирует (что видно из геометрических соображений) поперечный крип при работе подвески, который, в свою очередь, отрицательно влияет на износ покрышки и управляемость аппарата.
2. Расстояние между А-образными вилками (рис. 22, 23 А-В) также максимизируется, так как оно влияет на прочность конструкции.

## 2.3 Метод управления

Здесь и далее названия функций и переменных взяты из «УМ». Поэтому для ряда имен выражений сохранены «длинные» названия. Момент, контролирующий поворот управляемых колес, вводится как шарнирный момент типа «Выражение», направленный вдоль оси  $z$  на передние ступицы и вдоль  $-z$  — на задние, с общим видом

$$M = -c(x \pm s) - d(v \pm w)$$

Здесь « $-$ » соответствует передним, а « $+$ » задним колесам,  $c = cSteering$  и  $d = dSteering$  — коэффициенты жесткости и демпфирования системы управления соответственно, имеют физический смысл жесткости и демпфирования удержания рулевого колеса «блоком управления»;  $s = SteeringWheelAngle$  и  $w = dSteeringWheelAngle$  — требуемые углы поворота и угловая скорость в управляемом шарнире соответственно, которые

рассчитываются в процессе моделирования для выполнения заданных маневров. Для средних колес во вращательный шарнир, связывающий ступицу колеса с кузовом, вдоль оси  $Oy$  момент для управления скоростью продольного движения и момент для блокировки колес вводятся одновременно

$$M = m - \gamma x - \delta v,$$

где  $\gamma$  и  $\delta$  — параметры жесткости и демпфирования при блокировании колес. Управляющий скоростью движения момент вычисляется следующим образом:  $m = M_{longitudinalControl} = c_e(v_0 - v)$ , где  $v_0$  — начальная/требуемая скорость,  $c_e$  — коэффициент усиления.

Для того чтобы мгновенные центры скоростей колес находились в одной точке (что уменьшит проскальзывание и одновременно приведет к увеличению скорости интегрирования), управляемые колеса должны поворачиваться на разные углы. Эти углы рассчитываются из соображения, что при повороте углы внешних колес лежат в интервале  $(0,30)$  градусов и равны между собой, а внутренние поворачиваются на угол, обеспечивающий совпадение мгновенных центров скоростей.

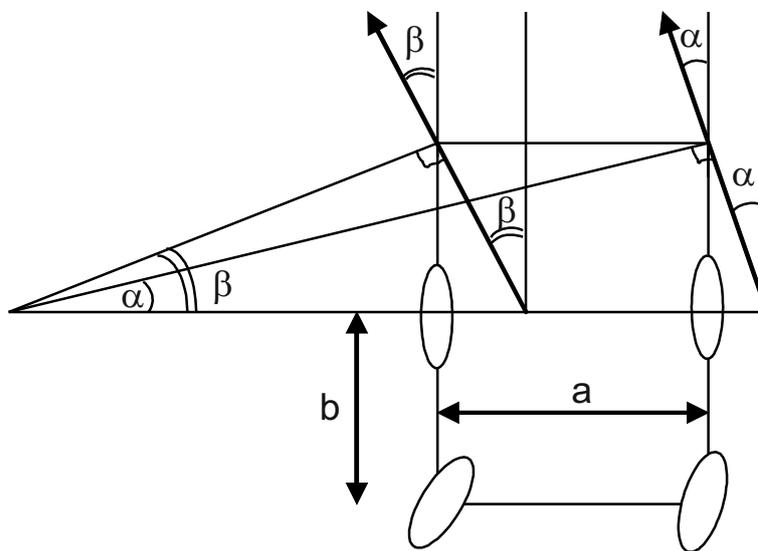


Рис. 24. Управляемые углы

Из рис. 24 видно, что при моделировании следует минимизировать отношение  $a/b$  — отношение расстояния между управляемыми колесами к

расстоянию между передними и средними. Далее, для  $a = b$ , выписано выражение угла  $\alpha$  через угол  $\beta$ :

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\operatorname{tg}\beta}{1 - \operatorname{tg}\beta}$$

Пусть

$$h(x) = \operatorname{heavi}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases},$$

$c\text{Steering} = c, \text{SteeringWheelAngle} = s, d\text{Steering} = d, d\text{SteeringWheelAngle} = w$ . Тогда управляющий момент для правого колеса

$$M = -c \left( x \pm h(s) s + h(-s) \operatorname{arctg} \left( \frac{\operatorname{tgs}}{1 + \operatorname{tgs}} \right) \right) - d \left( v \pm h(s) w + h(-s) \frac{2w}{3 + 2 \sin(2s) + \cos(2s)} \right).$$

Аналогично вычисляется момент для левого колеса. Для правого и левого поворотов выражение для управляемых углов записано одновременно при помощи функции  $\operatorname{heavi}(x)$ , в знаке « $\pm$ » берется « $-$ » для передних, а « $+$ » — для задних колес. На самом деле, управляемый «Универсальным механизмом» угол  $\alpha \neq \text{SteeringWheelAngle} = s$ ;  $\alpha$  — угол «воображаемого колеса», расположенного посередине между передними колесами, а именно

$$\alpha = h(s) \operatorname{arctg} \left( \frac{2 \sin s}{\cos s \left( 2 + \frac{\sin s}{\cos s} \right)} \right) + h(-s) \operatorname{arctg} \left( \frac{2 \sin s}{\cos s \left( 2 - \frac{\sin s}{\cos s} \right)} \right),$$

но в данной работе для уменьшения времени интегрирования это различие считается малым. Чтобы показать зависимости угла и угловой скорости колеса от времени проведен эксперимент — «поворот рулевого колеса на месте» с амплитудой 0,52 радиан, и частотой 0,25 герц. На рис. 25 изображены углы, на рис. 26 — угловые скорости левого и правого колес (проекция на вертикальную ось колеса относительно корпуса в системе координат корпуса).

В качестве блока управления используются две модели.

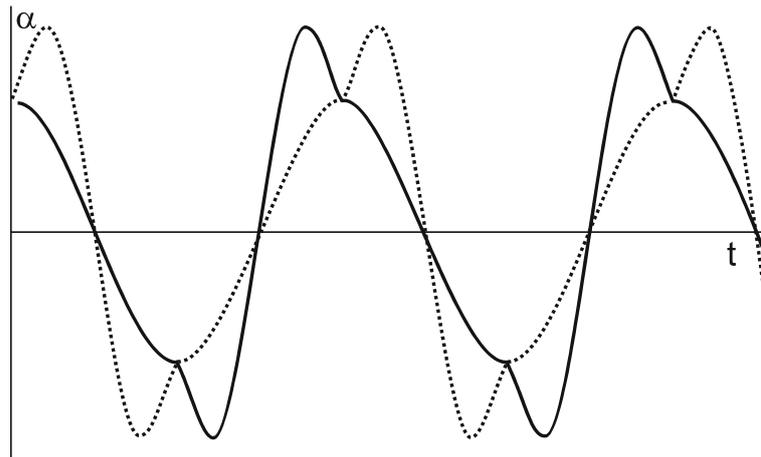


Рис. 25. Углы правого и левого колеса в зависимости от времени

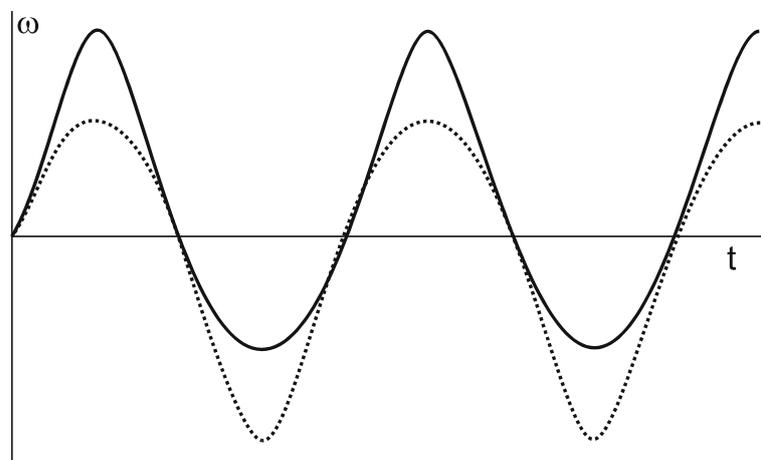


Рис. 26. Угловые скорости правого и левого колеса в зависимости от времени

1. Управление без обратной связи. Профиль продольной скорости и рулевого управления задается в файле «УМ».
2. Модель МакАдама, описанная ниже.

Модель МакАдама является одной из наиболее эффективных и распространенных компьютерных моделей блока управления [15]. В основе модели лежат упрощенные линейные уравнения движения автомобиля с двумя степенями свободы. Угол поворота рулевого колеса выбирается из условий минимизации отклонения прогнозируемой траектории экипажа от заданной желаемой траектории. Эта модель значительно быстрее интегрируется, в отличие от модели с прогнозированием второго порядка, и дает

возможность исследовать влияние подвески на управляемость аппарата.

Управление  $u$  (желаемое значение угла поворота колеса) является кусочно-постоянной функцией. Рассматривается экипаж в момент времени  $t_k$ , для которого рассчитывается очередное значение управления. Не нарушая общности полученных ниже решений, положим  $t_k = 0$ . Вводится инерциальная система координат (СК)  $O_v X_v Y_v$ , связанная с текущим положением экипажа. Начало отсчета этой СК совпадает с текущим положением середины передней оси автомобиля, ось абсцисс — с продольной осью экипажа.

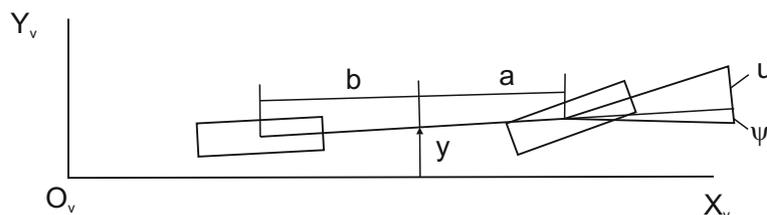


Рис. 27. Упрощенная модель автомобиля

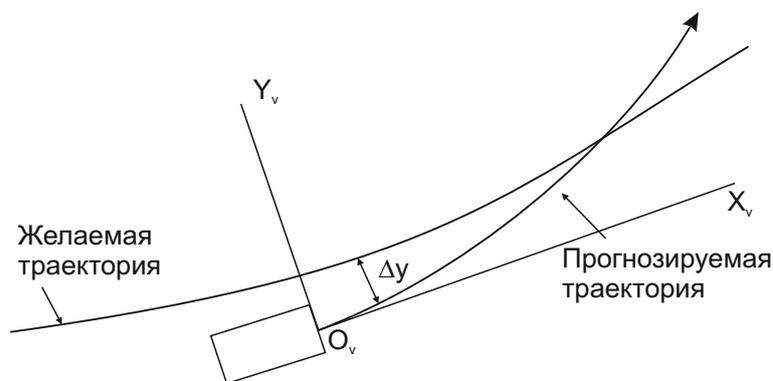


Рис. 28. Прогнозируемая и желаемая траектория

При заданном значении угла поворота  $u$  (рис. 27) управляемого колеса упрощенная модель автомобиля имеет две степени свободы: поперечное отклонение центра масс  $y$  и угол поворота вокруг вертикальной оси  $\psi$ . Данная модель подробно рассмотрена в работе И.В. Новожилова, И.С. Павлова [4]

Согласно материалам Д.Ю. Погорелова, приведенным в [10], линейные уравнения движения в этих переменных имеют вид

$$\dot{y} = v_x \psi + v_y,$$

$$\begin{aligned}\dot{\psi} &= \omega_z, \\ M \dot{v}_y &= -\frac{C_f + C_r}{v_x} \dot{y} + \left( \frac{C_r b - C_f a}{v_x} - M v_x \right) \omega_z + C_f u, \\ I_z \dot{\omega}_z &= \frac{C_r b - C_f a}{v_x} \dot{y} - \frac{C_f a^2 + C_r b^2}{v_x} \omega_z + C_f a u.\end{aligned}$$

Здесь  $v_x, v_y$  — проекции скорости центра масс на продольную и поперечную оси экипажа;  $\omega_z$  — угловая скорость относительно вертикальной оси;  $a, b$  — расстояния от центра масс до передней и задней осей соответственно;  $M, I_z$  — масса и момент инерции экипажа относительно вертикальной оси;  $C_f, C_r$  — приведенные (суммарные) коэффициенты сопротивления боковому уводу передних и задних колес. Наблюдаемой величиной является поперечная координата центра передней оси, определяемая выражением  $y_\nu = y + a\psi$ .

Эти уравнения являются линейными с постоянными коэффициентами и могут быть записаны в матричной форме.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu, \\ y_\nu &= C^T x, \\ A &= \begin{pmatrix} 0 & v_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{C_f + C_r}{M v_x} & \frac{C_r b - C_f a}{M v_x} - v_x \\ 0 & 0 & \frac{C_r b - C_f a}{I_z v_x} & -\frac{C_f a^2 + C_r b^2}{I_z v_x} \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} y \\ \psi \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix}, \\ B &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{C_f}{M} \\ \frac{C_f a}{M} \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

Общее решение системы уравнений с учетом предположения  $u = const$  имеет вид

$$\begin{aligned}x(t) &= e^{At} x_0 + u \int_0^t e^{A\tau} B d\tau, \\ y_\nu &= F(t) x_0 + g(t) u\end{aligned}$$

Здесь  $x_0$  — матрица-столбец начальных условий, а также введены матрица – строка  $F(t)$  размером  $1 \times 4$  и скалярная функция  $g(t)$

$$F(t) = Ce^{At}, g(t) = \int_0^t F(\tau)Bd\tau$$

Фундаментальная матрица системы уравнений  $e^{At}$  может быть получена численным решением дифференциальных уравнений с единичной матрицей в качестве начальных условий, т.е.  $i$ -й столбец этой матрицы есть решение системы дифференциальных уравнений с начальными условиями  $x_i = 1, x_j = 0, i \neq j$ . Более экономичный метод расчета фундаментальной матрицы, с точки зрения числа арифметических операций, основан на определении собственных векторов и собственных значений матрицы  $A$ .

Пусть  $y_d(t)$  — уравнение желаемой траектории. Определим управление  $u$ , минимизирующее отклонение прогнозируемой траектории  $\Delta y(t) = y_d(t) - y_v(t)$  от желаемой на интервале времени прогноза  $T_p$ . В качестве функционала, характеризующего отклонение, рассматривается выражение

$$J(u) = \int_0^{T_p} (\Delta y(\tau))^2 d\tau = \int_0^{T_p} (y_d(\tau) - F(\tau)x_0 - g(\tau)u)^2 d\tau$$

Искомое управление получается из уравнения

$$\frac{dJ}{du} = 2 \int_0^{T_p} (y_d(\tau) - F(\tau)x_0 - g(\tau)u) g(\tau) d\tau = 0$$

$$2 \int_0^{T_p} (y_d(\tau) - F(\tau)x_0) g(\tau) d\tau - 2u \int_0^{T_p} (g^2(\tau)) d\tau = 0$$

или

$$u = \frac{\int_0^{T_p} (y_d(\tau) - F(\tau)x_0) g(\tau) d\tau}{\int_0^{T_p} (g^2(\tau)) d\tau}$$

Полученное решение можно упростить, заменяя интегралы конечными суммами. Для этого интервал прогноза  $T_p$  разделяется на  $N$  подынтервалов равной длины. На каждом из них:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n (y_d(t_i) - F(t_i)x_0)g(t_i)}{\sum_{i=1}^n g^2(t_i)}, t_i = \frac{iT_p}{N}.$$

## 2.4 Модель контакта колеса с дорогой

Модели контактных сил позволяют по параметрам колеса (вертикальная жесткость, демпфирование и др.) и по известным кинематическим параметрам шины (продольный и поперечный крив, угол развала и др.) в каждый момент времени, рассчитанным внутри программы моделирования, получить значения сил и моментов, действующих в контакте между колесом и дорогой. Известно достаточно большое количество моделей контактных сил. В настоящей работе используется модель «Магическая Формула Пасейки» (Pacejka Magic Formula) [43]. Общий вид кривых для Магической Формулы (Magic Formula, MF) приведен на рис. 29.  $Y(x) = D \sin(C \arctg(Bx - E(Bx - \arctg(Bx)))) + S_v, x = X + S_h$ , где  $Y(x)$  может быть продольной ( $F_x$ ) или поперечной ( $F_y$ ) силой или восстанавливающим моментом ( $M_z$ ), а  $X$  - продольный (для  $F_x$ ) или поперечный ( $F_y, M_z$ ) крив. В соответствии с [12], [13], коэффициенты Магической формулы есть функции вертикальной нагрузки на колесо  $F_z$  и угла развала  $\gamma$ .

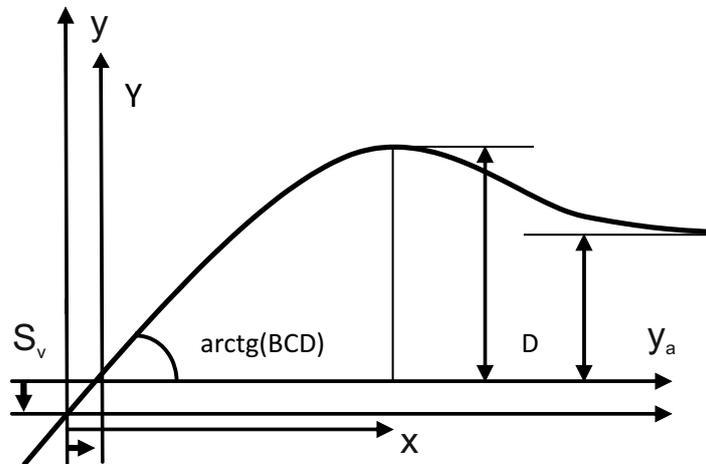


Рис. 29. Магическая формула Пасейки

Продольная сила  $F_x$

$$C = b_0, D = F_z (b_1 F_z + b_2), B = \frac{1}{CD} (b_3 F_z^2 + b_4 F_z) e^{-b_5 F_z}, E = b_6 F_z^2 + b_7 F_z + b_8, S_h = b_9 F_z + b_{10}, S_v = b_{11} F_z + b_{12}.$$

Поперечная сила  $F_y$

$$C = a_0, D = F_z (a_1 F_z + a_2), B = \frac{1}{CD} a_3 \sin \left( a_{15} \arctg \left( \frac{F_z}{a_4} \right) \right) (1 - a_5 |\gamma|),$$

$$E = a_6 F_z + a_7, S_h = a_8 \gamma + a_9 F_z + a_{10}, S_v = (a_{11} F_z + a_{12}) \gamma F_z + a_{13} F_z + a_{14}$$

Направляющий момент  $M_z$

$$C = c_0, D = F_z (c_1 F_z + c_2), B = \frac{1}{CD} (c_3 F_z^2 + c_4 F_z) (1 - c_6 |\gamma|) e^{-c_5 F_z},$$

$$E = (c_7 F_z^2 + c_8 F_z + c_9) (1 - c_{10} |\gamma|), S_h = c_{11} \gamma + c_{12} F_z + c_{13}, S_v = (c_{14} F_z^2 + c_{15} F_z) \gamma + c_{16} F_z + c_{17}$$

Использование этих формул требует определения коэффициентов  $a_0 \dots a_{15}, b_0 \dots b_{10}, c_0 \dots c_{17}$ , на основе экспериментальных данных. Значения, принятые в «УМ», взяты в соответствии с [17]:  $b_0 = 1.65, b_1 = -2.13, b_2 = 1144, b_3 = 49.6, b_4 = 226, b_5 = 0.69, b_6 = -0.006, b_7 = 0.056, b_8 = 0.486, b_9 = 0, b_{10} = 0, c_0 = 2.4, c_1 = -2.72, c_2 = -2.28, c_3 = -1.86, c_4 = -2.73, c_5 = 0.11, c_6 = 0.03, c_7 = -0.07, c_8 = 0.643, c_9 = -4.04, c_{10} = 0.03, c_{11} = 0.015, c_{12} = 0, c_{13} = 0, c_{14} = -0.066, c_{15} = 0.945, c_{16} = 0, c_{17} = 0$

## 2.5 Модель неровностей дороги

В качестве неровностей взята базовая поверхность пакета «УМ» «Булыжник в удовлетворительном состоянии», растянутая по вертикали, чтобы максимальные «кочки» достигали четверти радиуса колеса.

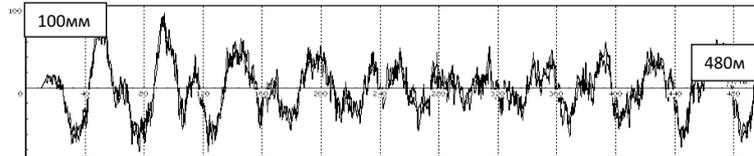


Рис. 30. График неровностей

На графике (рис. 30) по оси абсцисс отложено расстояние вдоль дороги в метрах, по оси ординат — высота «кочки» в миллиметрах.

## 2.6 Построение списка экспериментов

Параграфы 1-5 посвящены построению модели, далее же описана технология зондирования многомерного пространства параметров аппарата. Проведены следующие серии экспериментов. В данной работе выбрана равномерная сетка. Эксперименты проводились при помощи «УМ сервер –

кластера» и соответствующих «клиентов», установленных на 5 ЭВМ. За 1 час на четырех компьютерах проведено 154 вычислительных эксперимента, с модельным временем по 12 секунд каждый.

Построены две серии экспериментов:

1. Коэффициент жесткости пружины —  $10^4$  кг/с<sup>2</sup>. Коэффициент диссипации 120 кг/с. Масса экипажа — 57–95 кг Скорость — 3–12 м/с
2. Скорость — 8,3 м/с. Масса экипажа — 76 кг. Коэффициент жесткости пружины —  $10^3$ – $1,5 \cdot 10^4$  кг/с<sup>2</sup>. Коэффициент диссипации — 0–120 кг/с.

Вид модели аппарата с учетом описанных выше допущений показан на рис. 31.

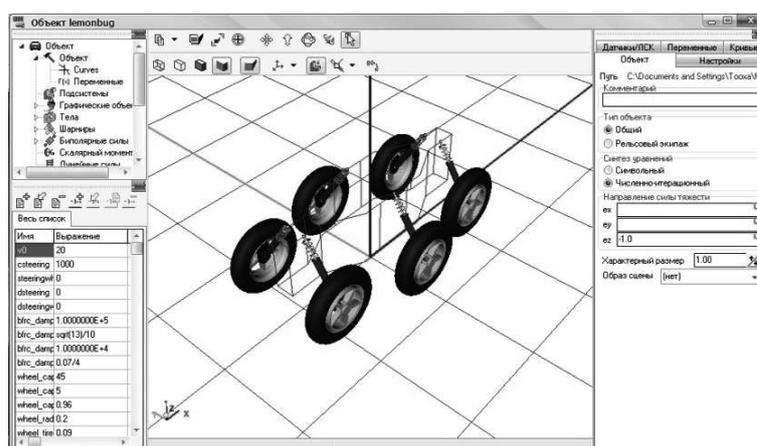


Рис. 31. Вид модели аппарата

Отношение расстояния между передними колесами к расстоянию между передней и средней осями равно единице. Так как в модели аппарата отсутствует стабилизатор поперечной устойчивости, являющийся существенной частью подвески автомобиля, расстояние между средними колесами увеличено, чтобы компенсировать его отсутствие.

Исследуются описанные выше функционалы от модуля вертикального ускорения точки  $(0, 0, 0)$  корпуса робота:

1.  $R_{MS}$  — общепринятая (ISO 2631) характеристика качества подвески,

с увеличением которой резко растет беспорядочность сил, что приводит к большим погрешностям системы управления и т.п.

2.  $I_1$  — характеристика комфортабельности для человека. Минимальное значение ускорений, на которое реагирует вестибулярный аппарат, или порог раздражения, различно для разных людей и меняется в зависимости от продолжительности действия ускорения. Средние значения порога раздражения следующие:  $0,11-0,12 \text{ м/с}^2$  для линейных колебаний и  $20 \text{ л/с}^2$  для угловых при продолжительности действия  $0,8 \text{ с}$ , а при продолжительности действия  $0,22 \text{ с}$  —  $800 \text{ л/с}^2$ . При этом произведение ускорения на латентный период реакции вестибулярного аппарата постоянно. В РФ принят ГОСТ 31319-2006 «Вибрация. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека»
3.  $I_2$  — предлагаемая характеристика износа.
4.  $M_{abs}$  — предлагаемая характеристика возможности выхода из строя автоматики и соединительных узлов, например, механические поломки при перегрузках.

## 2.7 Структуризация и анализ результатов

Построена отдельная упрощенная модель (корпус с одним колесом связан пружиной с гасителем), зависимость модуля вертикального ускорения точки  $(0,0,0)$  корпуса от скорости движения приведена на рис. 32. По оси абсцисс отложена скорость, по оси ординат — модуль вертикального ускорения. Зависимость максимума модуля (огibaющая) вертикального ускорения от скорости почти квадратичная.

Для всего экипажа зависимость от скорости и массы среднеквадратичного отклонения (далее  $R_{MS}$ ) модуля вертикального ускорения приведена на рис. 33. Значения справа (масса одного колеса) соответствуют равномерному изменению массы экипажа от  $57 \text{ кг}$  до  $95 \text{ кг}$ . Зависимость  $R_{MS}$

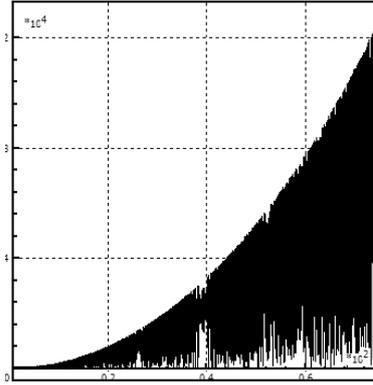


Рис. 32. Зависимость модуля вертикального ускорения от скорости (для одного колеса)

от массы несущественна. При скоростях более 13 м/с происходит переворот аппарата, чем и объясняются случайные малые значения функционала  $R_{MS}(|a|)$ . Срезы по массе могут быть приближены квадратичной функцией от скорости, погрешность приближения объясняется поперечной и продольной качкой экипажа, поэтому дерево экспериментов строится при постоянной скорости, обеспеченной блоком управления (см. п. 2.3), и постоянной массе. Рядом с диаграммами приведенными на рис. 33, 34, 35, 36, 37 указаны значения функционалов, слева приведены их названия.

В качестве характеристики подвески исследуется функционал  $R_{MS}$  (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 ускорения некоторой точки корпуса. Этот функционал соответствует «комфортабельности движения».

Если аппарат не предназначен для перевозки людей, как в данной работе, то кроме частоты колебаний также важно исследовать  $I_1$  (рис. 35) и  $I_2$  (рис. 37) — интеграл от среза вертикального ускорения, реализованного функцией

$$S(a) = \left(\frac{1}{\pi} \operatorname{arctg}(10(a - l)) + 0.5\right)a,$$

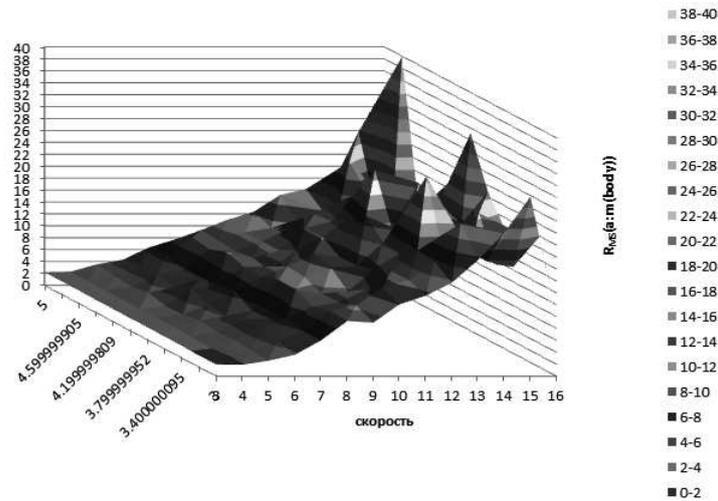


Рис. 33. Зависимость от скорости и массы

где  $a$  — модуль вертикального ускорения,  $l$  — величина, ниже которой ускорения не учитываются. Этот параметр нужен для учета ускорений, превышающих допустимые значения. Четвертый приведенный функционал  $M_{abs}$  (максимальное вертикальное ускорение за время движения) показывает, может ли аппарат проехать по данной поверхности без повреждений.

На рис. 34 левая изолиния (левее  $L_1$ ) соответствует столкновению корпуса робота с поверхностью. Правая граница близка к области, где экипаж переворачивается, но значения функционала на ней уже достаточно велики, поэтому нет смысла проводить эксперименты за ее пределами. За верхней границей находятся неправдоподобные с технической точки зрения значения коэффициента диссипации.

В зависимости от желаемых ускорений и границ безопасности с точки зрения переворота и удара о землю, оптимальные значения коэффициентов жесткости и диссипации следует выбирать на изолинии  $L_i$  функционалов  $R_{MS}, I_1, I_2, M_{abs}$ .

Как можно увидеть на всех диаграммах, области приемлемых значений характеристик подвески являются незамкнутыми.

Нулевые значения на правой границе, соответствующие минимальным значениям коэффициента жесткости, возникают из-за остановки эксперимента (нижняя часть корпуса коснулась земли). Функционал максимума

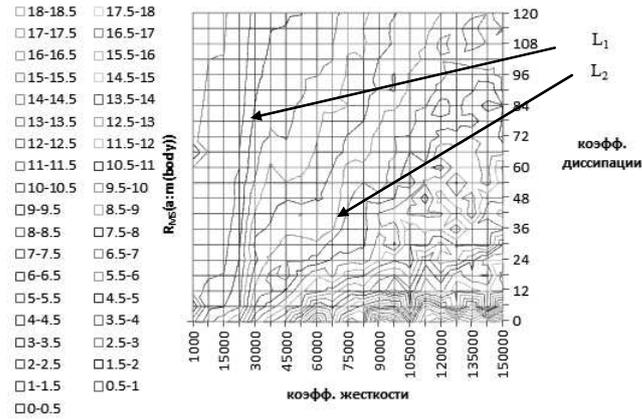


Рис. 34.  $L_1$  — граница зоны безопасности,  $L_2$  — граница зоны «хороших» значений  $R_{MS}$ . Функционал  $R_{MS}(|a|)$  от коэффициентов жесткости и диссипации

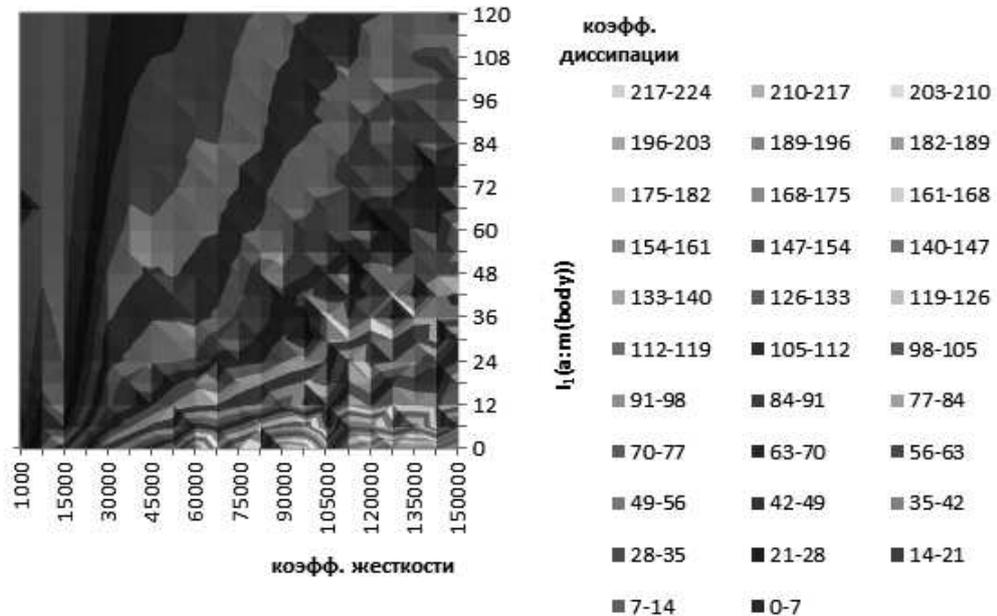


Рис. 35. Функционал  $I_1(|a|)$  от коэффициентов жесткости и диссипации

модуля вертикального ускорения имеет самое наглядное значение, так как часто его величина указана в техническом руководстве к аппаратуре, установленной на корпусе. На этой диаграмме больше хаотичности, так как  $M_{abs}(|a|)$  — случайная величина с большей дисперсией, чем остальные, но и на ней видны те же закономерности, что и на предыдущих функционалах, что показывает эффективность использованных методов моделирования. С

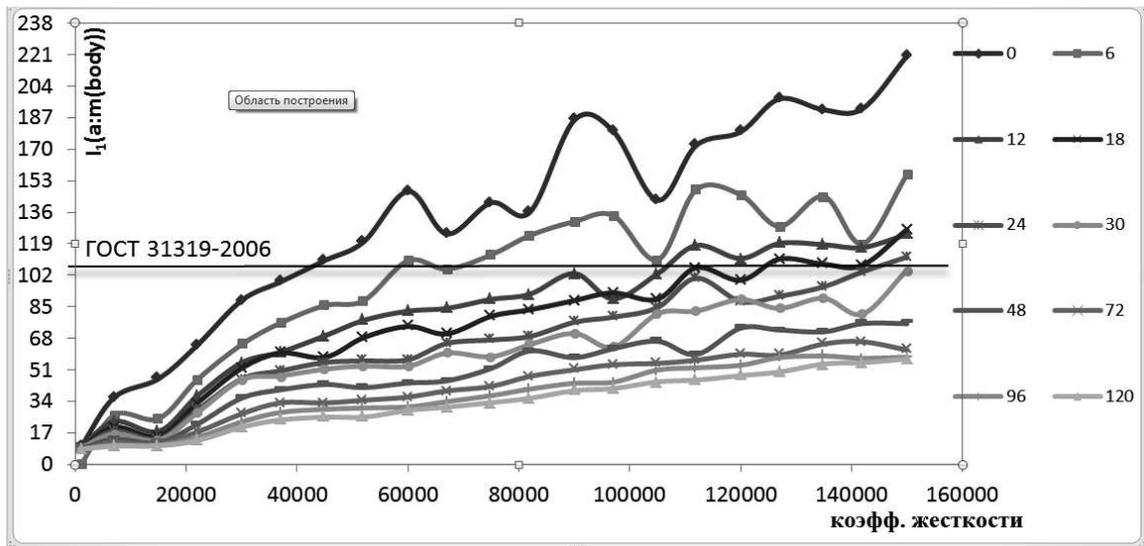


Рис. 36. Проекция функционала  $I_1(|a|)$  параллельно оси коэффициента демпфирования

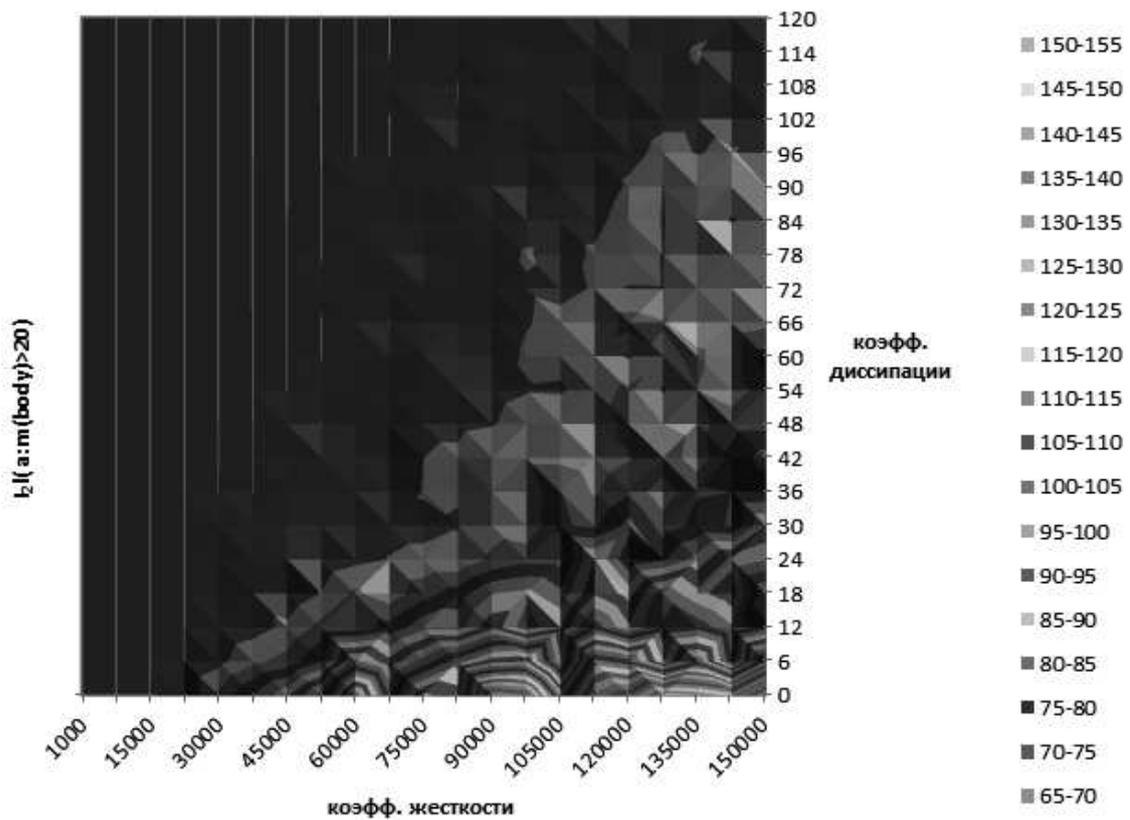


Рис. 37. Функционал  $I_2(|a|)$  от коэффициентов жесткости и диссипации

другой стороны, при выборе оптимальных характеристик подвески следует учитывать и другие факторы, не учтенные в данной работе, как например сцепление с дорогой, влияющее на управляемость аппарата.

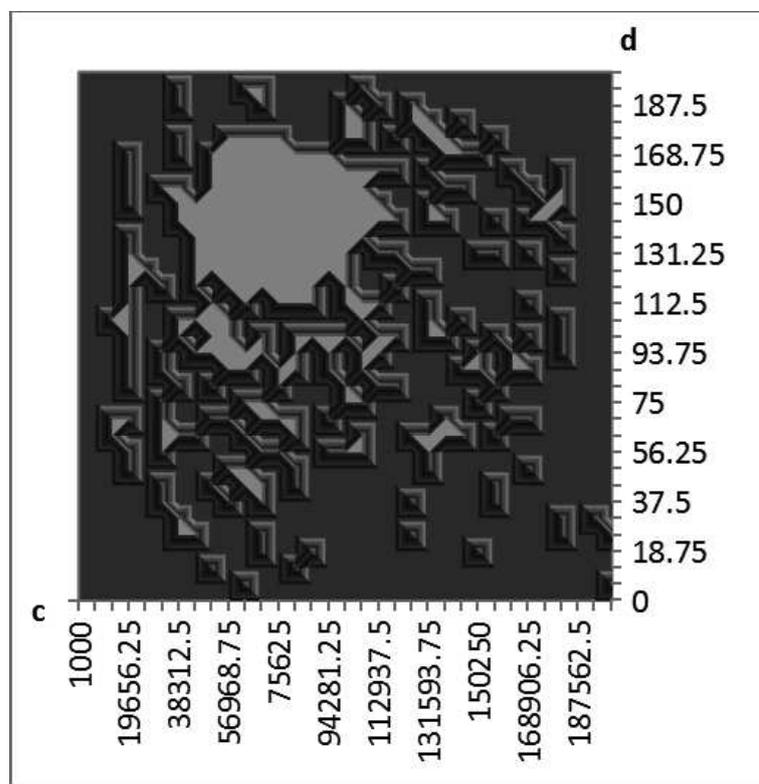


Рис. 38. Область оптимальных параметров устойчивости (без отрыва) на траектории

На рис. 38 приведена диаграмма индикатора пройденного пути по  $\sigma$ -образной траектории с управлением МакАдама. Скорость экипажа — 9 м/с. Видна замкнутая область параметров  $c$  и  $d$ , в которой аппарат проехал всю траекторию не перевернувшись. Приблизительно в центре масс этой области функционал  $J(u) = \int_0^T (y(\tau))^2 d\tau$ , где  $y_d(t) - y_v(t) = \Delta y(t)$  — отклонение прогнозируемой траектории  $y_v(t)$  от желаемой  $y_d(t)$  на интервале времени прогноза  $T_p$ , достигает своего минимума. Эта область лежит в области оптимальных для комфортабельного движения параметров диаграмм рис. 33 – рис. 37. Таким образом, Характеристики подвески следует выбирать в центре масс этой области.

## 2.8 Основные заключения о пассивной подвеске

За сравнительно небольшое время проведено большое количество экспериментов, позволяющих определить зависимость динамических характеристик комфортабельности движения от характеристик пассивной подвески. Эксперименты с созданной методикой моделирования показывают, что данная модель успешно может быть использована для определения оптимальных значений параметров робота в зависимости от функционала качества. По наиболее важному в конкретной задаче функционалу на соответствующей диаграмме выбирается область приемлемых значений характеристик подвески.

1. Построена модель, имеющая характеристики, приближенные к реальным, и при этом минимизирующая время проведения каждого эксперимента. Найдена зависимость характеристик комфортабельности движения от параметров подвески.
2. В модели двухрычажной подвески разработаны методические приемы, позволяющие оптимизировать процессы интегрирования.
3. 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 поперечный крив возможен на неровной поверхности, так как при его отсутствии не действует подвеска.
4. Найдены зависимости таких характеристик комфортабельности движения как:
  - среднеквадратичное отклонение вертикального ускорения заданной точки корпуса — общепринятая (ISO 2631) характеристика качества подвески.
  - интеграл вертикального ускорения заданной точки корпуса — характеристика комфортабельности для человека. ГОСТ 31319-

2006 «Вибрация. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека» (для человека допускается в среднем  $4,5 \text{ м/сек}^2$  за период не более 8 часов).

- интеграл вертикального ускорения при превышении им заданной величины — предлагаемая характеристика износа.

По полученным диаграммам можно выбирать динамические характеристики экипажа, позволяющие минимизировать приведенные функционалы вертикального ускорения.

5. В работе сформулированы следующие рекомендации по выбору геометрических характеристик аппарата: Длину рычага (А-образной вилки) подвески следует максимизировать, что увеличит ход подвески и уменьшит поперечный крив, неблагоприятно влияющий на управляемость аппарата. Отношение расстояния между управляемыми колесами к расстоянию между передними и средними (средними и задними) следует минимизировать, что уменьшит максимальный угол поворота управляемых колес. Расстояние между средними колесами для предотвращения переворота экипажа следует максимизировать. Например, для работа с массой  $75 \text{ кг}$  и длиной  $95 \text{ см}$ , если максимум ускорения не должен превышать  $24 \text{ м/с}^2$  оптимальными коэффициентами подвески будут: коэффициент жесткости —  $82500 \text{ кг/с}^2$ , коэффициент диссипации —  $66 \text{ кг/с}$ .

Также при выборе характеристик подвески можно воспользоваться диаграммой  $H_k$ , построенной для разработки конкретной модели из приведенных выше диаграмм, методом, подобным методу весовых коэффициентов. Назначить вес ( $m_1, m_2, m_3, m_4$ ) каждой характеристике комфортабельности, сложить обезразмеренные 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.

$$H_k = m_1 \overline{I_1} + m_2 \overline{I_2} + m_3 \overline{R_{MS}} + m_4 \overline{M_{abs}},$$

где  $m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = 1$ . Зависимость функционалов «качества» подвески от скорости близка к квадратичной.

### 3 Управление движением шестиколесного робота с меканум-колесами

Как показано в главе 2, управление вышеописанным аппаратом плохо реализуется поворотом передних и задних колес. Кроме того, реализация подобного типа управления существенно увеличивает вес и стоимость аппарата, а также уменьшает его надежность. Реализация поворотов исключительно в режиме проскальзывания, как это происходит на большинстве шестиколесных аппаратов, неэкономична в смысле энергетике и затруднена в случае хорошего сцепления с дорогой. В качестве решения данной проблемы используются колеса специального типа — «меканум-колеса» [32], позволяющие роботу совершать всенаправленные движения.

#### 3.1 Математическая модель меканум-колеса

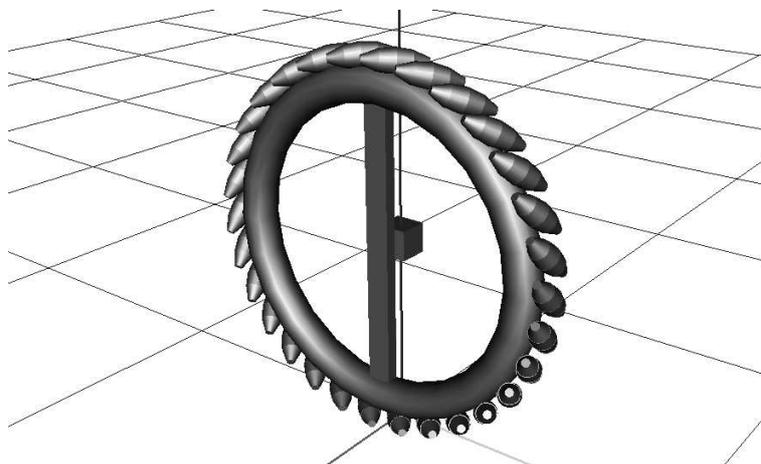


Рис. 39. Меканум колесо в «Универсальном механизме»

Модель построена в программном комплексе «Универсальный механизм». С помощью препроцессора, описанного в разделе 3, синтезируется колесо с закрепленными на нем роликами. В качестве параметров колеса

выбираются следующие: радиусы колеса  $R$  и ролика  $r$ , массы обода  $M$  и ролика  $m$ , ширина ролика, количество контактных окружностей, а также угол поворота  $\alpha$  ролика относительно обода и форма ролика. Также выбираются коэффициенты контактной силы в точках контакта ролика с поверхностью, и коэффициенты контактной силы в шарнире между роликом и ободом.

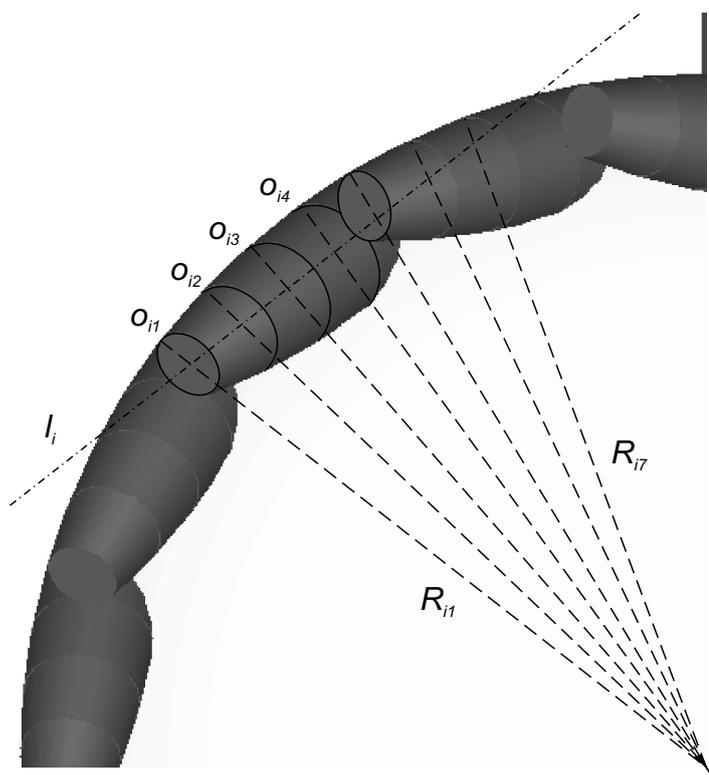


Рис. 40. Контактные окружности

При построении модели каждый ролик заменяется некоторым числом контактных окружностей  $o_{ij}$  с центрами на оси  $l_i$  ролика, лежащих в параллельных плоскостях, перпендикулярных этой оси. Промежутки между плоскостями контактных окружностей равны, а радиусы уменьшаются от центра ролика. На рис. 40 каждому ролику соответствует 7 контактных окружностей, а  $i$  является номером контактного ролика.  $R_{ij}$  является максимумом расстояния от центра колеса  $O$  до точки, лежащей на проекции  $j$ -той контактной окружности на плоскость рисунка.

Радиусы контактных окружностей выбираются одним из двух способов. Первый подробно описан в разделе, посвященном препроцессору, где

ролик является поверхностью вращения вокруг  $l_i$  дуги окружности радиуса  $R = \max(R_{ij})$  с центром в точке  $O$ , лежащей в плоскости  $p_i$ , проходящей через центр колеса  $O$  и прямую  $l_i$ . Угол между плоскостью рисунка и плоскостью  $p_i$  есть «угол поворота ролика»  $\alpha$ , одинаковый для всех роликов. Во втором реализованном варианте ролик «эллиптического типа» является поверхностью вращения вокруг  $l_i$  дуги эллипса с центром в точке  $O$  и полуосями  $R, \frac{R}{\cos \alpha}$ , где большая полуось параллельна  $l_i$ , лежащей в плоскости  $p_i$ . Во втором случае все  $R_{ij}$  будут равны, так как проекция эллипса с полуосями  $R, \frac{R}{\cos \alpha}$ , лежащего в плоскости  $p_i$ , на плоскость рисунка будет окружностью радиуса  $R$ . Вторым способом был реализован, чтобы при увеличении числа контактных окружностей минимизировать перемещение центра колеса вдоль оси  $z$  во время движения. Во время движения центр колеса никогда не движется по прямой, эти колебания малы, но влияют на динамику модели.

Таким образом, в каждый момент времени, в зависимости от конфигурации роликов, колесо может касаться поверхности одной или двумя контактными окружностями одного ролика и одновременно одной или двумя окружностями другого ролика, а «пятно» контакта в данном случае состоит из комбинации от одного до четырех отрезков. Во время движения геометрический центр пятна перемещается вдоль оси колеса. При некоторых значениях параметров взаимодействия контактных окружностей с поверхностью и конфигурациях массово-инерционных и геометрических характеристик роликов в контакт с поверхностью может входить как более двух контактных окружностей одного ролика, так и более двух роликов одновременно. Эти случаи пока не рассматриваются. Контактное взаимодействие здесь реализовано в виде податливого контакта, при котором точки контактной окружности (или окружностей) проникают в поверхность, по которой движется колесо. Во время контакта рассчитываются две силы: нормальная реакция  $N$ , упруго-диссипативно зависящая от глубины и скорости прохождения точек контактной окружности в плоскость, и контактная сила  $F$ , лежащая в касательной плоскости. Для нормальной реакции используется линейная вязкоупругая модель, а касательная сила вычисля-

ется 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  $\nu$  — нормаль к поверхности,  $\Delta z$  — глубина внедрения,  $c$ ,  $k$  — параметры поверхности,  $v$  — скорость проскальзывания,  $f$  — коэффициент трения,  $v_f$  — достаточно малая величина.

## 3.2 Построение модели колеса. Препроцессинг



Рис. 41. Изображение модели механум-колеса в программном комплексе САПР SolidWorks

Целью этого раздела является описание программы, которая позволила автоматизировать процесс создания параметрической модели механум-колеса (рис. 41) по заданным входящим параметрам.

При сохранении модели создается отдельный каталог, в котором хранятся файлы, описывающие модель. В каталоге хранения модели основным является файл `input.dat` — это обычный текстовый файл, внутри которого на скриптовом языке описана структура модели. Программа должна автоматически генерировать подобный файл для заданных параметров модели.

Профилем ролика является дуга эллипса с соотношением полуосей  $1 : \cos \alpha$ . На этом ролике синтезируются контактные окружности. Для

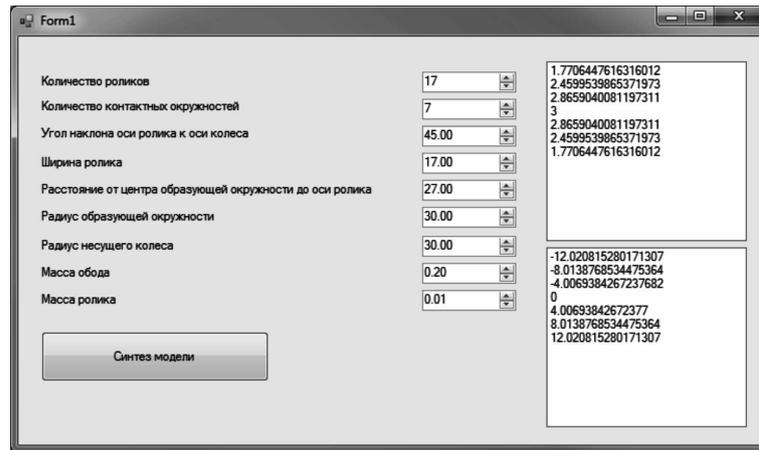


Рис. 42. Главное окно программы препроцессора

нахождения параметров этих окружностей профиль ролика приближается при помощи ломаной, состоящей из  $(k - 1)$  отрезков, где  $k$  — количество контактных окружностей на одном ролике. Точки контакта ролика с поверхностью располагаются на этих окружностях. Окружности соответствуют вершинам ломаной.

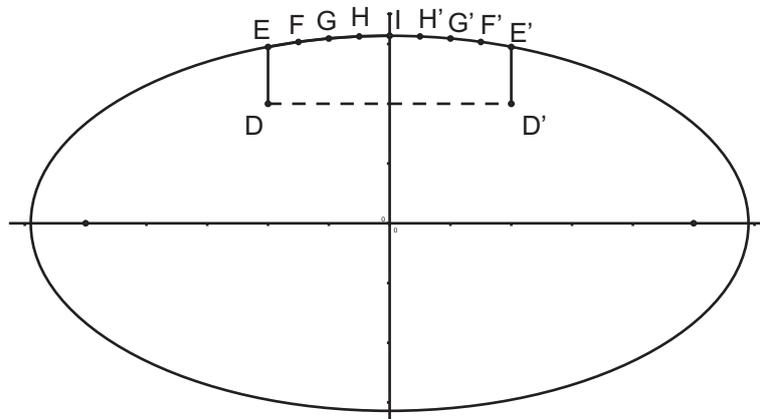


Рис. 43. Схема построения профиля ролика для  $k = 9$

При повороте ломаной  $EFGH I H'G'F'E'$  (рис. 43) вокруг оси вращения ролика  $DD'$  получается поверхность, аппроксимирующая ролик. Ее образ используется в Универсальном Механизме. Этот образ представляется как набор усеченных конусов составленных друг на друга.

Для примера возьмем  $k = 3$ ,  $\alpha = 45^\circ$ , при этом ломаная состоит из двух отрезков. Абсцисса  $x_i$   $i$ -ой вершины ломаной принимает значения

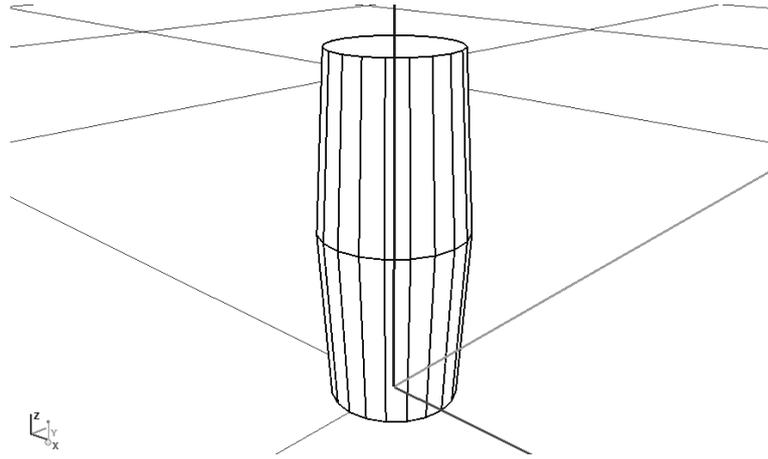


Рис. 44. Для  $k = 3$  графический образ ролика состоит из двух усеченных конусов

$x_i = \{-h/2; 0; h/2\}$ , где  $h$  — ширина ролика. На рис. 44 границы оснований конусов совпадают с тремя контактными окружностями. Все  $x_i$  подставляются в уравнение эллипса  $\frac{x^2}{2a^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1$ , и, с учетом положения оси вращения ролика  $DD'$ , получаются радиусы  $R_i$  контактных окружностей, которые соответствуют вершинам ломаной. На рис. 42 в верхнем правом поле находятся координаты  $y_i$ , в нижнем правом —  $x_i$  точек  $FGHIH'G'F'$  при  $k = 7$ .

После добавления графических образов создается нужное количество твердых тел. Код, описывающий твердые тела, записывается в цикле нужное количество раз.

После того как заданы твердые тела, определяются шарниры, при помощи которых твердые тела крепятся друг к другу. Для этого вычисляется вектор смещения центра ролика  $\bar{r}_j$  и вектор ориентации его оси вращения  $\bar{n}_j$  в системе координат, связанной с несущим колесом, в зависимости от входных параметров. Выполняется это следующим образом. В системе координат, связанной с несущим колесом, векторы смещения роликов будут равны

$$\bar{r}_j = R \begin{pmatrix} 0 \\ \cos(\psi_j) \\ \sin(\psi_j) \end{pmatrix},$$

где  $\psi_j = j \frac{2\pi}{n}$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $R$  — радиус окружности, на которой распо-

ложены оси роликов, а  $j$  — порядковый номер ролика. Пусть вектор

$$\bar{n} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ 0 \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix}$$

есть вектор ориентации оси вращения первого ролика. Тогда ориентация  $j$ -го ролика получается из него поворотом вокруг оси  $Ox$  на угол  $\psi_j = j\frac{2\pi}{n}, j = 1, 2, 3, \dots, n$ .

$$\bar{n}_j = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi_j) & -\sin(\psi_j) \\ 0 & \sin(\psi_j) & \cos(\psi_j) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ 0 \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ -\sin(\psi_j) \sin(\alpha) \\ \cos(\psi_j) \sin(\alpha) \end{pmatrix}$$

После задания всех шарниров определяется взаимодействие роликов с контактной поверхностью. В качестве модели контакта с поверхностью для каждой контактной окружности используется контакт типа «окружность-плоскость». Подробная информация о математической модели контакта приведена в [8], [9]. Также, можно задавать взаимодействие контактными силами типа «точки-плоскость». После определения контактных сил модель колеса определена и готова к интегрированию.

### 3.3 Моделирование движения меканум-колеса

Численно интегрируется модель меканум-колеса с роликами эллиптического типа. Во время движения каждая контактная окружность в некоторый момент времени входит в контакт с поверхностью. Если ролики образованы дугами окружности, а не эллипса, то при некоторых конфигурациях параметров во время движения не все контактные окружности ролика могут касаться поверхности, вплоть до случая, когда в контакт с поверхностью входит только одна средняя окружность. Далее для роликов эллиптического типа приведены зависимости контактных сил средней контактной окружности от времени. На рис. 45 изображены проекции  $F_x$  и  $F_y$  реакции контактной силы на оси  $x$  (черным) и  $y$  (серым) соответственно,

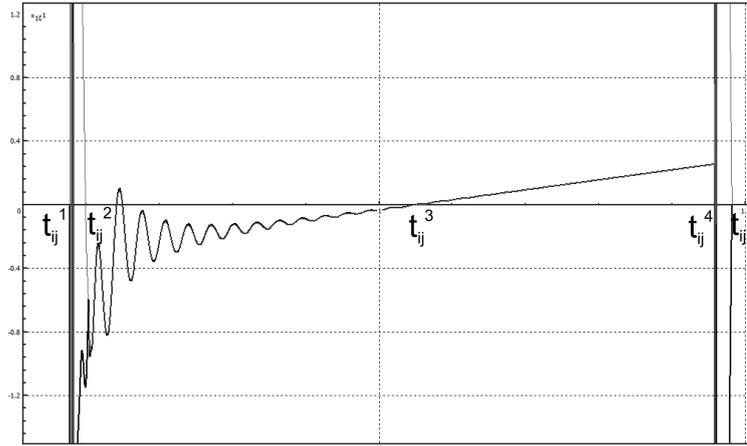


Рис. 45. Зависимость контактных сил от времени в модели с постоянной скоростью вращения колеса

где ось  $x$  параллельна оси колеса, а ось  $y$  — ей ортогональна, и обе оси лежат в плоскости движения. Между телом, соответствующим части корпуса аппарата, и плоскостью назначен шарнир, в котором из шести степеней свободы все угловые заблокированы. Между частью корпуса и ступицей колеса назначен вращательный шарнир вокруг оси  $x$ , координата которого есть функция времени, обеспечивающая вращение обода с постоянной угловой скоростью относительно части корпуса. Тогда проекция на плоскость  $Oxy$  скорости любой точки части корпуса постоянна во времени, и, соответственно, интеграл проекций контактных сил по времени за период контакта каждой окружности с поверхностью равен нулю. Период  $t_{ij}^1-t_{ij}^2$  соответствует входу в контакт  $j$ -той окружности  $i$ -того ролика,  $t_{ij}^4-t_{ij}^5$  — выходу из контакта. Как видно на рис. 45, в период  $t_{ij}^2-t_{ij}^4$  разность между проекциями силы на оси  $x$  и  $y$  мала, соответственно, сила направлена под углом  $45^\circ$  к оси колеса. При увеличении диссипативной составляющей контактной силы колебания силы на интервале  $(t_{ij}^2, t_{ij}^4)$  затухают быстрее. В этом интервале ролик движется без проскальзывания. Точка  $t_{ij}^3$  соответствует локальному максимуму потенциальной энергии системы.

Модель, при которой колесо движется с ускорением, реализована двумя способами: в первом колесо имеет ненулевую начальную скорость, во втором во вращательном шарнире между частью корпуса и ступицей колеса

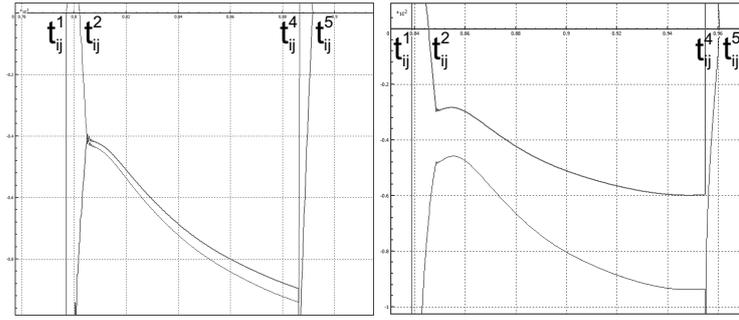


Рис. 46. Контактные силы с углом наклона ролика  $\alpha = 45^\circ$  (слева) и  $\alpha = 30^\circ$  (справа) и постоянным моментом вращения

назначен постоянный момент. Графики проекций  $F_x$  и  $F_y$  реакций контактных сил на оси  $x$  и  $y$  для второго способа, аналогичные изображенным на рис. 45, приведены на рис. 46. Справа на рис. 46 угол наклона роликов  $\alpha = 30^\circ$ . Как видно из рисунка, разница между проекциями контактной силы на оси  $x$  и  $y$  увеличилась, и  $\forall t \in (t_{ij}^2, t_{ij}^4)$  угол между ней и осью колеса  $\alpha = \arctan \frac{F_x(t)}{F_y(t)} \approx 30^\circ$ . Таким образом, проекция контактной силы направлена вдоль оси  $l_i$  ролика, находящегося в контакте с поверхностью (рис. 50).

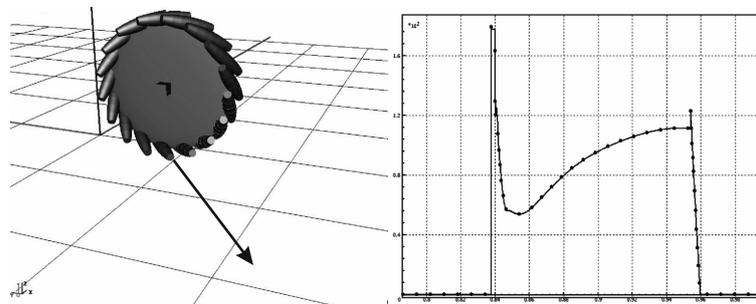


Рис. 47. Проекция контактной силы на плоскость (слева) и зависимость ее модуля от времени (справа)

На рис. 48 показана зависимость модуля скорости некоторой точки части корпуса от времени (слева) и траектория ее движения (справа) для колеса с 10 роликами с углом наклона  $\alpha = 30^\circ$ . Так выглядят зависимости всех точек части корпуса, так как во время движения угловые координаты части корпуса постоянны. Модель интегрировалась методом Парка с модельным временем 30 минут. Максимум скорости на левом рисунке  $\approx 5 \frac{M}{c}$ ,

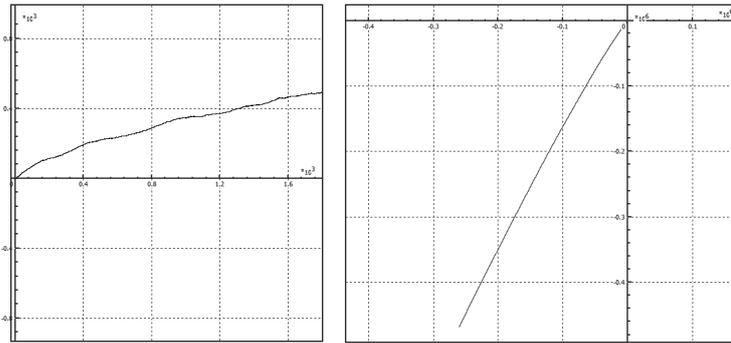


Рис. 48. Модуль скорости некоторой точки части корпуса (слева) и траектория ее движения (справа)

угол между прямой, аппроксимирующей траекторию, и осью  $y \approx 30^\circ$ .

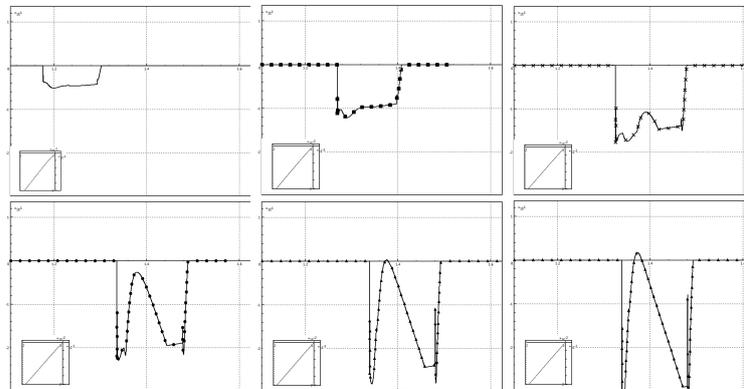


Рис. 49. Зависимость контактной силы от коэффициента трения

Методом «Park Parallel» интегрируется модель с 17 роликами эллиптического типа с углом  $\alpha = 45^\circ$ , каждому из которых соответствуют 3 контактные окружности. Проекции контактных сил на оси  $x$  и  $y$  отличаются мало. В шарнире между роликами и ободом есть диссипативный момент, обеспечивающий равенство нулю угловой скорости ролика относительно обода в момент касания. В качестве движителя в шарнире между частью корпуса и ступицей колеса действует постоянный момент, следовательно, все точки части корпуса движутся с ускорением. На рис. 49 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 порогово-

го значения, после которого зависимость меняется мало. После порогового значения на промежутке времени  $(t_{ij}^2, t_{ij}^4)$  ролик движется по плоскости без проскальзывания. При нулевом коэффициенте трения проекция скорости некоторой точки части корпуса на плоскость  $O_{XY}$  равна нулю. Это верно для любой точки, так как во время движения угловые координаты части корпуса постоянны. На меньших графиках, расположенных в левом нижнем углу каждого окна, изображены проекции траектории движения некоторой точки части корпуса на плоскость  $O_{XY}$ . Из графиков видно, что при данных условиях коэффициент трения мало влияет на траекторию движения и существенно влияет на ускорение вплоть до порогового значения. Влияние обусловлено ростом количества движения  $\int_{t_{ij}^2}^{t_{ij}^4} F_x(t) dt$  при увеличении коэффициента трения.

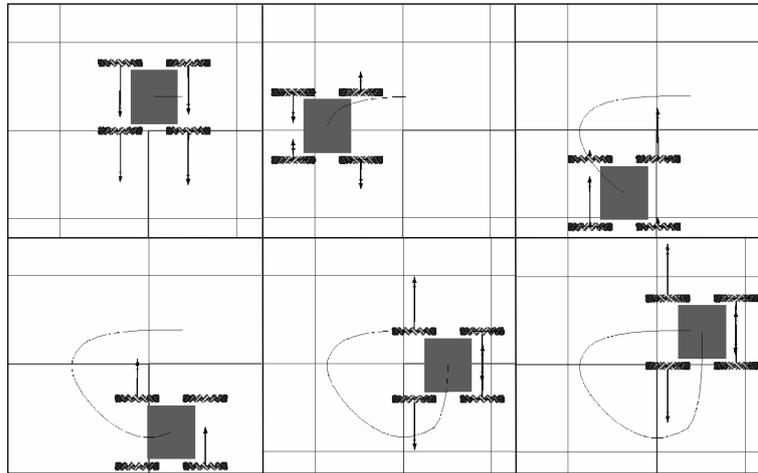


Рис. 50. Кинограмма движения четырехколесного робота

На кинограмме (рис. 50) представлен пример плоско-параллельного движения корпуса робота по некоторой траектории. Отдельной кривой обозначена траектория движения центра корпуса, стрелками указаны направления и величины угловых скоростей колес.

### 3.4 Управление движением шестиколесного робота на меканум-колесах

Разработана теоретико-механическая модель меканум-колеса. Численно исследованы зависимости некоторых характеристик движения колеса от параметров контактных сил и от упомянутых выше характеристик модели. Найдены геометрические характеристики ролика, необходимые при изготовлении меканум-колес, минимизирующие вертикальные колебания точек корпуса во время движения. Показаны зависимости контактной силы от параметров модели. Исследована зависимость траектории и ускорения колеса от коэффициента трения. Полученные результаты обосновывают поведение построенной модели меканум-колеса, что позволяет применять ее в исследовании динамики движения многоколесного робота.

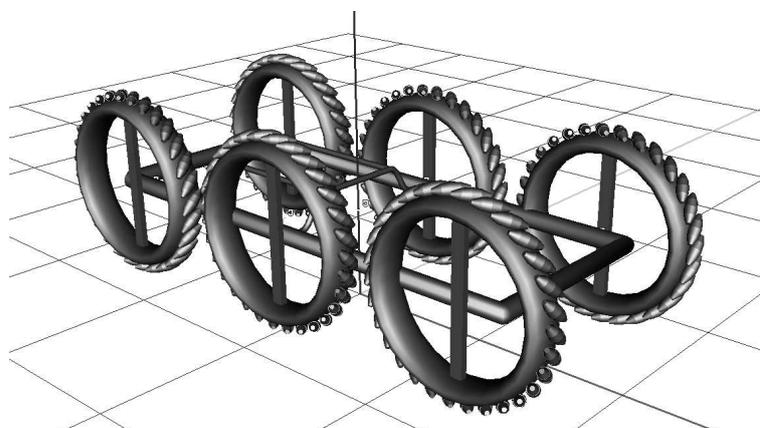


Рис. 51. Модель робота в «Универсальном механизме»

Исследуется модель робота, показанная на рис. 51, построенная в программном комплексе «Универсальный механизм». Данная модель имеет шесть меканум-колес с углом роликов  $45^\circ$ , имеющих возможность подниматься и опускаться на  $\frac{2}{3}$  своего радиуса для увеличения проходимости по сложным поверхностям и преодоления больших препятствий. Каждое колесо состоит из вертикальной штанги, перемещающейся вверх-вниз относительно корпуса, и обода, поворачивающегося вокруг штанги, с закрепленными на нем вращающимися вокруг своей оси роликами. Число роликов, их форма и расположение также являются параметрами модели. На данной модели с изменяющейся конфигурацией проводятся эксперименты с разным числом поднятых/опущенных и активных/пассивных колес.

Пусть  $\alpha$  — угол наклона роликов. Тогда силы, проецируемые коле-

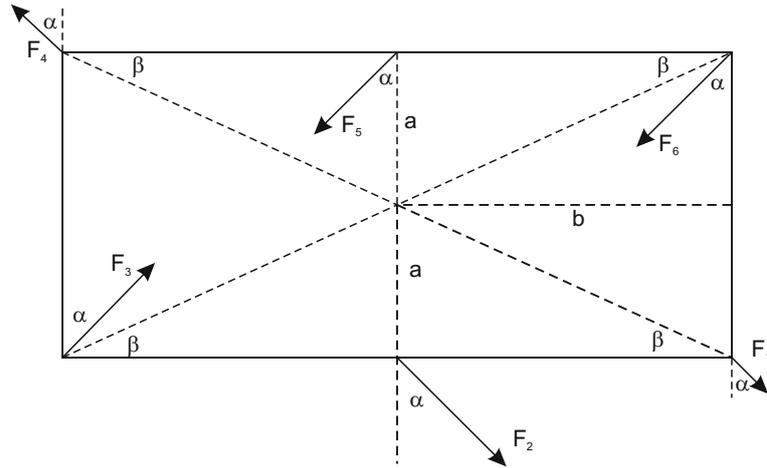


Рис. 52. Упрощенная модель шестиколесного аппарата

сами, направлены под этим углом к корпусу аппарата (рис. 52). Пусть  $F_k = c\omega_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, 6$ , где  $\omega_k$  — угловая скорость  $k$ -того колеса относительно корпуса,  $c$  — некоторая константа,  $\beta = \arctg\left(\frac{a}{b}\right)$ ,  $r = \sqrt{a^2 + b^2}$ .  $F_x, F_y, M_z$  — соответственные проекции главной силы и главного момента на оси системы координат, связанной с корпусом робота. Тогда проекции  $F_x, F_y, M_z$  имеют вид:

$$\begin{cases} F_x = \cos(\alpha)(F_1 + F_2 - F_3 - F_4 + F_5 + F_6) \\ F_y = \sin(\alpha)(F_1 + F_2 + F_3 - F_4 - F_5 - F_6) \\ M_z = r \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \beta\right)(F_1 + F_3 + F_4 + F_6) + a \sin(\alpha)(-F_2 - F_5) \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2}F_x = \cos(\alpha)(F_1 - F_3 + F_5) \\ \frac{1}{2}F_y = \sin(\alpha)(F_1 + F_3 - F_5) \\ \frac{1}{2}M_z = r \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \beta\right)(F_1 + F_3) + a \sin(\alpha)(-F_5) \end{cases},$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2}F_x = \cos(\alpha)(F_2 - F_4 + F_6) \\ \frac{1}{2}F_y = \sin(\alpha)(F_2 - F_4 - F_6) \\ \frac{1}{2}M_z = r \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \beta\right)(F_4 + F_6) + a \sin(\alpha)(-F_2) \end{cases},$$

которые имеют решения  $F_k = F_k(t)$ ,  $k = 1, 2, \dots, 6$ :

$$\begin{aligned}
F_1 &= \frac{1}{4} (\sec(\alpha)F_x + \csc(\alpha)F_y), \\
F_3 &= \frac{1}{4} (-\sec(\alpha)F_x - \csc(\alpha)F_y) + \frac{-aF_y + M_z}{2\sqrt{a^2 + b^2} \cos(\alpha + \arctg(\frac{a}{b})) - 2a \sin(\alpha)}, \\
F_5 &= -\frac{1}{2} \csc(\alpha)F_y + \frac{-aF_y + M_z}{2\sqrt{a^2 + b^2} \cos(\alpha + \arctg(\frac{a}{b})) - 2a \sin(\alpha)}, \\
F_2 &= \frac{\sqrt{a^2 + b^2} \cos(\alpha + \arctg[\frac{a}{b}]) \csc(\alpha)F_y + M_z}{2\sqrt{a^2 + b^2} \cos(\alpha + \arctg[\frac{a}{b}]) - 2a \sin(\alpha)}, \\
F_4 &= \frac{1}{4} \csc(\alpha) \left( -F_y + \frac{2(\sqrt{a^2 + b^2} \cos(\alpha + \arctg(\frac{a}{b})) F_y + \sin(\alpha)M_z)}{\sqrt{a^2 + b^2} \cos(\alpha + \arctg(\frac{a}{b})) - a \sin(\alpha)} - \right. \\
&\quad \left. - F_x \operatorname{tg}(\alpha) \right) \\
F_6 &= \frac{1}{4} (\sec(\alpha)F_x - \csc(\alpha)F_y)
\end{aligned}$$

В рассматриваемом случае при  $\alpha = \frac{\pi}{4}$ :

$$\begin{aligned}
F_1 &= \frac{1}{4} (\sqrt{2}F_x + \sqrt{2}F_y), \\
F_3 &= \frac{1}{4} (-\sqrt{2}F_x - \sqrt{2}F_y) - \frac{-\sqrt{2}aF_y + \sqrt{2}M_z}{2(a - \sqrt{2}\sqrt{a^2 + b^2} \operatorname{Sin}[\frac{\pi}{4} - \operatorname{ArcTan}[\frac{a}{b}]])}, \\
F_5 &= -\frac{F_y}{\sqrt{2}} - \frac{-\sqrt{2}aF_y + \sqrt{2}M_z}{2(a - \sqrt{2}\sqrt{a^2 + b^2} \operatorname{Sin}[\frac{\pi}{4} - \operatorname{ArcTan}[\frac{a}{b}]])}, \\
F_2 &= -\frac{2\sqrt{a^2 + b^2} \operatorname{Cos}[\frac{\pi}{4} + \operatorname{ArcTan}[\frac{a}{b}]] F_y + \sqrt{2}M_z}{2a - 2\sqrt{2}\sqrt{a^2 + b^2} \operatorname{Cos}[\frac{\pi}{4} + \operatorname{ArcTan}[\frac{a}{b}]]}, \\
F_4 &= \frac{-F_x - F_y - \frac{2(2\sqrt{a^2 + b^2} \operatorname{Cos}[\frac{\pi}{4} + \operatorname{ArcTan}[\frac{a}{b}]] F_y + \sqrt{2}M_z)}{\sqrt{2}a - 2\sqrt{a^2 + b^2} \operatorname{Cos}[\frac{\pi}{4} + \operatorname{ArcTan}[\frac{a}{b}]]}}{2\sqrt{2}}, \\
F_6 &= \frac{F_x - F_y}{2\sqrt{2}}.
\end{aligned}$$

Пусть  $y_d(t)$  — уравнение желаемой траектории. Определим управление  $u$ , минимизирующее отклонение прогнозируемой траектории  $\Delta y(t) =$

$y_d(t) - y_v(t)$  от желаемой на интервале времени прогноза  $T_p$ . В качестве функционала, характеризующего отклонение, рассматривается выражение

$$J(u) = \int_0^T (\Delta y(\tau))^2 d\tau.$$

Искомое управление получается из уравнения

$$\frac{dJ}{du} = 0.$$

Далее управление движением многоколесного аппарата в программном комплексе «Универсальный механизм» с помощью упрощенной модели строится аналогично методу, подробно описанному в предыдущей главе.

## **4 Исследование динамики движения и синтез управления робота с активной подвеской**

Вышеприведенная модель шестиколесного аппарата с пассивной подвеской хорошо приспособлена для преодоления мелких неровностей на высоких скоростях. Однако понятие повышенной проходимости включает в себя возможность преодоления препятствий высокого профиля, что не может быть обеспечено пассивной подвеской. Для решения этой задачи аппарат необходимо оснастить активной подвеской.

### **4.1 Оптимизация и выбор массово-инерционных и геометрических характеристик аппарата**

Для исследования колесно-шагающих аппаратов был разработан, спроектирован и собран образец робота, которому посвящена следующая глава. Двухрычажная мягкая подвеска, подробно описанная и исследованная во второй главе, была заменена более сложной подвеской, которую можно использовать как в качестве активной, так и в качестве пассивной или полуактивной подвески. Сравнения этих двух подвесок будут приведены

ниже. Такой тип подвески был выбран по нескольким причинам. В качестве первого преимущества стоит назвать относительно невысокую себестоимость по сравнению с двухрычажными подвесками и простоту производства. Большинство комплектующих находятся в серийном производстве и, как следствие, легко доступны как для создания небольших моделей и прототипов, так и для создания достаточно крупногабаритных аппаратов. Целью данной работы было создание робота с максимальными габаритами около метра, из этого были подобраны все остальные характеристики.

Предполагалось, что проектируемый аппарат должен самостоятельно преодолевать препятствия порядка полуметра высотой и перемещаться по ровной поверхности на сравнительно высокой скорости, около 30–40 км/ч. Одновременно с этим иметь высокую профильную проходимость и быть способным поддерживать относительно высокую скорость на пересеченной местности. Подвеска по своим характеристикам, описанным во второй главе, не должна уступать стандартной двухрычажной подвеске типа Макферсона.

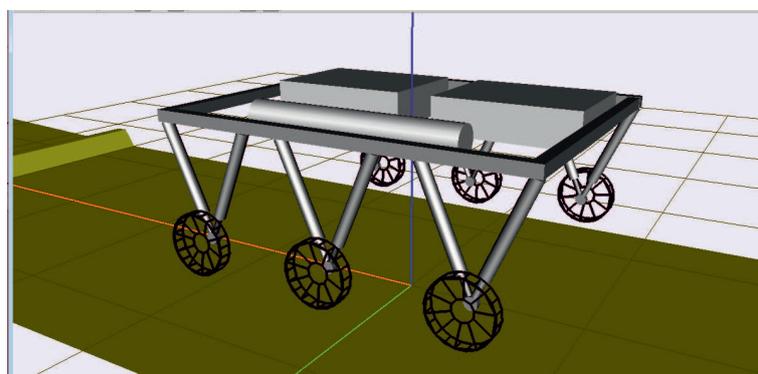


Рис. 53. Модель шестиколесного ровера в «Универсальном механизме»

Исследуется модель робота, одна из версий которого показана на рис. 53. В программном комплексе «Универсальный механизм» была создана модель ровера для выбора и оптимизации массово-инерционных и геометрических характеристик аппарата.

Далее описывается компьютерная модель приведенного робота. Модель состоит из 31 твердого тела, имеет 37 шарниров, из них, очевидно, 6 — разрезанные. Кроме того, модель имеет 28 контактных сил, из них 6 — внеш-

ние, относящиеся к контакту с поверхностью. Ясно, что модель достаточно сложна для аналитического исследования. Уравнения движения модели синтезируются программно как символьным способом, так и численно-итерационным, в зависимости от необходимости и возможностей синтеза уравнений «Универсальным механизмом». Например, для синтеза файла управления, где находится основная управляющая программа необходим символьный синтез. А для использования параллельных вычислений, что сильно ускоряет процесс интегрирования, — численно-итерационный. Телами объекта являются — корпус аппарата, пневмоцилиндры, штоки пневмоцилиндров, колесные ступицы и колеса. Внешнее тело — контактная поверхность, задается одним из нескольких вариантов: либо в качестве графического объекта, либо  $z$ -поверхности, либо внешней функции. Эти варианты имеют разные характеристики во время интегрирования уравнений движения. Вся модель параметризована, для возможности быстрого изменения массово-инерционных и геометрических характеристик аппарата. Варьируемыми параметрами модели являются: длина  $l_1$  и ширина  $l_2$  корпуса, высота корпуса  $h_1$ , радиус  $d_1$  и длина  $l_3$  пневмоцилиндра, радиус  $d_2$  и ход  $h_2$  штока, расстояние между креплениями цилиндров  $l_4$ , радиус колесного диска  $r_1$  и тип колеса  $n_w$ . Между телами назначены шарниры. Каждый пневмоцилиндр закреплен на корпусе с помощью вращательного шарнира с одной степенью свободы, все оси вращения цилиндров параллельны между собой и перпендикулярны сагиттальной плоскости аппарата. Каждый шток пневмоцилиндра связан с пневмоцилиндром поступательным шарниром с одной степенью свободы. В этом шарнире и добавлена основная управляющая сила. Поступательная ось цилиндра пересекается с вращательной под прямым углом. Два штока одной ноги связаны вращательным шарниром с одной степенью свободы. Вместо этих разрезанных шарниров в некоторых случаях использовались сопряжения. Шарнирная ось параллельна оси вращения пневмоцилиндра. Ступица колеса жестко связана с одним из штоков цилиндров. Колесо связано со ступицей вращательным шарниром с одной степенью свободы, с осью, параллельной оси вращения пневмоцилиндра. В этом шарнире смоделирован тормоз и, опционально,

электро- или пневмодвигатель. Контактные силы в цилиндрах заменяют естественные ограничения, накладываемые характеристиками пневмоцилиндров. Двусторонний запирающий контакт смоделирован внутренним контактом двух сфер, кроме того, соседние колеса имеют внешний контакт как две сферы, описывающие колеса. Контакт колеса с поверхностью задавался аналогично методу, описанному во второй главе, были проверены и сравнивались те же модели контакта. Большинство экспериментов проводилось с контактным взаимодействием колеса и контактной поверхности окружность — z-поверхность как в случае с обычными, так и в случае с механум-колесами, как было подробно описано выше.

Исследуется задача преодоления препятствий, чаще всего встречающихся в естественных условиях города, таких как: бордюры, лестницы, дверные проемы, бревна, пандусы, люки, решетки и прочие препятствия нестандартизированной формы и типов. Кроме того могут встречаться препятствия, не являющиеся в достаточном приближении твердыми объектами, преодоление которых вызывает дополнительные трудности. К препятствиям такого типа можно отнести траву, листву, низкие кустарники и клумбы и различный мусор. Также встречаются препятствия, преодоления которых вызывают определенные трудности именно для роботизированных устройств, например, лужи, сугробы и влажная почва, которые могут привести к повреждениям как механики, так и электроники, установленной на аппарате. Исходя из этих требований были выбраны внешние габариты робота  $1 \times 0,8$  м. Чтобы уменьшить общую массу робота используется гибридная электронно-пневматическая система приводов. Разработаны некоторые варианты комплектации робота, в которых электронные устройства выполняют исключительно управляющие функции, когда все движители имеют пневматический привод. В этом случае сильно снижается потребление электроэнергии на борту робота, если пневматическая система питается от ресивера со сжатым воздухом, углекислым газом или азотом. В данном случае возникают определенные трудности с разгоном и поворотом, которые, как показано далее, могут быть решены программно. Данная модель кроме пневматических приводов в ногах также имеет

возможность блокировки колес.

Данный робот имеет модульную конструкцию и имеет несколько вариантов колес для разных поверхностей. Для обычных городских условий предусмотрена установка механум-колес, так как поворотная степень колеса отсутствует и это поможет сэкономить значительное количество энергии. В этом случае робот может совершать омни-движения. Для пересеченной местности используются колеса с рельефным протектором и большего диаметра. В таких условиях робот способен поворачивать только в случае скольжения нескольких колес. Вращение колес обеспечивает реверсивный пневматический двигатель, выбранный из-за большого отношения максимального создаваемого момента к весу двигателя. Кроме того могут быть использованы мотор-колеса с электроприводом. Для отработки алгоритмов шагания используются небольшие колеса без вращательного привода. Ноги робота также легко демонтируются, таким образом легко меняется кинематическая схема робота. Таким образом, можно увеличить как длину и высоту шага, так и полезную нагрузку. Каждая нога робота состоит из двух пневмоцилиндров с диаметром 20 мм и ходом 200 мм, на которых крепится колесо. Таким образом, центр колеса может совершать плоскопараллельные движения в вертикальной плоскости, заметая некоторую замкнутую фигуру с одной границей. Геометрия этой фигуры может легко меняться в зависимости от схемы крепления колеса. Аппарат не имеет пассивной амортизационной подвески, но удары могут быть компенсированы сжимаемостью газа в цилиндрах и дросселями системы управления.

На рис. 54 показана одна из версий сборки робота с пассивными колесами. Данная конструкция имеет ряд преимуществ и недостатков. Из недостатков следует отметить сравнительно низкий коэффициент полезного действия, прежде всего, в случае использования роторных пневматических двигателей. Тем не менее, благодаря использованию преимущественно пневматической энергии, максимальное потребление электрической энергии (не включая бортовой компьютер) снижено до 135 W, среднее в режиме совместного шагания и качения — до 35 W. Таким образом, удалось существенно сэкономить на весе аккумуляторов и двигателей, поэтому аппарат



Рис. 54. Версия шестиколесного робота с пассивными колесами

имеет сравнительно небольшой вес. При эксплуатации внутри помещения или в любом ограниченном пространстве может использоваться внешний воздушный компрессор, что избавит от необходимости менять баллоны со сжатым воздухом или газом. Робот может преодолевать большие препятствия в режиме шагания, и может быть использован как исследовательский аппарат как в городской местности, так и на естественном ландшафте. Так как вся электроника расположена в верхней части робота, аппарат способен преодолевать водные препятствия глубиной до 370 мм без необходимости специальной герметизации приводов.

## **4.2 Управление, движение по поверхностям разного типа с пассивной подвеской для шестиколесного пневматического аппарата**

На рис. 55 изображен отсек управления подвеской робота.

На борту робота расположены два технических отсека и отдельно ресивер. В одном отсеке располагается система управления движением ног робота и контроллер, во втором — система управления колесами, бортовой компьютер, система подготовки воздуха и баллон со сжатым воздухом или углекислым газом. Каждый движитель имеет сходную схему подключения к питанию воздуха. Сжатый воздух или углекислый газ находится в специальном баллоне под высоким давлением, после него расположен редук-

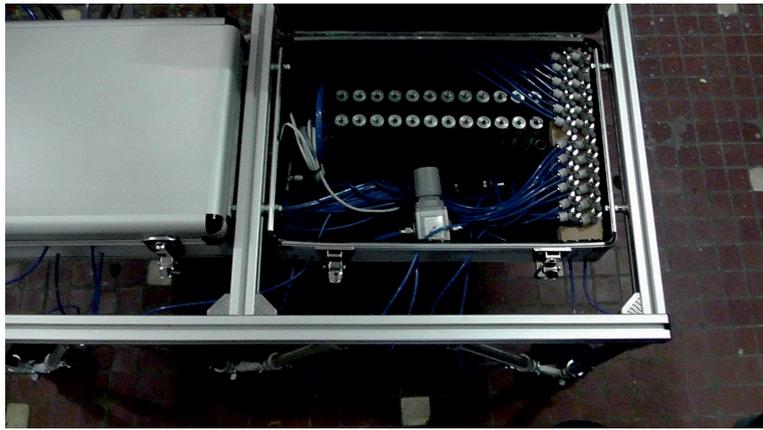


Рис. 55. Блок управления приводами робота

тор на 10 bar, затем масляный фильтр, затем ресивер и электронное реле давления на случай подключения насосной станции. Далее расположен редуктор точной регулировки 3–8 bar, затем воздух поступает на нормально-закрытый клапан, затем дроссель точной ручной регулировки и на движитель. Выхлоп воздуха на данный момент никак не используется и выведен на глушитель. Всего система имеет 18 движителей и 36 клапанов. Управление штоком цилиндра и вращением пневмодвигателя осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции на клапанах. Таким образом, удалось добиться хороших точностей усилий, развиваемых в цилиндрах.

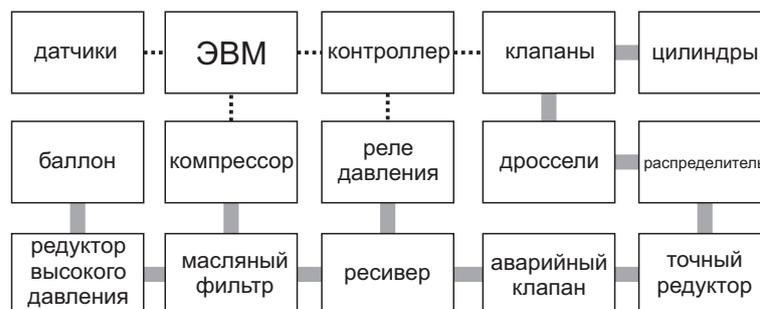


Рис. 56. Схема управления приводами робота

На рис. 56 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, будучи соединенным гибким шлангом. Компрессор и баллон со сжатым газом могут использоваться или совместно,

или заменять друг друга.

Таким образом, на работе имеется легко механически настраиваемая подвеска. Здесь давление пневматической системы, механически ограниченное редуктором точной настройки, соответствует коэффициенту жесткости пружин двухрычажной подвески, а регулировка расхода дросселями соответствует настройке демпферов в ней. Кроме того, в зависимости от характеристик неровностей давление в пневмоцилиндрах можно регулировать программно с помощью широтно-импульсной модуляции на клапанах. Была проведена серия экспериментов, аналогичная описанной в главе, посвященной пассивной подвеске. В результате показано, что выбором значений давления и расхода можно добиться аналогичных значений функционалов качества, описанных выше.

### 4.3 Силовое управление активной подвеской

Для того, чтобы максимизировать величину и сложность преодолеваемого препятствия, была проведена оптимизация геометрических характеристик робота, влияющих на область действия колеса. Для оптимизации изменялся один параметр препятствия — высота и использовалась одна походка. Оптимизация производилась по параметру  $l_4$ . Для простоты реализации и расчетов было принято допущение, что все области совпадают при наложении. Следует отметить, что соседние области в общем случае имеют пересечения.

На рис. 57 изображена область достижимости центра колеса робота при неподвижном корпусе. Константы  $l_3$ ,  $l_4 = |p_2 - p_1|$ ,  $h_2$ , означают соответственно длину пневмоцилиндра, расстояние между точками закрепления и ход цилиндра. Эта область описывается системой неравенств

$$\begin{cases} (x - p_1)^2 + y^2 \geq l_3 \\ (x - p_1)^2 + y^2 \leq l_3 + h_2 \\ (x - p_2)^2 + y^2 \geq l_3 \\ (x - p_2)^2 + y^2 \leq l_3 + h_2 \end{cases},$$

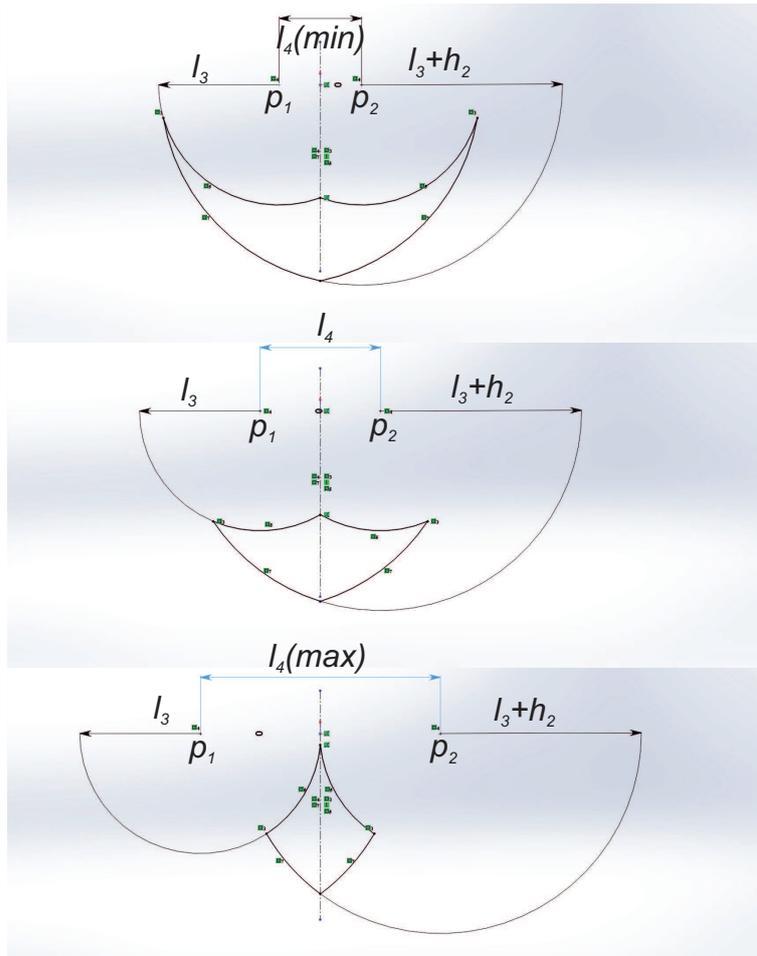


Рис. 57. Вид области достижимости центра колеса

где  $p_1, p_2$  — точки закрепления пневмоцилиндров на корпусе в системе координат корпуса.

Пусть  $q_1, q_2$  — обобщенные координаты, суть длины пневмоцилиндров, декартовы координаты связаны неподвижно с корпусом робота следующим образом: начало координат совпадает с точкой крепления (вращательным шарниром) ближайшего к передней стороне робота пневмоцилиндра рассматриваемой пары. Ось  $x$  лежит в плоскости, перпендикулярной оси вращения цилиндра и проходит через обе точки крепления цилиндров. Ось  $y$  лежит в этой же плоскости и ортогональна оси  $x$ . Имеются очевидные соотношения

$$y^2 = q_1^2 \frac{x}{l_4} + q_2^2 \frac{l_4 - x}{l_4} - x(l_4 - x),$$

$$x^2 + y^2 = q_1^2,$$

$$y^2 = \frac{4}{l_4^2} p(p - q_1)(p - q_2)(p - l_4),$$

где  $p = q_1 + q_2 + l_4$ , откуда

$$\begin{cases} q_1 = \sqrt{x^2 + y^2} \\ q_2 = \frac{\sqrt{xy^2 - l_4^2 x + l_4 x^2 + x^3 - l_4 y^2}}{\sqrt{x - l_4}}, \end{cases}$$

$$x = \frac{1}{l_4} \left( \sqrt{(-4l_4^3 q_1 - 7l_4^2 q_1^2 - 4l_4 q_1^3 - 4l_4^3 q_2 - 16l_4^2 q_1 q_2 - 16l_4 q_1^2 q_2 - 4q_1^3 q_2 - 8l_4^2 q_2^2 - 16l_4 q_1 q_2^2 - 8q_1^2 q_2^2 - 4l_4 q_2^3 - 4q_1 q_2^3)} \right),$$

$$y = \frac{2\sqrt{q_1 + q_2} \sqrt{l_4^3 + 2l_4^2 q_1 + l_4 q_1^2 + 2l_4^2 q_2 + 3l_4 q_1 q_2 + q_1^2 q_2 + l_4 q_2^2 + q_1 q_2^2}}{l_4}.$$

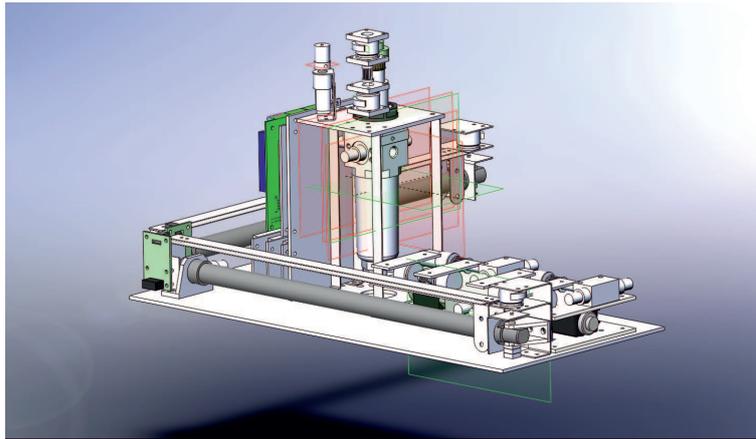


Рис. 58. Стенд управления парой пневмоцилиндров

Для того, чтобы реализовать позиционное управление в подвеске, был разработан стенд, показанный на рис. 58. Вместо клапанного ШИМ-управления здесь имеется возможность регулировки расхода и давления с помощью электроприводов. Также, имеется обратная связь по положению точки тела, соединяющего штоки пневмоцилиндров. Из-за больших габаритов и веса конструкции, а также дополнительной электронагрузки, на данный момент такое управление не реализовано на борту аппарата.

Таким образом на данный момент имеется силовое управление, реализованное с помощью широтно-импульсной модуляции с частотой до 60 Гц. Расход газа настраивается вручную, независимо для каждого цилиндра.

Для движения такого робота были построены базовые алгоритмы движения, такие как: разгон, торможение, поворот во время движения и поворот на месте. Все элементы этого алфавита выполнены без вращательных приводов и реализуются исключительно за счет изменения давления в пневмоцилиндрах и тормозов во вращательных шарнирах колес. Реализация всех базовых движений описана далее.

#### 4.4 Движение по поверхностям с микро/макро неровностями

Далее исследуется динамика движения шестиколесного колесно-шагающего робота с активной подвеской и приводится методика синтеза его управления. Модель трения и микронеровностей, подробно описанная ранее, была использована для этого аппарата при решении задач синтеза управления. Препятствия, имеющие размеры, сравнимые с ходом ноги робота, рассматриваются далее. Несколькими способами задается контактная поверхность (модель контакта подробно описана выше). Геометрические характеристики препятствия параметризованы следующим образом:  $a$  — расстояние до начала препятствия,  $b$  — высота препятствия,  $c$  — длина препятствия,  $\delta = b \cot \alpha$ , где  $\alpha$  — угол наклона перед препятствием. Препятствие задано либо графическим объектом, который и является контактной поверхностью, либо функцией  $z_s(p_1)$ , вида

$$z_s(p_1) = \frac{1}{\delta^2} b (-a + p_1) (\delta + (-a - \delta + p_1) (-1 - 1 / ((c + \delta)^2 (c + 2\delta)^2)) (a + \delta - p_1) (4a^3 + 6c^3 + 26c^2\delta + 36c\delta^2 + 16\delta^3 + 4a^2(3c + 4\delta) + a(13c^2 + 36c\delta + 24\delta^2) - (12a^2 + 13c^2 + 36c\delta + 24\delta^2 + 8a(3c + 4\delta)) p_1 + 4(3a + 3c + 4\delta)p_1^2 - 4p_1^3))$$

с производной вида

$$z'_s = \frac{1}{\delta^2(c + \delta)^2(c + 2\delta)^2} 2b(a + \delta - p_1)(12a^4 + c^4 + 9c^3\delta + 26c^2\delta^2 + 30c\delta^3 + 12\delta^4 + 6a^3(5c + 8\delta) + a^2(26c^2 + 90c\delta + 72\delta^2) + a(9c^3 + 52c^2\delta + 90c\delta^2 + 48\delta^3) - (48a^3 + 9c^3 + 52c^2\delta + 90c\delta^2 + 48\delta^3 + 18a^2(5c + 8\delta) + 4a(13c^2 + 45c\delta + 36\delta^2))p_1 + 2(36a^2 + 13c^2 + 45c\delta + 36\delta^2 + 9a(5c + 8\delta))p_1^2 - 6(8a + 5c + 8\delta)p_1^3 + 12p_1^4).$$

Эта функция обладает следующим недостатком — ее производная не равняется нулю в точках пересечения с контактной плоскостью  $z = 0$ , но это существенно только при очень малых значениях радиуса колеса или больших  $\delta$ . Оба эти случая представляют наименьший интерес, кроме того, недифференцируемость в двух точках контактной поверхности при исследовании алгоритмов модельной ходьбы на процесс компьютерного интегрирования влияет несущественно. Таким образом, у системы распознавания препятствий имеется пять входных параметров. К геометрическим параметрам препятствия добавляется скорость, с которой аппарат преодолевает его.

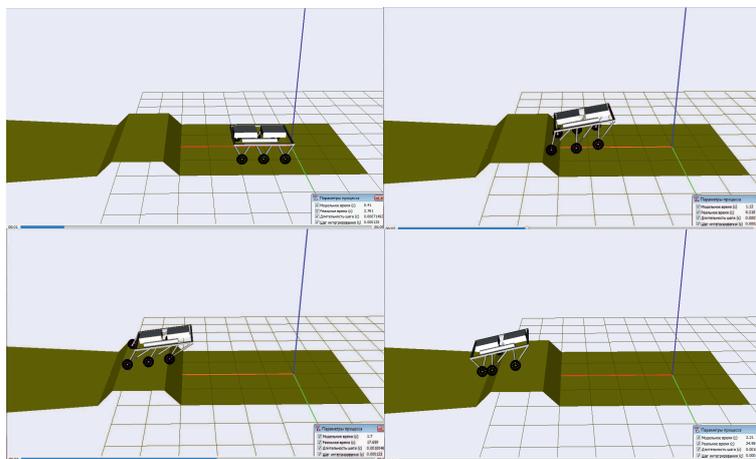


Рис. 59. Кинограмма прыжка для преодоления препятствия

Для преодоления препятствий было синтезировано 9 классов походок со своими внутренними параметрами, которые оптимизируются отдельно. На рис. 59 приведена кинограмма одного из прыжков для преодоления препятствий. Все синтезированные походки на данном этапе преодолевают препятствия без остановок и вращательных двигателей. 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 Гауссовых Смесей GMMs (Gaussian Mixture Models). Реализация на борту аппарата на данном этапе предлагается с помощью библиотек OpenCV. Машинное обучение модели произведено в программном комплексе «Универсальный механизм». После обучения, данные передаются единообразно на робота, и выбор алгоритма преодоления реального препятствия производится EM-алгоритмом уже на борту аппарата. На вход EM-алгоритму требуются геометрические параметры приближающегося препятствия и линейная скорость корпуса робота, получаемые с дальномеров и акселерометра соответственно. На данном этапе предлагается выбирать четыре параметра функции  $z_s$  из условия, что все точки реального препятствия лежат внутри функции  $z_s$  и интеграл модуля разности ее и функции, аппроксимирующей огибающую препятствия, минимален.

Далее подробно описан процесс машинного обучения аппарата. Во всех управляющих шарнирах назначается шарнирная сила типа «Внешняя функция». В файле управления автоматически для каждой шарнирной силы создается функция. Далее приведена структура кода, добавляемого в файл управления для задания походок и элементарных движений, подробная структура и тела функций приведены в приложении. Важно, что файл управления выполняется на каждом шаге интегрирования, таким образом, все, написанное в нем, уже находится внутри цикла, что создает некоторые неудобства.

```
real_ legforces[12]={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
```

```
real_ legbreaks[6]={0,0,0,0,0,0};
```

(\* назначаются массивы для шарнирных сил и тормозов дисков, соответственно \*)

```
double t0=0;
```

(\* значение времени в начале элементарного движения, используется для задания локального времени, в отличие от модельного времени системы\*)

```
double force0 = 0;
```

```

(* шарнирная сила, равная нулю *)
int g = 0;
(* номер походки аппарата: нулевой соответствует самостоятельному
принятию решения, с 1 по 9 используются на стадии обучения, — базовые
походки, далее идут элементарные движения, например, разгон, поворот,
торможение и т.п. *)
int stepiter =0;
(* количество итераций движения *)
int stepiters[ ]={0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,5,1};
(* массив количеств итераций походки во время движения *)
void step1(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
void step2(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
void step3(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
void step4(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
void step5(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
void step6(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
void step7(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
void step8(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
void step9(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
(* элементарные походки *)
void tormoz(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
void povorot1(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
void povorot2(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
void razgon1(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
void razgon2(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
(* элементарные движения *)
void mycontrol(_mnogonozh_10VarPtr _, int _isubs){...}
(* управляющая функция, в которой вызываются элементарные походки
и движения *)

```

На рис. 60 приведена кинограмма, иллюстрирующая работу функции класса step8 на стадии обучения. На вход EM-алгоритму подаются пары



Рис. 60. Кинограмма преодоления препятствия функцией step8

«условие — верное решение», в данном случае параметры препятствия — номер оптимальной походки. Оптимальной считается та походка, которая затратила минимум энергии на преодоление препятствия при этом успешно его преодолев. В данном случае подается по 300 представителей класса. Таким образом, в программном комплексе «Универсальный механизм» проведено 2700 успешных экспериментов. Эксперименты проводились параллельно на нескольких компьютерах с помощью встроенной системы клиент-сервер. В конце каждого эксперимента, в случае успеха, данные о препятствии и о способе преодоления записывались в файл. Кроме того для каждого эксперимента сохранялась информация о затраченной энергии. Представители каждого класса разбиваются на определенное количество кластеров (в данном случае на десять). Каждому кластеру первым шагом EM-алгоритма ставится в соответствие квадратичная форма с размером, соответствующим количеству входных параметров (в данном случае  $5 \times 5$ ). В результате на выходе первого шага EM-алгоритма разделения гауссовых смесей получаются 90 матриц  $5 \times 5$ . Второму шагу EM-алгоритма пода-

ются параметры приближающегося препятствия, и на его выходе получают соответствующие им вероятности преодоления с успехом. Реализация второго шага, когда решение о способе преодоления принимается самостоятельно, выполнена на модельном роботе и планируются эксперименты на реальном.



Рис. 61. Колесно-шагающий аппарат на лестнице

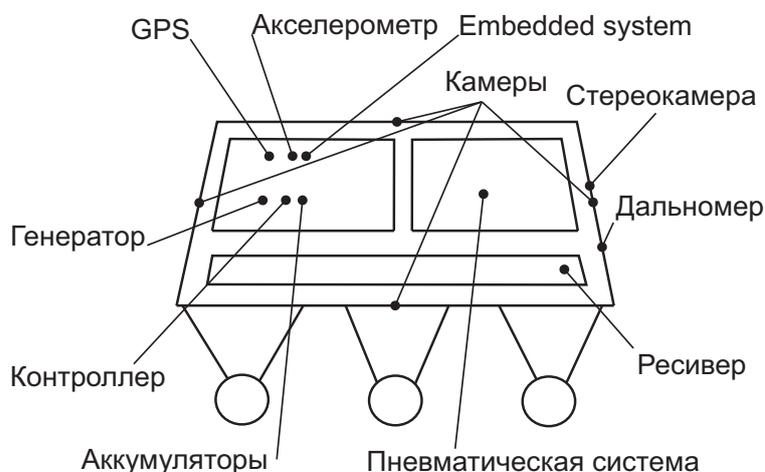


Рис. 62. Схема электронных компонентов аппарата

Схема электронных компонентов робота изображена на рис 62.

## Заключение

Построена модель «многоколесный аппарат — блок управления — колесо — дорога», минимизирующая время проведения численных эксперимен-

тов. Время, затрачиваемое на проведение каждого эксперимента, необходимо сокращать, так как для машинного обучения прототипа при помощи модели требуется значительное количество компьютерных экспериментов. В модели для двухрычажной подвески разработаны методические приемы, позволяющие оптимизировать процессы интегрирования. 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.

Для быстроходного робота найдена зависимость характеристик динамической комфортабельности движения от параметров подвески и указана область, из которой следует выбирать коэффициенты жесткости и диссипации подвески. Показаны зависимости таких характеристик комфортабельности движения как  $R_{MS}$  — среднеквадратичного отклонения вертикального ускорения,  $I_1$  и  $I_2$  — интегралов модуля вертикального ускорения,  $W_{max}$  — максимума модуля вертикального ускорения — от скорости, массы, коэффициента жесткости пружины подвески и коэффициента диссипации демпфера подвески. По полученным диаграммам можно выбирать динамические параметры экипажа, позволяющие минимизировать функционалы вертикального ускорения, что обеспечит динамическую комфортабельность движения в вышеуказанном смысле. В работе сформулированы рекомендации по выбору некоторых геометрических характеристик аппарата. Указаны области приемлемых параметров подвески. Например, для робота массой 75 кг и длиной 95 см (это характерные размеры современных исследовательских роботов) если максимум ускорения не должен превышать  $24 \text{ м/с}^2$ , оптимальными коэффициентами подвески будут: коэффициент жесткости —  $8 \cdot 10^4 \text{ кг/с}^2$ , коэффициент диссипации —  $150 \text{ кг/с}$ . Показано, что в целом зависимость функционалов качества подвески от скорости близка к квадратичной и может быть ею аппроксимирована. Найдена область параметров (рис. 38), в которой отклонение  $J(u)$  желаемой (заданной) траектории от действительной минимально. В целом эксперименты

с созданной методикой моделирования показывают, что предлагаемая модель может быть эффективно использована для определения оптимальных значений параметров быстроходного робота в зависимости от функционала качества. По наиболее важному в конкретной задаче функционалу на соответствующей диаграмме выбирается область целесообразных значений характеристик подвески для реализации динамически комфортабельного движения.

Разработана компьютерная модель механум-колеса, написан препроцессор для создания модели в «Универсальном механизме». Смоделировано движение как одного колеса, так и многоколесных аппаратов. Построены алгоритмы управления для многоколесного ровера на механум-колесах. Разработан и спроектирован шестиколесный колесно-шагающий аппарат. Аппарат смоделирован, и исследуется его компьютерная модель. Изготовлен первый прототип аппарата. Произведена оптимизация геометрических и массово-инерционных параметров аппарата. Построено управление и исследовано движение по поверхностям разного типа с пассивной подвеской. Найдены параметры, при которых пневматическая подвеска хорошо приближает пружинную двухрычажную. Построено силовое управление активной подвеской для преодоления разных типов препятствий. Построена система распознавания препятствий и принятия решения о выборе типа движения.

Разработан следующий алгоритм преодоления препятствий для 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 работе

- Распознавание препятствия (определение  $n$  параметров)
- Принятие решения (выбор типа походки — второй шаг EM)
- Проверка и корректировка решения
- Запись результатов преодоления препятствия для самообучения

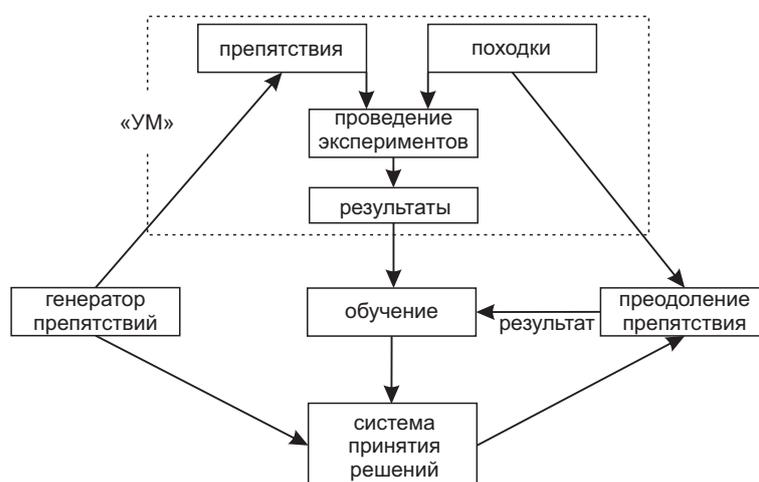


Рис. 63. Схема системы преодоления препятствий

Разработанный алгоритм управления (рис. 63) 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, в которой присутствует реализация EM.

Используется Expectation-maximization-алгоритм на модели Гауссовых смесей. По обучающей выборке строится гипотеза о плотности распределения случайной величины. Случайная величина — принадлежность объекта классу препятствий, преодолеваемых данной походкой. Этот алгоритм по обучающей выборке строит гипотезу о плотности и сохраняет описание функции плотности в виде набора матриц размера  $5 \times 5$ . Эти матрицы в дальнейшем понимаются как матрицы квадратичных форм. Мы используем 10 матриц на 1 класс. На обучение требуется несколько минут. Эти матрицы передаются на встраиваемую систему робота. При распознавании вычисляются все квадратичные формы для вектора, описывающего препятствие. Получаются вероятности того, что препятствие относится к данному классу. Результаты сравниваются, и принимается решение. Первая часть EM-алгоритма также установлена на борту робота, и в свободное время там может производиться самостоятельное переобучение. Алгоритм принятия решения подключен к «Универсальному Механизму»: если во время моделирования не указан номер походки, то модель принимает решение самостоятельно. Этот алгоритм также может быть использован для машинного обучения других типов мобильных роботов. Построен алфавит элементарных движений робота для перемещения по поверхности с препятствиями.

## 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 исполь-

зудется 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 актив-

ной 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.

Автор выражает искреннюю благодарность коллективу разработчиков программного комплекса «Универсальный механизм» [10] за предоставленные дистрибутивы и техническую поддержку.

## Список литературы

1. Герасун В.М., Несмиянов И.А., Павловский В.Е., Рогачев А.Ф. Синтез манипулятора для мобильного робота на гусеничном шасси / Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2011. № 5. С. 51–54
2. Колонизация Луны [Электронный ресурс] — Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Лунная\\_база](http://ru.wikipedia.org/wiki/Лунная_база)
3. Космонавтика XXI века, «Земля и Вселенная» / И.С. Болховитинов [и др.] ВНИИТРАНСМАШ. С.-Петербург. 1991. № 5
4. Новожиллов И.В., Павлов И.С. Приближенная модель колесного экипажа / Изв. РАН. МГТ. 1997. № 2. С. 196–204
5. Павловский В.Е., Алисейчик А.П. Методика исследования динамической комфортабельности движения многоколесного мобильного робота. / М.: Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2010. № 84 27 с.
6. Павловский В.Е., Алисейчик А.П. Модель и динамические оценки управляемости и комфортабельности движения многоколесного мобильного робота / М.: Журнал проблемы управления. 2013. № 1. С. 70–78
7. Павловский В.Е., Шишканов Д.В. Исследование динамики и синтез управления колесными аппаратами с избыточной подвижностью. / М.: Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2006. № 12. 28 с.
8. Погорелов Д.Ю. [и соавт.] Механическая система как объект моделирования. [Электронный ресурс] — Режим доступа: [http://www.universalmecanism.com/download/70/rus/02\\_um\\_technical\\_manual.pdf](http://www.universalmecanism.com/download/70/rus/02_um_technical_manual.pdf)
9. Погорелов Д.Ю. [и соавт.] Программа ввода данных (создание модели). [Электронный ресурс] — Режим доступа: [http://www.umlabor.ru/download/60/rus/03\\_um\\_data\\_input\\_program.pdf](http://www.umlabor.ru/download/60/rus/03_um_data_input_program.pdf)

10. *Погорелов Д.Ю.* [и соавт.] Программный комплекс Универсальный механизм [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.umlab.ru>
11. *Погорелов Д.Ю.* О численных методах моделирования движения систем твердых тел. / Журнал вычислительной математики и математической физики. 1995. № 4. С. 501–506
12. *Раймпель Й.* Шасси автомобиля. Рулевое управление. М.: Машиностроение. 1987. 232 с.
13. *Раймпель Й.* Шасси автомобиля: Конструкции подвесок / Пер. с нем. В.П. Агапова. М.: Машиностроение. 1989. 328 с.
14. *Тодденрот С.* Volkswagen Rescue Rover [Электронный ресурс] — Режим доступа:  
<http://future24.ru/plavayushchii-avtomobil-volkswagen-rescue-rover>
15. *Хачатуров А.А.* Динамика системы дорога–шина–автомобиль–водитель / под ред. А.А. Хачатурова. М.: «Машиностроение». 1976. 536 с.
16. *Чобиток В.В.* Ходовая часть танков. Подвеска / Техника и Вооружение. 2005. № 7. С. 43–51
17. *Bakker E., Pacejka H.B. and Lidner L:* A New Tire Model with Application in Vehicle Dynamics Studies. / Proc. 4th Int. Conf. Automotive Technologies, Monte Carlo, SAE paper 890087. 1989
18. *Ben Amar F., Grand C.* Quasi-Static Motion Simulation and Slip Prediction of Articulated Planetary Rovers Using a Kinematic Approach / ASME Journal of Mechanism and Robotics. 2013. Vol. 5, № 2. p. 13
19. *Cheng Y., et al.* The Mars Exploration Rovers Descent Image Motion Estimation System / IEEE Intelligent Systems. 2004. Vol. 19. № 3
20. *Diegel O., Badve A., Bright G., Podgieter J., Tlale S.* Improved Mecanum Wheel Design for Omni-directional Robots. <http://> Proc. 2002 Australasian

- Conference on Robotics and Automation (ARAA-2002), Auckland, 27–29 November 2002. pp. 117–121
21. *Duke, M.B.* Sample Return from the Lunar South Pole-Aitken Basin / Adv. Space Res. 2003. № 31. pp. 2347–2352
  22. *Endo G., Hirose Sh.* Leg-wheel hybrid walking vehicle (Roller-Walker) / Advanced Robotics. 1998. Vol. 13 Issue 3. pp. 241–242
  23. *Endo G., Hirose Sh.* Study on Roller-Walker - Improvement of Locomotive Efficiency of Quadruped Robots by Passive Wheels / Advanced Robotics. 2012. Vol. 26. Issue 8-9. pp. 969–988
  24. *Endo G., Hirose Sh.* Study on Roller-Walker - Adaptation of Characteristics of the propulsion by a Leg Trajectory / Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. 2008. pp. 1532–1537
  25. *Genta G.* Introduction to the Mechanics of Space Robots / Giancarlo Genta. NY: Springer. 2012. pp. 412–413
  26. *Grand C., BenAmar F., et al.* Decoupled control of posture and trajectory of the hybrid wheel-legged robot Hylos / In Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2004, April 26 – May 1. IEEE, New Orleans, LA, USA. 2004. pp. 5111–5116
  27. *Gronowicz A., Szrek J.* Design of LegVan Wheel-Legged Robot's Mechanical and Control System / SYROM 2009. 2009. pp. 145–158
  28. *Hauser K., Bretl T., Latombe J.C., Harada K., Wilcox B.* Motion Planning for Legged Robots on Varied Terrain / International Journal of Robotic Research - IJRR. 2008. vol. 27. № 11-12. pp. 1325–1349
  29. *Hillery M.* Omni-Directional Vehcile (ODV) by the U.S. Navy [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.arrirobotics.com/robomenu/odv.html>

30. *Hirose Sh., Takeuchi H.* Roller-Walker: A Proposal of New Leg-Wheel Hybrid Mobile Robot / Proc. Int. Conf. on Advanced Robotics. 1995. pp. 917–922
31. *Holmes P., Full R.J., Koditschek D., Guckenheimer J.* The dynamics of legged locomotion: models, analyses, and challenges / SIAM Rev. 2006. Vol. 48(2). pp. 207–304
32. *Ilon B.* Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base. Patent USA, 3876255, 1974 – 8 april. 1975
33. *Koditschek D.E., Full R.J., Buehler M.* Mechanical aspects of legged locomotion control / Arthropod Struct Dev. 2004. Vol. 33. pp. 251–272
34. *KUKA Roboter GmbH KUKA OMNIMOVE [Электронный ресурс]* — Режим доступа: <http://www.kuka-omnimove.com/en/>
35. *Lamon P., Krebs A., Lauria M., Siegwart R., Shooter S.B.* Wheel Torque Control for a Rough Terrain Rover / International Conference on Robotics and Automation — ICRA. 2004. vol. 5. pp. 4682–4687
36. *Lamon P.* 3D-Position Tracking and Control for All-Terrain Robots / Springer Tracts in Advanced Robotics. 2008. Vol.43, pp. 1–103
37. *Lauria M., Piquet Y., Siegwart R.* Octopus - An Autonomous Wheeled Climbing Robot / In Proceedings of the Fifth International Conference on Climbing and Walking Robots. Published by Professional Engineering Publishing Limited, Bury St Edmunds and London, UK. 2002
38. *Leppanen I., Salmi S., Halme A.* WorkPartner, HUT Automation's new hybrid walking machine / CLAWAR'98 First international symposium, Brussels, Belgium. 1998. pp. 26–28
39. *Lia Ch., Umbanhowar P. B., Komsuoglu H., Koditschek D.E., and Daniel I. Goldmana* Sensitive dependence of the motion of a legged robot on granular media / PNAS. 2009. vol. 106. № 9. pp. 3029–3034

40. *McLaughlin J.A.* The Soldier's Load and the Multifunctional Utility/Logistics and Equipment–Transport: thesis for master of military art and science in B.S., University of Scranton / John A. McLaughlin. — Scranton, Pennsylvania. 1997. pp. 1–19
41. Mecanum wheel [Электронный ресурс] — Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Mecanum\\_wheel](http://en.wikipedia.org/wiki/Mecanum_wheel)
42. *Mishkin A., Morrison J., et al.* Experiences with operations and autonomy of the Mars Pathfinder Microover / In Proceedings of the 1998 IEEE Aerospace Conference, Aspen, CO, March 1998.
43. *Pacejka H.B. and Bakker, E.* The Magic Formula Tire Model. Proc. 1st International Tire Colloquium, Delft, 1991. Vehicle System Dynamics. 1991. 21 (Suppl.). pp. 1–18
44. *Playter R., Buehler M., Raibert M.* BigDog / Proceedings of SPIE, ed Gerhart G.R., Shoemaker C.M., Gage D.W. (SPIE, San Diego). 2006. Vol. 6230. pp. 201–206
45. *Raibert M.H.* Legged robots / Commun ACM. 1986. Vol. 29. pp. 499–514
46. *Russell J.* Chandrayaan-2 / Jesse Russell, Ronald Cohn. NY: VSD. 2013. p. 218
47. *TheOldStagehand* Airtrax Sidewinder Forklift [Электронный ресурс] — Режим доступа: [http://wn.com/Mecanum\\_wheel](http://wn.com/Mecanum_wheel)
48. *Thueer T., Siegwart R.* Mobility evaluation of wheeled all-terrain robots / Robotics and Autonomous Systems - RaS. 2010. Vol. 58. № 5. pp. 508–519
49. *Vehicle Technologies, Inc.* Sidewinder [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.airtrax.com/>
50. *Zeitlin C. et al.* Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory / Science, Vol. 340, № 6136, pp. 1080–1084.