

ЧЕРНЫШЕВ Вадим Викторович

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШАГАЮЩИХ
ДВИЖИТЕЛЕЙ ЦИКЛОВОГО ТИПА МОБИЛЬНЫХ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.02.05
«Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2008

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

Научный консультант доктор физико-математических наук,
профессор Брискин Евгений Самуилович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Челпанов Игорь Борисович,

доктор технических наук, профессор
Умнов Николай Владимирович,

доктор технических наук, профессор
Тимофеев Адиль Васильевич.

Ведущая организация Институт проблем механики
им. А.Ю.Ишлинского РАН.

Защита состоится 21 апреля 2009 года в 16 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.229.12 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-
Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус I, аудитория 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,

Евграфов А.Н

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При движении в сложных условиях машины с шагающими движителями могут быть эффективнее традиционных транспортных средств. По этой причине разработки и исследования по механике и управлению движением шагающих роботов активно ведутся во всех развитых странах.

В области теории движения и управления мобильными роботами Россия, благодаря работам И.И. Артоболевского, В.В. Белецкого, А.П. Бессонова, Ю.В. Болотина, Е.С. Брискина, В.М. Буданова, Ю.Ф. Голубева, В.Г. Градецкого, Е.А. Девянина, Д.Н. Жихарева, В.В. Жоги, С.Л. Зенкевича, М.Б. Игнатьева, И.Ф. Кажукало, И.А. Каляева, А.Л. Кемурджиана, А.И. Кобрина, М.В. Кудрявцева, В.В. Лапшина, В.Б. Ларина, А.В. Ленского, В.А. Лопоты, И.М. Макарова, М.И. Маленкова, Ю.Г. Мартыненко, И.В. Новожилова, Д.Е. Охоцимского, В.Е. Павловского, А.К. Платонова, В.Е. Пряничникова, А.В. Тимофеева, Н.В. Умнова, А.М. Формальского, Ф.Л. Черноусько, Е.И. Юревича, А.С. Ющенко и др. занимает одно из ведущих мест. Также широко известны работы М.Г. Беккера, К.Дж. Валдрона, Р.Б. Маги, И. Сазерланда (США), М. Вукобратовича (Югославия), М. Канеко, И. Като, С. Хироси, И. Шимоямы (Япония), К. Бернса (Германия), Г.С. Вирка (Англия), Т. Зелинской (Польша), Б.Д. Петриашвили (Грузия) и др.

В работе исследуются мобильные робототехнические системы с движителями на базе цикловых механизмов шагания, работающих в противофазе. Использование цикловых движителей позволяет не заботиться о сохранении походки и устойчивости и исключает необходимость управляемой системы адаптации. В результате машина имеет минимальное число управляемых степеней свободы и становится существенно проще зарубежных аналогов адаптивного типа. Высокая проходимость и отличные тягово-сцепные свойства на слабых грунтах, экологичность, простота конструкции и надежность, а также сравнительно низкая стоимость, делают возможным создание и эксплуатацию шагающих роботов с цикловыми движителями уже в настоящее время.

Вместе с тем, при движении рассматриваемых машин, в силу причин заложенных в самом шагающем способе передвижения, имеют место колебания корпуса и неравномерность курсового движения, требующие значительных энергозатрат на преодоление цикловых сил инерции, а также высокие динами-

ческие нагрузки в двигателе. Это ограничивает их максимальную скорость. Также есть необходимость улучшения возможностей цикловых двигателей по адаптации к рельефу местности, профильной проходимости и маневренности.

Цель и задачи исследования. Основная цель работы — разработка, на базе моделирования динамики шагающей машины, методов расчета и проектирования шагающих двигателей циклового типа мобильных робототехнических систем, обеспечивающих повышение энергетической эффективности и скорости движения, а также повышение возможностей циклового двигателя по адаптации к рельефу местности, профильной проходимости и маневренности.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

- разработка обобщенной динамической модели многоногой шагающей машины с побортно объединенными в шагающие модули цикловыми двигателями в виде системы твердых тел с упруго-диссипативными связями;
- анализ структуры энергозатрат в системе и оценка возможности повышения скорости движения шагающих машин «тяжелой» весовой категории за счет оптимизационного синтеза механизмов шагания;
- разработка методов динамического управления колебаниями для взаимной компенсации в системе энергозатрат на преодоление цикловых сил инерции;
- разработка новых методов управления и способов повышения адаптивности и профильной проходимости шагающих машин с цикловыми двигателями до уровня аналогов с адаптивным управлением;
- разработка методов управления и расчета поворота шагающих машин на реальных грунтах, его оценка по критериям энергетической эффективности, маневренности и кинематической точности;
- разработка методики и проведение экспериментальных исследований динамики, тягово-сцепных свойств, грунтовой и профильной проходимости шагающих машин в условиях реальной местности.

Методы исследований базировались на основных положениях теоретической механики, теории механизмов и машин, общей теории колебаний и отдельных разделов теории электрических машин. При интегрировании уравнений движения использовались численные методы. Проверка разработанных моделей и алгоритмов расчета осуществлялась на тестовых задачах, имеющих

точные аналитические решения. **Достоверность результатов** обеспечивалась методами параметрической идентификации динамических систем на основании результатов экспериментов. Экспериментальные исследования осуществлялись в реальных условиях методами, основанными на видеосъёмке процесса движения с последующей покадровой обработкой видеозаписи на ЭВМ.

Научная новизна работы заключается в следующих **основных результатах, которые выносятся на защиту:**

— предложена обобщенная динамическая модель многоногой машины с бортно объединенными в шагающие модули (шагающие опоры) цикловыми движителями, которая позволяет решать задачи динамического анализа движения, включая изучение пространственных колебаний машины, как системы твердых тел — корпуса и шагающих опор правого и левого борта;

— исследована структура энергозатрат в системе и дана оценка возможности повышения скорости движения шагающих машин «тяжелой» весовой категории за счет оптимизационного синтеза механизмов шагания;

— разработан, на базе результатов динамического моделирования, метод динамического управления колебаниями в системе и предложен принцип выбора собственных частот подвески, обеспечивающий, без ухудшения показателей виброзащиты, взаимную компенсацию затрат мощности на преодоление цикловых сил инерции корпуса и шагающих опор, предложены новые схемы системы подрессоривания, позволяющие реализовать эффект взаимной компенсации энергозатрат на преодоление цикловых сил инерции;

— разработаны новые способы повышения адаптивности и профильной проходимости, основанные на пассивном и полуактивном управлении стопой, позволяющие довести профильную проходимость шагающих машин с цикловыми движителями до уровня аналогов с адаптивным управлением, исследована возможность корректировки программного движения ног и разработаны алгоритмы управления движением в условиях неполного и неоднозначного представления о преодолеваемом типе препятствии;

— разработаны методы расчета поворота шагающих машин на реальных грунтах, проведена его оценка по критериям энергетической эффективности, маневренности и кинематической точности, предложены новые способы его осуще-

ствления и новые механизмы поворота, принцип действия которых основан на управлении законом движения опорных точек;

— разработана методика экспериментальных исследований динамики, тягово-сцепных свойств, грунтовой и профильной проходимости шагающих машин.

Впервые в условиях реальной местности на базе полномасштабных опытных образцов экспериментально исследована динамика шагающих машин «тяжелой» весовой категории и изучены их тягово-сцепные свойства, грунтовая проходимость и маневренность.

Реализация результатов работы и их практическая ценность. Результаты работы использовались при разработке и испытаниях ряда опытных образцов шагающих машин. При участии ФГУП «Баррикады», Ин-та прикладной математики РАН, Ин-та механики МГУ и Ин-та машиноведения РАН созданы многоопорная дождевальная машина с шагающими опорами, работающая в автоматическом режиме, многоцелевое шагающее шасси, предназначенное для работы с различным технологическим оборудованием на слабых грунтах, а также робототехнические комплексы «Восьминог» (рис. 1) и «Восьминог-М». Машины могут использоваться при аварийно-спасательных работах в экстремальных условиях, при внедрении новых почвосберегающих технологий в лесном и сельском хозяйстве, в нефте- и газодобывающих отраслях и др. По теме диссертации получены 14 патентов на изобретения. Часть из них внедрена в опытных образцах. Робот «Восьминог-М» и его разработчики, включая автора, отмечены золотыми медалями ВВЦ на 1 и 2-й специализированных выставках «Робототехника» (Москва, ВВЦ, 2004).

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные методы расчета и проектирования, а также результаты экспериментов, позволяют на этапе разработки мобильных роботов осуществлять оптимальный выбор параметров шагающего движителя.



Рис. 1. Шагающий робототехнический комплекс «Восьминог»

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на:

- X, XI, XII, XIII, XIV, XV, XVII и XVIII-ой науч.-техн. конф. «Экстремальная робототехника» (СПбГПУ, ЦНИИ РТК, СПб, 1999–2007 гг.);
- Научн. шк.-конф. (с междунар. участием) 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004 гг. «Мобильные роботы и мехатронные системы» (МГУ, Москва);
- 1 и 2-й специализир. выставках «Робототехника» и междунар. сем. «Робототехника и мехатроника» (ВВЦ, Москва, 2004) и междунар. науч.-техн. выставке-конгрессе «Мехатроника и робототехника 2007» (СПб., 2007);
- 2 и 4-м междунар. сем. «Планетоходы, космическая робототехника и наземные роверы для экстремальных условий» (СПб., 2004, 2006) и междунар. науч.-практич. конф. «Особенности развития космической отрасли России и перспективы ее дальнейшей интеграции в систему международных экономических связей» (СПб., 2007);
- IV, V, VI и VII-ой междунар. науч.-техн. конф. «Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы» (п. Дивноморское, 2003, 2005, п. Кацивели, р. Крым, 2004, 2006);
- VIII и IX-ом Всерос. съезде по теор. и прикладной механике (2001, 2006);
- Междунар. конф. по теории механизмов и механике машин (Краснодар, 2006);
- Междунар. сем. «Образование через науку» (МГТУ им. Баумана, 2005);
- 3-й Всерос. конф. по механике и управлению движением шагающих машин (1995) и междунар. науч.-практич. конф. 1999, 2002, 2005 гг. «Прогресс транспортных средств и систем» (Волгоград);
- Междунар. шк.-сем. «Адаптивные роботы–2004» (СПб., 2004);
- II науч. конф. «Проблемы динамики и прочности исполнительных механизмов и машин» (Астрахань, 2004);
- 1 и 2-ой конф. «Проблемы механики современных машин» (Улан-Удэ, 2000, 2003);
- Отчетных конф. НТП «Науч. исслед. высш. шк. по приоритетным направлениям науки и техники» по подпрограмме «Транспорт» (МАИ, 2002) и «Производственные технологии–2001» (МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002);
- Науч. конф. «Нелинейные колебания механических систем» (Н.Новгород, 2002);
- Междунар. науч.-техн. конф. «Дороги–2001» и «Лес–2001» (Брянск, 2001);
- V-ой междунар. науч.-техн. конф. «Вибрация–2001» (Курск, 2001);
- IV-ой Всерос. конф. и сем. РФФИ «Региональные проблемы энергосбереже-

ния и пути их решения» (Н.Новгород, 2000);

— Междунар. науч.-практич. конф. «Проблемы адаптации техники к суровым условиям» (Тюмень, 1999);

— Междунар. симпоз. «Экология и безопасность жизнедеятельности, научно-прикладные аспекты, инженерные решения» (Волгоград, 1996);

— ежегодных науч.-техн. конф. ВолГТУ (1992–2008 гг.);

— 5-th (France, 2002) and 6-th (Italy, 2003) Int. Conf. «Climbing and Walking Robots and their Supporting Technologies. CLAWAR»;

— 11-th Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR 2003), (Portugal, 2003);

— 13-th (Poland, 2000) and 14-th (Italy, 2002) CISM–IFToMM Symposium «Theory and Practice of Robots and Manipulators. ROMANSY»);

— 5-th Int. Conf. on Vibration problems ICOVP–2001 (Moscow, 2001);

— 4-th Int. Conf. «Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001» (Germany, 2001);

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 80 публикациях, в том числе в 1 монографии и 15 статьях в журналах по перечню ВАК РФ. Результаты работы также отражены в 16 научно-исследовательских отчетах имеющих государственную регистрацию.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, основных выводов, списка литературы и приложений. Общий объём диссертации — 357 с., в тексте имеется 18 таблиц и 95 рисунков. Список литературы из 337 наименований представлен на 35 с., приложения на 24 с.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика диссертационной работы, обосновывается актуальность темы, формулируются цель исследований, определяются научная новизна и положения, подлежащие защите. Приводятся сведения об апробации, публикациях и практической значимости результатов работы.

В первой главе проводится анализ тенденций развития шагающих машин и мобильных шагающих роботов. Проведен анализ известных методов математического моделирования динамики шагающих машин и методов расчета и проектирования шагающих движителей. По результатам анализа в заключительной части главы формулируются основные задачи исследования.

Во второй главе проводится построение обобщенной динамической модели шагающей машины. При моделировании машина (рис.2) рассматривалась как система твердых тел — корпуса и шагающих опор (шагающих модулей) правого и левого борта, соединенных упругодиссипативными связями (подвеской). При описании движения положение центра масс корпуса относительно неподвижной системы отсчета $O\xi\eta\zeta$ задавалось радиус-вектором ρ_C . Оси $C\xi'\eta'\zeta'$, параллельные осям $O\xi\eta\zeta$, перемещаются поступательно вместе с центром масс корпуса. Положение главных центральных осей $Cx_1y_1z_1$ корпуса относительно осей $C\xi'\eta'\zeta'$ определялось корабельными углами: крена θ , дифферента ψ и рысканья φ . Положение центров масс шагающих опор задавалось радиус-векторами ρ_{C_1} и ρ_{C_2} . Оси $C_kx_ky_kz_k$ ($k=1,2$) жестко связаны с опорами в их центрах масс.

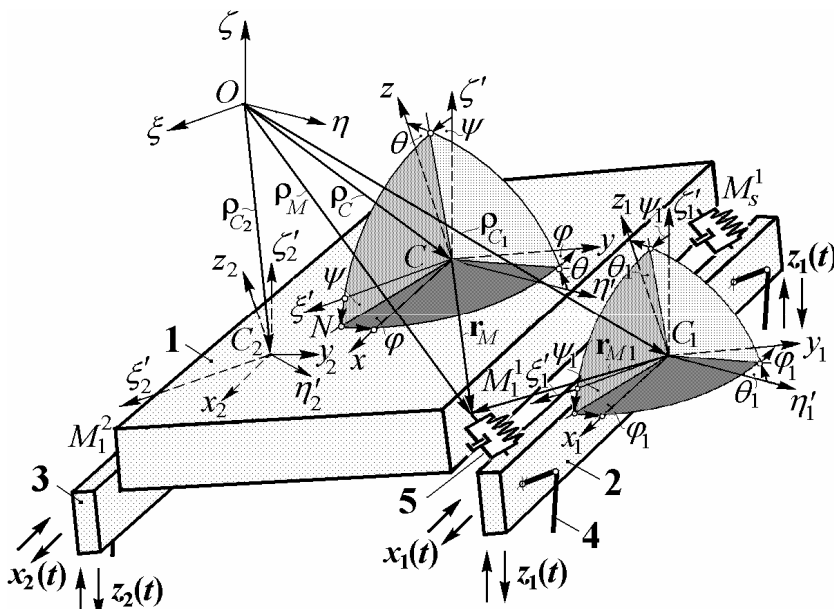


Рис.2. Расчетная схема шагающей машины: 1 — корпус; 2, 3 — шагающие опоры; 4 — ноги; 5 — подвеска

Координатные плоскости $C_kx_kz_k$ совпадают с плоскостями шагания. Оси C_kx_k направлены вдоль несущих балок шагающих опор. Положение связанных осей $C_kx_ky_kz_k$ относительно неизменно ориентированных $C_k\xi'\eta'\zeta'$ задавалось углами $\theta_k, \psi_k, \varphi_k$, образуемым аналогично углам θ, ψ, φ .

Корпус соединен с шагающими опорами в точках M_s^k посредством S связей с приведенными коэффициентами жесткости $c_{sx}^k, c_{sy}^k, c_{sz}^k$ и вязкого сопротивления $\mu_{sx}^k, \mu_{sy}^k, \mu_{sz}^k$. Частный случай связей — шарнирное крепление опор.

Модель движения корпуса в системе отсчета $Cx_1y_1z_1$ записывалась в виде

$$m_0 (\dot{\mathbf{v}}_C + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_C) = \mathbf{R}^{(e)}, \quad \Theta^C \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \Theta^C \cdot \boldsymbol{\omega} = \mathbf{L}_C^{(e)}, \quad (1)$$

где m_0, Θ^C — масса и центральный тензор инерции корпуса; $\mathbf{v}_C, \boldsymbol{\omega}$ — вектор скорости центра масс корпуса и вектор его угловой скорости; $\mathbf{L}_C^{(e)}, \mathbf{R}^{(e)}$ — главный момент и главный вектор внешних сил (сил тяжести и реакций элементов подвески, включающие упругие F_s^k и диссипативные R_s^k силы и реакции шарниров N_s^k).

Система уравнений (1) дополнялась кинематическими уравнениями, связывающими обобщенные скорости корпуса $\dot{\xi}_C, \dot{\eta}_C, \dot{\zeta}_C, \dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\phi}$ с квазискоростями $v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ (проекциями векторов \mathbf{v}_C и $\boldsymbol{\omega}$ на подвижные оси $Cxyz$).

Движение шагающих опор задавалось кинематическими уравнениями (считалось, что грунт недеформированный и отсутствует скольжение стоп):

$$\mathbf{v}_k = -\sum_{j=1}^J U_{jk} \mathbf{v}_{Cjk}^{(r)}, \quad \mathbf{a}_k = -\sum_{j=1}^J U_{jk} \mathbf{a}_{Cjk}^{(r)}, \quad (2)$$

где $\mathbf{v}_k, \mathbf{a}_k$ — вектора скорости и ускорения k -той шагающей опоры в абсолютном движении; $\mathbf{v}_{Cjk}^{(r)}, \mathbf{a}_{Cjk}^{(r)}$ — относительные скорости и ускорения опорных точек j -го механизма шагания движителя ($j=2, 3, \dots, J$) k -того борта; U_{jk} — единичная функция, описывающая состояние j -той ноги, равная 1 в опорной фазе и 0 при переносе. Считалось, что в опоре находится тот механизм шагания, опорная точка которого имеет в системе отсчета $C_k x_k y_k z_k$ наименьшую координату $z_{Cjk}^{(r)}$.

Механизмы шагания рассматривались как плоские I -звенные механизмы. Скорости узловых точек, включая опорные точки, определялись последовательным рассмотрением движений звеньев. Угловые скорости звеньев $\omega_{ij} = \dot{\varphi}_{ij}$ ($i=1, 2, \dots, I-1$) выражались через скорости точек, на которые наложены внешние связи и затем приводились к виду:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{2j} &= f_{2j}(\varphi_{1j}, \varphi_{2j}, \varphi_{3j}, \dots, \varphi_{(I-1)j}, \dot{\varphi}_{1j}), \\ \dot{\varphi}_{3j} &= f_{3j}(\varphi_{1j}, \varphi_{2j}, \varphi_{3j}, \dots, \varphi_{(I-1)j}, \dot{\varphi}_{1j}, \dot{\varphi}_{2j}), \\ &\dots \\ \dot{\varphi}_{(I-1)j} &= f_{(I-1)j}(\varphi_{1j}, \varphi_{2j}, \varphi_{3j}, \dots, \varphi_{(I-1)j}, \dot{\varphi}_{1j}, \dot{\varphi}_{2j}, \dot{\varphi}_{3j}, \dots, \dot{\varphi}_{I-2}). \end{aligned} \quad (3)$$

К уравнениям (2), (3) также добавлялись формулы для относительных координат $z_{Cjk}^{(r)}$, необходимые для определения момента смены стоп. Ускорения звеньев находились дифференцированием их скоростей. В итоге получалась система уравнений задающих движение шагающих опор в плоскости шагания. Положение самой плоскости шагания определяется динамикой всей системы.

Движение корпуса происходит под действием кинематических возмущений, создаваемых движителями и передающихся от шагающих опор через точки крепления подвески. Деформации связей и скорости их точек крепления в формулах для упругих и диссипативных составляющих реакций подвески, а также реакции в точках шарнирного закрепления корпуса заранее неизвестны.

Для точек M_{sk} и M_s^k крепления связи с номером s ($s=1, 2, \dots, S$) в любой момент времени справедливы векторные равенства

$$\rho_{M_s^k}^k = \rho_C + \mathbf{r}_{M_s^k}^k, \quad \rho_{M_{sk}}^k = \rho_{Ck} + \mathbf{r}_{M_{sk}}^k, \quad (4)$$

где $\rho_{M_s^k}^k, \mathbf{r}_{M_s^k}^k, \mathbf{r}_{M_{sk}}^k$ — радиус-вектора точек крепления связей в инерциальной системе отсчета $O\xi\eta\zeta$, в системе отсчета $Cxyz$, жестко связанной с корпусом и в системе отсчета $C_kx_ky_kz_k$, связанной с k -той шагающей опорой, соответственно¹.

Деформации связей характеризовались вектором $\Delta \mathbf{r}_s^k = \mathbf{r}_{M_{sk}}^k - \mathbf{r}_{M_s^k}^{cm}$, где $\mathbf{r}_{M_{sk}}^{cm}$ — радиус-вектор, определяющий в системе отсчета $C_kx_ky_kz_k$ положение точки $M_s^k = M_{sk}^{cm}$ при статическом равновесии системы. Считалось, что вектор $\mathbf{r}_{M_{sk}}^{cm}$ жестко связан с шагающей опорой и при движении остается в системе отсчета $C_kx_ky_kz_k$ постоянным как по модулю, так и по направлению. Диссипативные составляющие реакций подвески определяются скоростями $\Delta \dot{\mathbf{r}}_s^k$.

Реакции в точках шарнирного крепления корпуса к шагающим опорам увеличивают число неизвестных в системе уравнений (1)–(4) математической модели и она дополнялась уравнениями, связывающими в подвижной системе $Cxyz$ скорость центра масс корпуса и скорости точек его шарнирного крепления

$$\mathbf{v}_{M_s^k}^k = \mathbf{v}_C + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{M_s^k}^k, \quad (5)$$

где $\mathbf{v}_{M_s^k}^k = \mathbf{v}_{M_{sk}}^k$ — вектор задаваемой скорости точки M_s^k шарнирного крепления корпуса к k -той шагающей опоре.

Обобщенная динамическая модель легко трансформируется в частные модели для конкретных типов подвески. С учетом свойств подвески уравнения модели, как правило, упрощаются. Результаты расчета некоторых режимов движения робота «Восьминог» с полужесткой подвеской с независимым креплением шагающих опор (рис.3), приведены на рис.4. Видно, что для робота характерна существенная неравномерность движения. Это требует значительных энергозатрат на преодоление цикловых сил инерции.

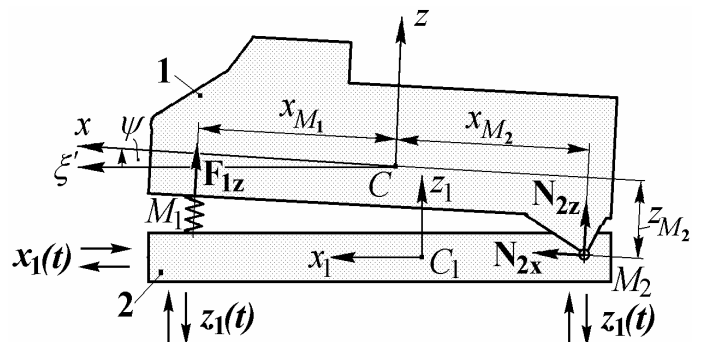


Рис.3. Расчетная схема робота «Восьминог»: 1 — корпус; 2 — шагающие опоры

которых режимов движения робота «Восьминог» с полужесткой подвеской с независимым креплением шагающих опор (рис.3), приведены на рис.4. Видно, что для робота характерна существенная неравномерность движения. Это требует значительных энергозатрат на преодоление цикловых сил инерции.

¹ Нижний индекс k показывает номер шагающей опоры ($k=1,2$), верхний индекс k относится к k -тому борту корпуса шагающей машины, к которому крепится шагающая опора с номером k

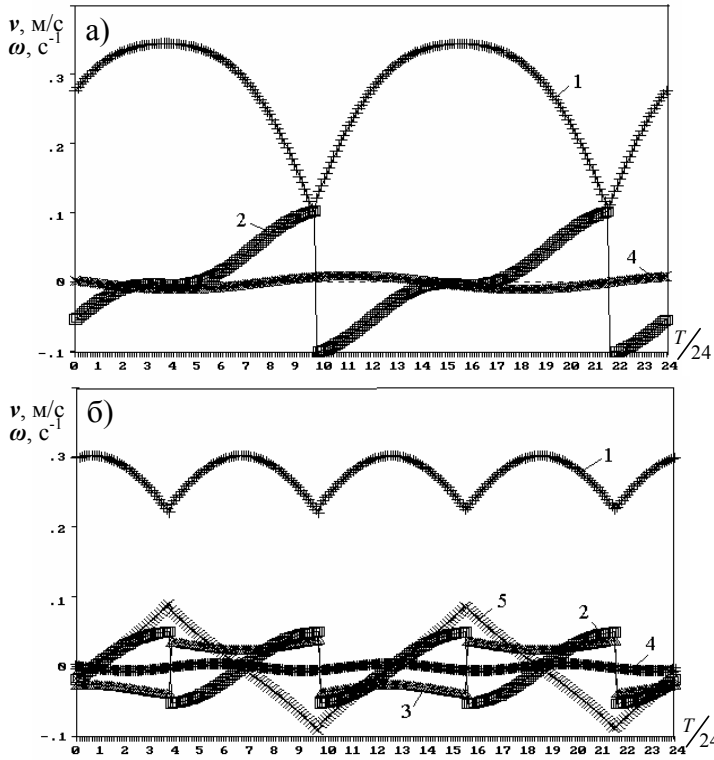


Рис.4. Цикловые (за период T) зависимости $v_x, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ (кривые 1 - 5, соответственно) робота «Восьминог» при синхронном (а) и противофазном (б) движении бортов

v_{kx} — курсовые скорости бортов, k_f — коэффициент сопротивления движению и мощность $W_{кол}$, расходуемую на колебания в системе. $W_{кол}$ состоит, в свою очередь, из затрат на преодоление силы тяжести G робота

$$W_0^G = \sum_{k=1}^2 v_{kz} G/2, \quad (6)$$

мощности идущей на преодоление сил инерции корпуса и шагающих опор

$$W_0^\Phi = \Phi_{0x} v_x + \Phi_{0z} v_z + M_{0x}^\Phi \omega_x + M_{0z}^\Phi \omega_z, \quad (7)$$

а также суммарных затрат мощности на преодоление сил инерции в движителях, которые также носят периодический характер

$$W_{об}^\Phi = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^2 \left(\Phi_{ijkx} \dot{x}_{C_{ijk}} + \Phi_{ijkz} \dot{z}_{C_{ijk}} + M_{ijy}^\Phi \omega_{ijy} \right), \quad (8)$$

где $\Phi_{0x} = -m_0 a_x$, $\Phi_{0z} = -m_0 a_z$, $M_{0x}^\Phi = -J_{C_x} \varepsilon_x$, $M_{0y}^\Phi = -J_{C_y} \varepsilon_y$ — проекции на связанные оси главного вектора Φ_0 и момента M_0^Φ сил инерции корпуса; $\Phi_{ijkx} = -m_i \ddot{x}_{C_{ijk}}$, $\Phi_{ijkz} = -m_i \ddot{z}_{C_{ijk}}$ и $M_{ijy}^\Phi = -J_{C_{iy}} \varepsilon_{ijk}$ — проекции на оси $C_k x_k y_k z_k$ и момент сил инерции звеньев механизмов шагания; $\dot{x}_{C_{ijk}}$, $\dot{z}_{C_{ijk}}$, $\ddot{x}_{C_{ijk}}$, $\ddot{z}_{C_{ijk}}$ — составляющие скоростей и ускорений центров масс звеньев в плоскости шагания; m_i и $J_{C_{iy}}$ — масса и момент инерции звена.

В третьей главе исследована структура энергозатрат на передвижение в системе с жесткими связями и проведена оценка возможности повышения скорости шагающих машин «тяжелой» весовой категории. Показано, что задача кардинального снижения затрат на преодоление сил инерции не может быть достигнута, в полной мере, только оптимизационным синтезом механизмов шагания.

Потребная на движение мощность включает в себя потери на пресечение грунта $W^f = \sum_{k=1}^2 k_f v_{kx} G/2$, где

Мощность при движении реализуется не всегда — возможен срыв грунта при $\Phi_x > k_\phi G$ или переход к бегу при $\Phi_z > G$. Для определения реализуемых мощностей вычислялся главный вектор Φ сил инерции машины, равный сумме главных векторов сил инерции корпуса Φ_0 и звеньев механизмов шагания Φ_{ijk} .

Исследовалась структура энергозатрат в диапазоне скоростей 1 - 10 км/ч. Рассматривался наиболее энергоемкий режим, соответствующий случаю синхронного движения шагающих опор. Анализ структуры затрат и оценка возможности повышения скорости «тяжелых» шагающих машин базировались на

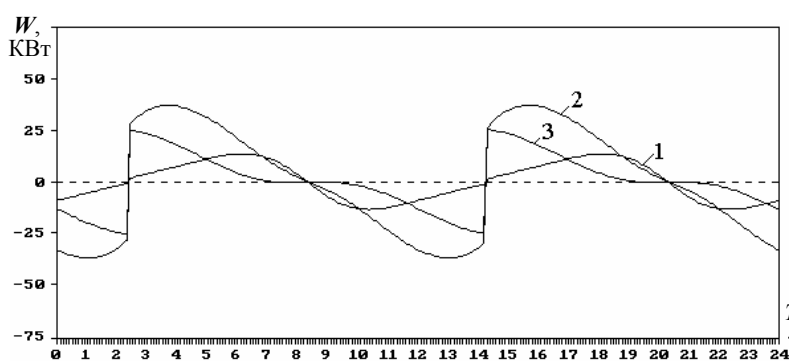


Рис.5. Структура цикловых затрат мощности на колебания шагающего робота «Восьминог» при средней курсовой скорости 5 км/ч: 1 — $W_{об}^\Phi$; 2 — W_0^Φ ; 3 — W_0^G

результатах полученных для 5-ти тонного шагающего робота «Восьминог» (рис.5). Наличие образца с известными кинематическими и инерционными характеристиками двигателя существенно облегчили проведение анализа.

Анализ показал, что при невысоких скоростях передвижения (порядка 1-2 км/ч) основной объем энергозатрат связан с преодолением сил тяжести при вертикальных колебаниях корпуса. Затраты на преодоление сил инерции корпуса и в двигателе в диапазоне низких скоростей незначительны, из-за малости сил инерции. Изменение скорости приводит к изменению структуры энергозатрат в системе. При росте скорости составляющие мощности W_0^Φ и $W_{об}^\Phi$ растут наиболее значительно, так как они пропорциональны кубу курсовой скорости. Именно они ограничивают максимальную скорость шагающего способа передвижения. Потери на прессование грунта W^f могут достигать в тяжелых условиях до 25–30% от общих затрат мощности, однако в маршевых режимах движения они составляют менее 10%.

С целью повышения скорости движения исследовалась возможность оптимизации закона движения опорной точки по траектории с помощью различного вида механизмов-корректоров, ускоряющих фазу переноса, рассматривались двигатели с большим числом звеньев и большим числом ног, а также изучено влияние на энергозатраты длины шага.

В четвертой главе рассматриваются вопросы пассивного поддресоривания и динамического управления колебаниями в системе. Представляя движение машины как системы твердых тел с упругодиссипативными связями, определялись параметры подвески, обеспечивающей, помимо традиционных для нее функций, взаимную компенсацию сил инерции шагающих опор и корпуса.

Подвеска должна обеспечивать условие совместного движения корпуса и шагающих опор. Для этого требуется параллельность отдельных осей или координатных плоскостей систем отсчета Cx_{kz} и $Cx_k y_k z_k$, а также равенство нулю отдельных углов Эйлера или части квазискоростей. Анализ известных схем подвесок показал, что для шагающих роботов могут быть реализованы побортно индивидуальные схемы поддресоривания рис.6, а также полужесткая схема. Конструктивное выполнение подвесок колесных и гусеничных машин зачастую не подходят для шагающих роботов. Разработаны новая схема полужесткого

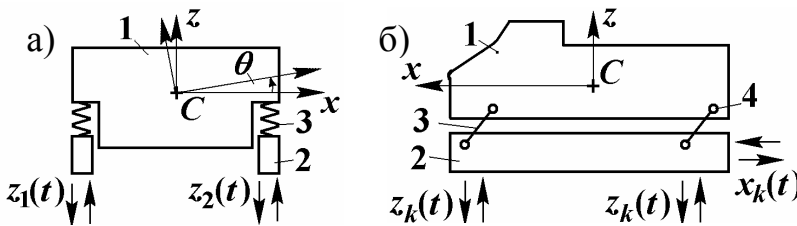


Рис.6. Побортно индивидуальные схемы подвески: 1 — корпус; 2 — шагающие опоры; 3, 4 — элементы подвески

типа (рис.3), реализованная в роботе «Восьминог», а также рычажная подвеска с поперечным качанием рычагов, относящаяся к схеме рис.6а.

Снижение инерционных энергозатрат планировалось путем перераспределения колебательной энергии, а не путем ее поглощения, поэтому введение в подвеску демпфирующих устройств, например амортизаторов, не предусматривалось.

При отсутствии неупругого сопротивления уравнения движения (1) корпуса для побортно индивидуальных схем поддресоривания приводятся к виду:

$$\begin{aligned}
 m_0 (\dot{v}_x - \omega_z v_y) &= \sum_{k=1}^2 \sum_{s=1}^S (F_{sx}^k), & J_x \dot{\omega}_x &= \sum_{k=1}^2 \sum_{s=1}^S (y_{M_S}^k F_{sz}^k - z_{M_S}^k F_{sy}^k), \\
 m_0 (\dot{v}_y + \omega_z v_x - \omega_x v_z) &= \sum_{k=1}^2 \sum_{s=1}^S (F_{sy}^k), & J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z &= \sum_{k=1}^2 \sum_{s=1}^S (z_{M_S}^k F_{sx}^k - x_{M_S}^k F_{sz}^k), \\
 m_0 (\dot{v}_z + \omega_x v_y) &= \sum_{k=1}^2 \sum_{s=1}^S (F_{sz}^k) - m_0 g, & J_z \dot{\omega}_z &= \sum_{k=1}^2 \sum_{s=1}^S (x_{M_S}^k F_{sy}^k - y_{M_S}^k F_{sx}^k),
 \end{aligned} \quad (9)$$

где m_0, J_x, J_y, J_z — масса и осевые моменты инерции корпуса.

Для аналитического определения собственных частот системы, при которых имеет место эффект взаимной компенсации инерционных энергозатрат, периодические зависимости $x_k(t)$ и $z_k(t)$ аппроксимировались тригонометрическим полиномом. Гармонический анализ показал, что для двуногих движителей ($J=2$) наиболее существенны члены 2-й гармонической частоты. Используя

гармоническое представление закона движения шагающих опор, система (9), если пренебречь рысканием машины, приводится к независимым уравнениям

$$\begin{aligned}\ddot{x} + k_1^2 x &= 2x_{ka} (c_x / m_0) \cos \Delta \varphi_{12} \sin(pt + \Delta \varphi_{12}), \\ \ddot{z} + k_2^2 z &= 2z_{ka} (c_z / m_0) \cos \Delta \varphi_{12} \cos(pt + \Delta \varphi_{12}), \\ \ddot{\theta} + k_3^2 \theta &= z_{ka} (c_z B / J_x) \sin \Delta \varphi_{12} \sin(pt + \Delta \varphi_{12}).\end{aligned}\quad (10)$$

где x_{ka} и z_{ka} — амплитуда колебаний шагающих опор, k_1, k_2, k_3 — собственные частоты системы; $p = 2\omega_1$ — частота вынуждающего воздействия; ω_1 — угловая скорость ведущего кривошипа; B — колея машины; $\Delta \varphi_{12}$ — бортовой сдвиг фаз.

Потребная на колебания мощность бортового привода равна

$$W_k = F_{kx}^{np} \dot{x}_k + F_{kz}^{np} \dot{z}_k, \quad (11)$$

где F_{kx}^{np}, F_{kz}^{np} — курсовые и вертикальные составляющие приводных сил, развиваемых механизмами шагания k -го борта при движении робота.

Силы F_{kx}^{np}, F_{kz}^{np} можно определить, составив, согласно принципу Даламбера, условия динамического равновесия несущей балки шагающей опоры

$$F_{kx}^{np} = \Phi_{kx} + F_{kx}, \quad F_{kz}^{np} = m_k g + \Phi_{kz} + F_{kz}, \quad (12)$$

где F_{kx}, F_{kz} — приведенные к бортам курсовая и вертикальная силы упругости подвески; $\Phi_{kx} = m_k \ddot{x}_k$ и $\Phi_{kz} = m_k \ddot{z}_k$ — составляющие сил инерции опор.

Выражения (12) позволяют определить условия необходимые для взаимной компенсации энергозатрат на преодоление сил инерции корпуса и шагающих опор. При синхронном движении бортов, например, мощность привода идущая на колебания в системе, в соответствии с (12), будет равна

$$W = Mg \dot{z}_k + 2[m_k \ddot{x}_k + c_x (x_k - x)] \dot{x}_k + 2[m_k \ddot{z}_k + c_z (z_k - z)] \dot{z}_k. \quad (13)$$

Тогда взаимную компенсацию затрат мощности идущих на преодоление курсовых и вертикальных сил инерции в системе можно обеспечить, в соответствии с (13), при одновременном выполнении условий

$$m_k \ddot{x}_k + c_x (x_k - x) = 0, \quad m_k \ddot{z}_k + c_z (z_k - z) = 0, \quad (14)$$

либо при

$$m_k \ddot{x}_k \dot{x}_k + c_x x_k \dot{x}_k - c_x x \dot{x}_k + m_k \ddot{z}_k \dot{z}_k + c_z z_k \dot{z}_k - c_z z \dot{z}_k = 0. \quad (15)$$

Полученные условия, совместно с уравнениями (10) позволяют определить искомые собственные частоты системы. В случае подвески полужесткого типа собственные частоты определяются аналогично, только в системе (10) к упругим силам F_s^k добавляются реакции шарниров N_s^k .

Подвеска по схеме рис.6а, при соответствующем выборе собственных частот, может обеспечить компенсацию только вертикальных составляющих сил инерции. Балансирная подвеска рис.6б и подвеска рис.3 могут обеспечить компенсацию как курсовых, так и вертикальных составляющих сил инерции.

Полученные аналитические условия из-за принятых допущений лишь ориентировочно определяет жесткость подвески и собственные частоты системы. Для нахождения их оптимальных значений, с точки зрения энергопотребления и виброзащиты, осуществлялось численное моделирование колебательных процессов. Варьировалась жесткость подвески и геометрические ее параметры. Также учитывалась малая диссипация — трение в шарнирах подвески.

Результаты динамического моделирования показали принципиальную возможность взаимной компенсации затрат мощности на преодоление цикловых сил инерции корпуса и шагающих опор без ухудшения показателей виброзащиты. За счет взаимной компенсации цикловых сил инерции шагающих опор и корпуса можно существенно снизить амплитуду переменной составляющей потребной на движение мощности и значительно увеличить максимальную скорость шагающей машины. Эффект взаимной компенсации инерционных затрат мощности шагающих машин «тяжелой» весовой категории заметен уже при скорости порядка 4 – 5 км/ч. При росте скорости движения эффективность метода резко возрастает, так как затраты на преодоление цикловых сил инерции пропорциональны кубу курсовой скорости.

Определенное внимание было уделено исследованию возможности использования электродвигателей колебательного движения для привода шагающих роботов. Привод, в этом случае, обеспечивает рекуперацию энергии, затраченной на преодоление сил инерции в системе, дает широкие возможности для варьирования параметров шагания и, кроме того, позволяет реализовать движение в двух режимах: маршевом (при питании электродвигателей переменным током) и режиме специального маневрирования (при питании от источника постоянного тока). Изучены особенности динамики установившихся режимов движения, проанализированы некоторые варианты управления механизмами шагания. Показано, что электродвигатели колебательного движения могут быть использованы для привода небольших шагающих аппаратов.

Пятая глава посвящена разработке новых методов управления и способов повышения адаптивности и профильной проходимости. У шагающих машин с цикловыми движителями возможности по адаптации к опорной поверхности и профильной проходимости ограничены жесткой траекторией опорной точки.

Разработана и реализована в работе «Восьминог» система пассивной адаптации стопы к рельефу местности. Был синтезирован механизма шагания, обеспечивающий, за счет кинематики, подъем носка стопы при переносе (рис.11).

При синтезе механизма шагания, для вычисления угла наклона стопы φ_{4j} в фазе переноса к системе (3) динамической модели добавлялись уравнения

$$d\varphi_{4j}/dt = (1 - U_j)\omega_{qj} \quad (j = 1, 2), \quad (16)$$

где ω_{qj} — угловая скорость опорного звена механизма шагания.



Рис.7. Схема механизма шагания с пассивно управляемой стопой (а) и траектория его опорной точки с положениями стопы при прямом (б) и реверсивном (в) движении: 1 — кривошип; 2 — Г-образный шатун (опора); 3 — коромысло; 4 — стопа; 5 — демпфер

При лыжеобразной стопе в фазе переноса возможен контакт носка или пятки стопы с грунтом и их движение юзом. В этом случае для движителя на базе 4-х звенных механизмов шагания уравнения (16) приводятся к виду:

$$\frac{d\varphi_{4j}}{dt} = \begin{cases} (1-U_j)\omega_{2j} \text{ nпу} & \begin{cases} z_{D^j} > \sum_{j=1}^2 (1-U_j)z_{Cj} \text{ и } z_{D^*j} > \sum_{j=1}^2 (1-U_j)z_{Cj}, \\ z_{D^j} = \sum_{j=1}^2 (1-U_j)z_{Cj} \text{ и } v_{Cjz} + \omega_{2j}l_4 \cos \varphi_{4j} > 0, \\ z_{D^*j} = \sum_{j=1}^2 (1-U_j)z_{Cj} \text{ и } v_{Cjz} - \omega_{2j}l_4 \cos \varphi_{4j} > 0, \end{cases} \\ (1-U_j)\frac{v_{Cjz}}{l_4 \cos \varphi_{4j}} \text{ nпу} & \begin{cases} z_{D^j} = \sum_{j=1}^2 (1-U_j)z_{Cj} \text{ и } v_{Cjz} + \omega_{2j}l_4 \cos \varphi_{4j} \leq 0, \\ z_{D^*j} = \sum_{j=1}^2 (1-U_j)z_{Cj} \text{ и } v_{Cjz} - \omega_{2j}l_4 \cos \varphi_{4j} \leq 0, \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

где $z_{D^j} = z_{Cj} + l_4 \sin \varphi_{4j}$ и $z_{D^*j} = z_{Cj} + l_4 \sin(\varphi_{4j} + \pi)$ — координаты носка и пятки стопы в системе отсчета связанной с корпусом.

Изменение угла наклона стопы за цикл приведено на рис.8.

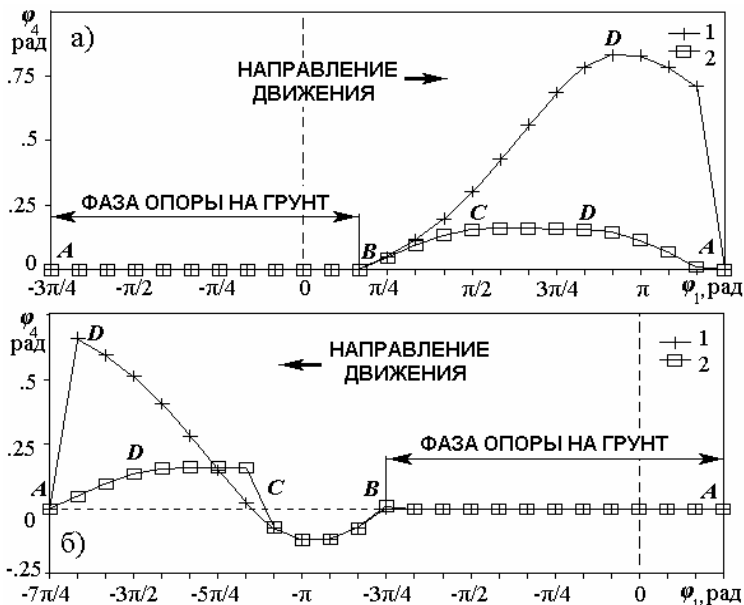


Рис.12. Изменение угла наклона стопы за цикл при прямом (а) и реверсивном (б) движении: 1 — стопа «hoof-foot»; 2 — лыжеобразная стопа ($l_4 = 1,6$ м)

Пассивная адаптация стопы более чем вдвое повышает высоту преодолеваемого препятствия: $h \approx 2H_{\max} + h_{cm}$, где H_{\max} — высота шага, h_{cm} — толщина стопы. В 2–3 шага проходятся и более высокие препятствия. При втором шаге наклон стопы, из-за смены условий контакта с грунтом, стремиться к кривым 1. В работе «Восьминог-М» для повышения профильной проходимости дополнительно были установлены подъемно-поворотные механизмы. Прохождение препятствия разделено в этом случае на несколько фаз (рис. 9): Натурная проверка показала эффективность предлагаемого способа. К его недостаткам надо отнести снижение средней скорости и значительный вес дополнительных механизмов (до 10% от веса шасси).

Геометрические возможности движителя по профильной проходимости не всегда реализуются из-за ограниченной мощности силовой установки и неудачного положения стоп перед препятствием. Доказано, что соответствующим выбором алгоритма прохождения препятствия, можно избежать роста потребной мощности W , несмотря на затраты на подъем корпуса. Например, при прохождении ступени, рис.10, амплитуды мощности горизонтального движения $W_{гор}$ и W практически одинаковы, хотя работа за цикл, характеризуемая заштрихованной площадью, возрастает на ΔA .

Для более полной реализации возможностей движителя по профильной проходимости разработаны способы корректировки параметров шага. Рассмотрен механизм шагания с дополнительной управляемой степенью свободы в виде гидроцилиндра. Алгоритм его управления выбирается в зависимости от

Рис.9. Фазы преодоления выступающего препятствия

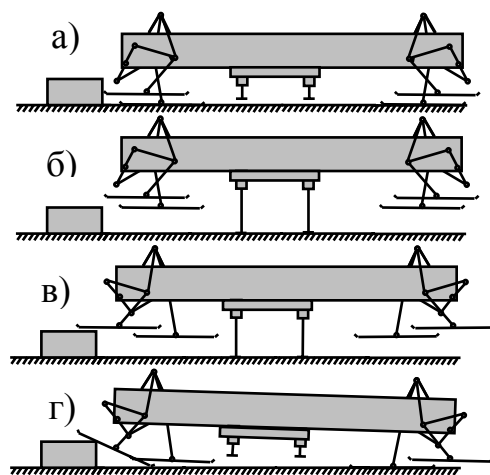


Рис.9. Фазы преодоления выступающего препятствия

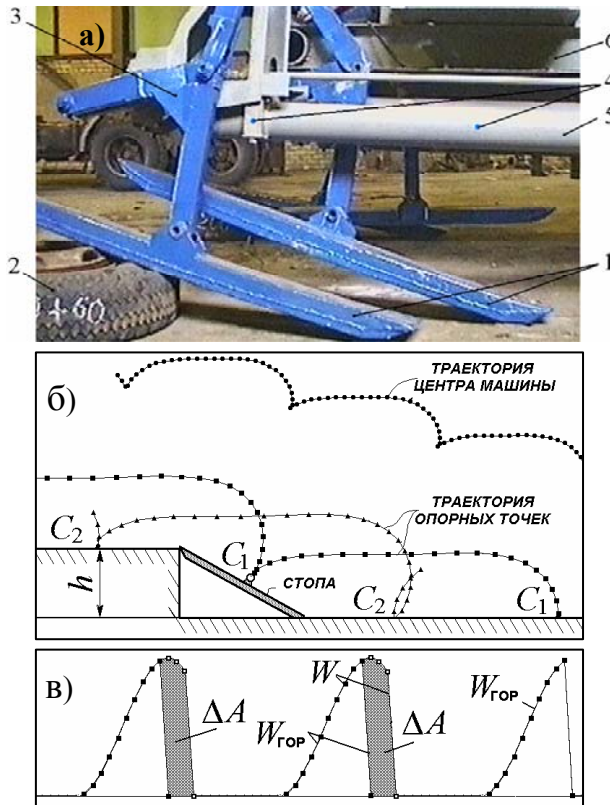


Рис.10. Отработка алгоритмов прохождения локального препятствия (а): движение стоп и центра машины (б); изменение мощности (в)

дискретном повороте оси движитель остается одностепенным.

Предложен новый способ управления стопой за счет управляемой диссипации в дополнительном демпфере 5 (рис.7). Он созда-

ет, при разности угловых скоростей $\Delta\omega_{24}$ опорного звена и стопы, опорный момент $M_R(\mu, \Delta\omega_{24})$ в шарнире стопы. В фазе переноса M_R позволяет минимизировать влияние на программное движение шарнирно закрепленной стопы случайных факторов. При смене стоп рост μ способствует плавному изменению опорных реакций и снижению интенсивности ударных процессов. Работа демпфера на этом этапе осуществляется за счет энергии теряемой в базовом механизме шагания на удар. Если при смене стоп μ превосходит критическое значение $\mu_{кр}$, при котором нормальная реакция грунта N_1 под пяткой стопы находящейся в переносе, начинает превышать N_2 стопы находящейся в опорной фазе, то на заключительном этапе фазы переноса возникает дополнительная фаза цикла — фаза опоры на пятку. Она, задерживая при смене стоп «проседание» корпуса, обусловленное несовершенством траектории опорной точки, позволяет снизить

внешних условий, а работа осуществляется только при маневрировании. В маршевом режиме движения механизм остается одностепенным.

Также предложен новый механизм шагания с трансформируемой траекторией опорной точки. В механизме точка подвеса коромысла расположена на колленчатой оси, общей для пары механизмов. Управление сводится к повороту оси (дискретному или по заданному закону) и смещению точки подвеса коромысла. В результате базовая траектория I (рис.11) трансформируется и высота шага увеличивается с H_I до H_{II} . При

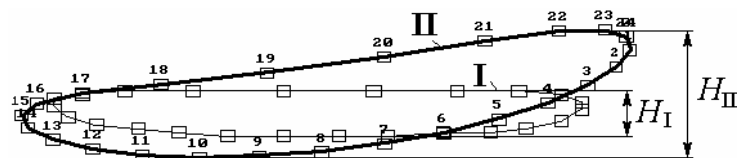


Рис.11.

вертикальные колебания корпуса и энергозатраты на их поддержание. В опорной фазе наличие M_R приводит к дополнительным потерям и нежелательно, однако, для повышения тягово-сцепных свойств путем изменения эпюры распределения нагрузки по длине стопы, допустимо.

Управление диссипацией позволяет изменять длину шага, в частности при встрече с препятствием (рис. 12). На этапе (а) 1-я стопа носком (точкой D'_1) касается препятствия. Вследствие относительного вращения стопы в ее шарнире появляется момент M_R . Бортовая система управления по отклонению значения $\Delta\omega_{24}$ от программного, выдает команду на увеличение μ . Появляется вертикальная опорная реакция N_1 . На этапе (б), пятка стопы 1 (точка D''_1) опускается на грунт и движется юзом, преодолевая силу сцепления $P''_{\phi 1}$, а опорная реакция N_1 плавно возрастает. На этапе (в) N_1 становится больше N_2 — происходит плавная смена стоп. В итоге исключается удар стопы о препятствие, а 1-я стопа располагается непосредственно перед препятствием.

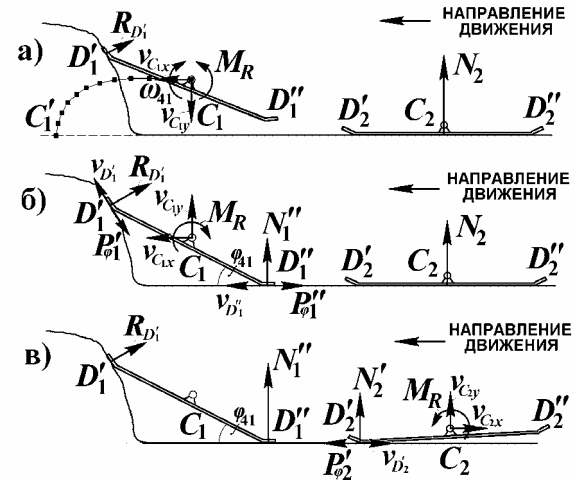


Рис.12. Корректировка длины шага при встрече с препятствием

Разработаны базовые алгоритмы прохождения препятствий в условиях нечеткого представления о положении и типе препятствия. Управление, например, во всех случаях рис.13, сводится к одному алгоритму — если после переноса стопы, когда она движется совместно с опорной стойкой ($\Delta\omega_{24}=0$), у стопы появляется относительная угловая скорость (стопа коснулась грунта), то выдается команда на повышение μ в демпфере для создания опорного момента M_R . Команда на снижение μ проходит при $\omega_{24}=0$ (стопа в опоре на грунте), либо при $\Delta\omega_{24}=0$ (стопа снова в переносе).

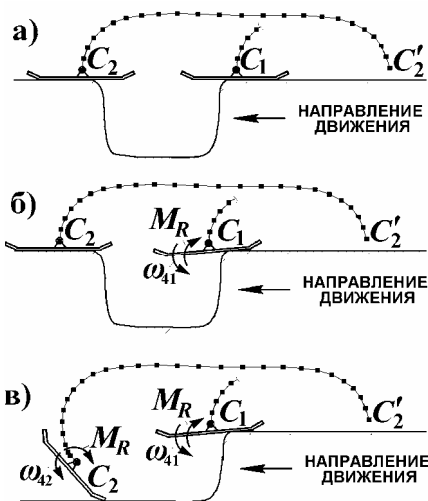


Рис.13. Управление стопой при нечетком представлении о типе и положении препятствия

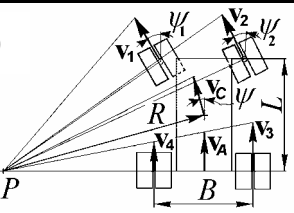
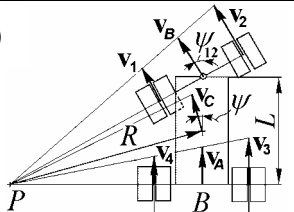
В результате для движителя отпадает необходимость дальномерно-обзорных систем и измерительных устройств ближнего действия.

В шестой главе рассматривается поворот шагающих машин с цикловыми двигателями. Осуществление поворота возможно либо путем изменения ориентации плоскостей шагания (табл.1), либо за счет разности бортовых скоростей.

Поворот по схеме (а) табл.1 требует одновременного управления скоростями всех двигателей в функции от углов Ψ_1, Ψ_2 и радиуса поворота R . В предложенной новой схеме (б) число управляемых параметров уменьшается — необходимо лишь согласованное управление скоростями двигателей в функции от радиуса R (угол Ψ_{12} не требует управления).

Таблица 1.

Поворот изменением ориентации плоскостей шагания

<p>а)</p> 	$v_1 = \frac{v_c}{R} \frac{L}{\sin \psi_1}, \quad v_2 = \frac{v_c}{R} \frac{L}{\sin \psi_2},$ $v_3 = \frac{v_c}{R} \frac{L \cos \psi_2}{\sin \psi_2}, \quad v_4 = \frac{v_c}{R} \frac{L \cos \psi_1}{\sin \psi_1}.$
<p>б)</p> 	$v_1 = \frac{v_c}{R} \left(\frac{L}{\sin \psi_{12}} - \frac{B}{2} \right), \quad v_2 = \frac{v_c}{R} \left(\frac{L}{\sin \psi_{12}} + \frac{B}{2} \right),$ $v_3 = \frac{v_c}{R} \left(\frac{L \cos \psi_{12}}{\sin \psi_{12}} + \frac{B}{2} \right), \quad v_4 = \frac{v_c}{R} \left(\frac{L \cos \psi_{12}}{\sin \psi_{12}} - \frac{B}{2} \right).$

Поворот робота «Восьминог» осуществляется более простым в управлении бортовым способом — за счёт остановки или реверсивного движения отстающего борта, либо с помощью подъемно-поворотных механизмов (рис.9).

Бортовой поворот реализуется лишь с фиксированными радиусами $R=0$ и $R=B/2$ и более энергоемок. Сопротивление повороту зависит от схемы размещения ног. При повороте машины 1, рис.14, касательная сила, действующая на элементарную площадку стопы 2, равна $ds = k_\mu p dx dy$, где k_μ — коэффициент сопротивления повороту, p — давление стопы на грунт. Момент сопротивления повороту N -ногой машины равен:

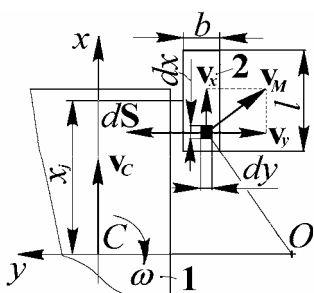


Рис.14.

где N_{jk} — нормальная реакция грунта под j -той стопой.

$$M_C = \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^N U_{jk} \iint_{A_{cm}} k_\mu \frac{N_{jk}}{bl} x dy dx, \quad (18)$$

Значения N_{jk} определяются числом и расположением ног находящихся в опоре. Для определения N_{jk} составлялись уравнения равновесия,

которые дополнялись условиями совместности деформаций, если в опоре находилось более 3-х ног. Использовалась линейная модель грунта: $N_{jk} = -k_{zp} \Delta z_{jk}$, где k_{zp} , Δz_{jk} — жёсткость и деформация грунта. Рассматривались все возможные комбинации ног. Значения M_C для 6-ти и 8-ми ногих машин даны в табл.3.

Таблица 2

Момент сопротивления бортовому повороту

	Попарно-поперечное группирование ног	Последовательное размещение ног	Смешанная схема размещения ног
M_C	$0,33 - 0,45 k_{\mu}GL$	$0,21 - 0,24 k_{\mu}GL$	$0,28 - 0,40 k_{\mu}GL$

Увеличение силы тяги на забегавшем борту при малых радиусах поворота делает необходимым проверку его возможности по сцеплению. Для шагающих машин коэффициент свободной удельной силы тяги, без учета сил инерции, равен коэффициенту сцепления k_{ϕ} движителя с грунтом. Для поворота необходимо, чтобы $k_{\phi} G/2 \geq P_2$, где $P_2 = M_C/B$ — сила тяги движителей забегавшего борта. Это возможно при $M_C \leq k_{\phi} BG/2$. Анализ показывает, что бортовой поворот реализуется по сцеплению не на всех грунтах.

Эффективность бортового поворота может быть повышена за счет управления движением опорных точек по траектории. Предложен механизм поворота такого типа на основе асинхронной карданной передачи с изменяемым углом наклона промежуточного вала (рис.15). Для неравномерного вращения кривошипа, вилки промежуточного вала кардана взаимно перпендикулярны. Неравномерность возрастает с ростом угла γ и усиливается после 2-го шарнира Кардана–Гука. При увеличении γ скорость опорных точек при переносе растет, а в опорной фазе (точки с заливкой) снижается. Механизм позволяет варьировать относительный радиус поворота от ∞ до $\rho = 3 - 5$ и может выполнять дополнительные функции — регулировку скорости, горизонтирование корпуса и др.

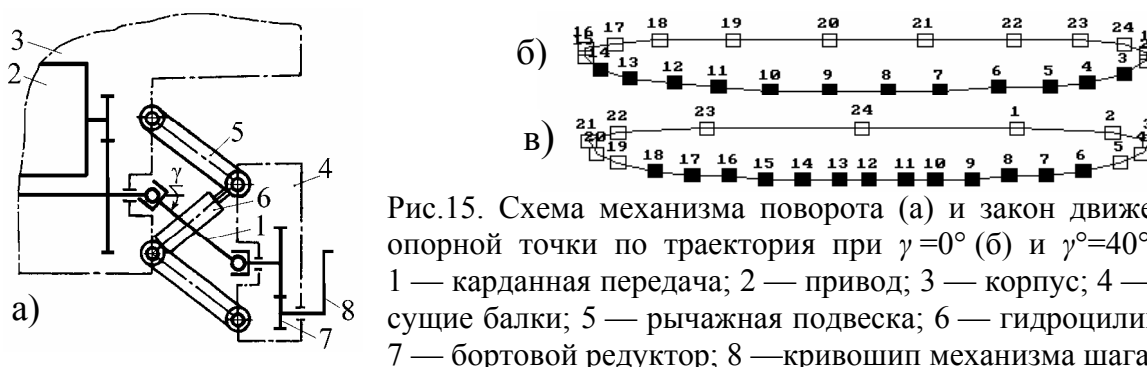


Рис.15. Схема механизма поворота (а) и закон движения опорной точки по траектория при $\gamma = 0^\circ$ (б) и $\gamma = 40^\circ$ (в): 1 — карданная передача; 2 — привод; 3 — корпус; 4 — несущие балки; 5 — рычажная подвеска; 6 — гидроцилиндр; 7 — бортовой редуктор; 8 — кривошип механизма шагания

Расширить диапазон регулирования бортового поворота также можно бортовой трансформацией траектории опорной точки (рис.11). Механизм изменяет длину шага на 30 – 40%, что позволяет реализовать повороты с $\rho = 2 - 3$.

Предложен новый статически неустойчивый способ поворота (рис.16). При последовательном размещении ног он может, например, происходить вокруг 3 ноги отстающего борта. Когда 6-я стопа забегающего борта находится в переносе, M_C определяется табл.1. Вторую половину цикла в опоре находятся только 3 и 6-я ноги. При смещении центра масс машины от линии действия реакций N_3 и N_6 необходима еще одна точка опоры. На грунт опустится одна из стоп находящихся в переносе, например 1-я, которая будет двигаться юзом. При этом M_C складывается из моментов сопротивления повороту M_{C3} , M_{C6} 3 и 6-й стоп, а также M_{C1} и момента силы сцепления $P_{\phi 1} = k_{\phi} N_1$ 1-й стопы. При малом Δx_C $N_1 \ll N_6$, два последних слагаемых малы и $M_C = 0,01 - 0,04 k_{\mu} GL$. Сопротивление повороту уменьшается на порядок и он реализуется (ступенчато) на любых грунтах.

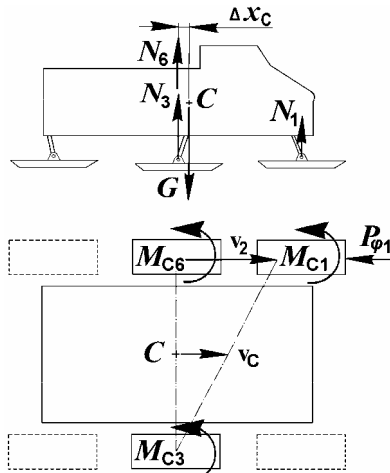


Рис.16. Статически неустойчивый поворот

Рис.16. Статически неустойчивый поворот

Седьмая глава посвящена экспериментальным исследованиям динамики, тягово-сцепных свойств и проходимости.

Динамика исследовалась методом видеосъемки процесса движения с последующей покадровой обработкой на ЭВМ. Шагающая машина 1 с закрепленными на бортах видеокамерами 2, двигалась вдоль параллельных щитов 3 с масштабно координатной сеткой (рис. 17). В поле видеокамер (рис.18) попадали координатная сетка 1, коромысло механизма шагания 2 и корпус 3 машины. Фиксировались курсовые x_A ,

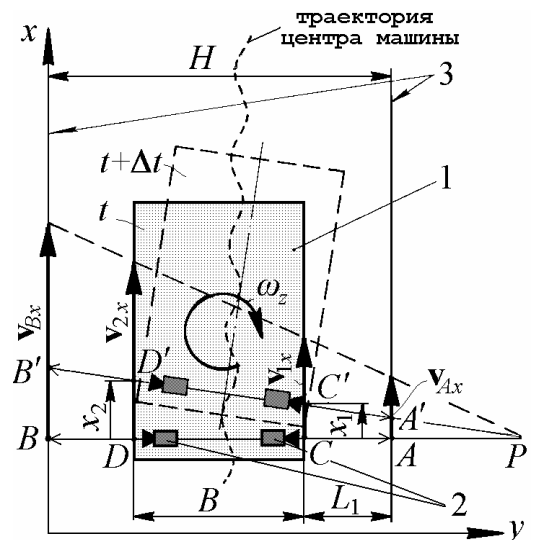


Рис.17. Схема движения машины в ходе экспериментов (вид в плане)

x_B и вертикальные z_A , z_B смещения метки 4 монитора видеокамеры, за которую принималась точка в строке показаний текущего времени. Камеры работали в режиме секундного отсчета, их показания синхронизировались. В каждом цикле отмечался момент достижения коромыслом 2 крайнего углового положения.

Это позволяло согласовать $x_A(t), x_B(t), z_A(t), z_B(t)$ и показания ваттметра, установленного в цепи электропривода, с углами поворота $\varphi_k(t)$ ведущих кривошипов и бортовым сдвигом фаз $\Delta\varphi_{12}$, определяющим тип походки. Расстояние L_1 замерялось в начале и конце опыта. Считалось, что $L_1=L_1(x)$ меняется линейно.



Рис.18

Численно дифференцируя $x_k(t)$ находились скорости бортов v_{kx} . По их значениям вычислялись скорости v_x и ω_z . Аналогично по $z_A(t)$ и $z_B(t)$ определялись v_z и ω_x . Ускорения $a_x, a_z, \varepsilon_x, \varepsilon_z$ находились дифференцированием скоростей.

При испытаниях движение проходило с разными скоростями, также варьировались походка машины — менялся бортовой сдвиг фаз $\Delta\varphi_{12}$, и тип грунта.

Результаты показали хорошее совпадение с теоретическими расчётами. Характер движения показан на рис.19.

На рис.20 также показан баланс мощности для одного из режимов движения, где $W_{пр}$ — потребная мощность курсового движения (без учета к.п.д. привода); W_k — мощность бортовых приводов, требуемая на колебания корпуса и на прессование грунта; $W_{экс}$ — потребляемая мощность определенная экспериментально.

Тягово-сцепные свойства исследовались методом видеосъемки движения. Шагающая машина буксировала автомобиль, водитель которого, осуществляя торможение, увеличивал крюковую нагрузку вплоть до 100% буксования стоп. В ходе эксперимента (2–3 шага) фиксировались перемещения стоп, корпуса и механизмов шагания, а также показания динамометра. По движению стоп находился коэффициент буксования δ , который привязывался к показаниям дина-

Курсовые перемещения бортов x_k ($k=1, 2$) определялись по смещениям x_A и x_B из подобия треугольников $PA A', PBB', PCC'$ и PDD' :

$$\begin{aligned} x_1 &= x_A + (L_1(x)(x_B - x_A))/H, \\ x_2 &= x_A + ((L_1(x) + B)(x_B - x_A))/H. \end{aligned} \quad (19)$$

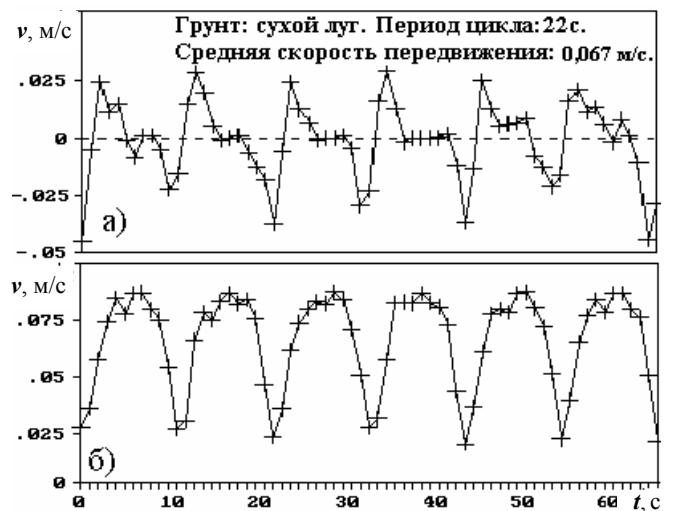


Рис.19. Вертикальная (а) и курсовая (б) составляющие скорости робота ($\Delta\varphi_{12}\approx 16^\circ$)

мометра и углам поворота φ_k кривошипов. Это позволяло получать для рассматриваемого грунта зависимости коэффициента сцепления k_φ от δ и углов φ_k .

Также находились углы предельных (по сцеплению) уклонов. Испытания проходили на косогоре с уклоном до 40° . При движении машины (рис.21а) фиксировались положения механизмов шагания 1, корпуса 2 и вертикали 3.

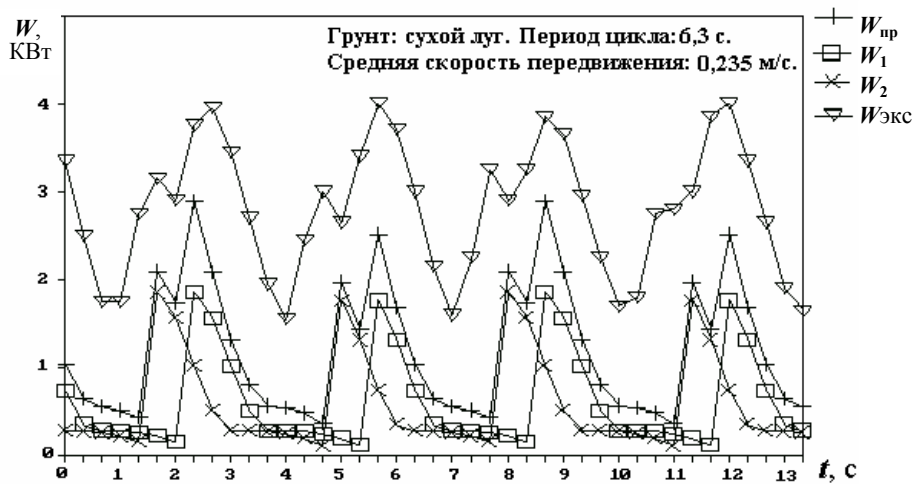


Рис. 20. Баланс мощности курсового движения ($\Delta\varphi_{12}\approx 40^\circ$)

Величина уклона определялась по углу α .

При исследовании грунтовой проходимости определялись условия полной ее потери. Для движения выбирались наиболее тяжелые заболоченные участки местности (рис.21б). За счет загрузки машины менялось давление на грунт, фиксировалась глубина колеи. При лыжеобразных стопах давление менялось в пределах $0,01 - 0,03$ МПа, а при стопах «hoof-foot» составляло около $0,15$ МПа.

Испытания показали, что шагающие машины имеют хорошие тягово-сцепные свойства и обладают повышенной проходимостью. На слабых грунтах значения давления на грунт, рекомендованные для гусеничных машин, могут быть для них увеличены до $0,03$ МПа. Коэффициент сцепления $k_{\varphi max}$ изменялся в пределах от $0,2$ для размокшей дороги на глинистом грунте, до $0,6$ на сухом лугу и сухой грунтовой дороге. При использовании грунтозацепов (по одному на лыжу) $k_{\varphi max}$ увеличивался на $30-40\%$. Машина преодолевала уклоны до 30° . С грунтозацепами угол преодолеваемого уклона возрастает на $15 - 25\%$.

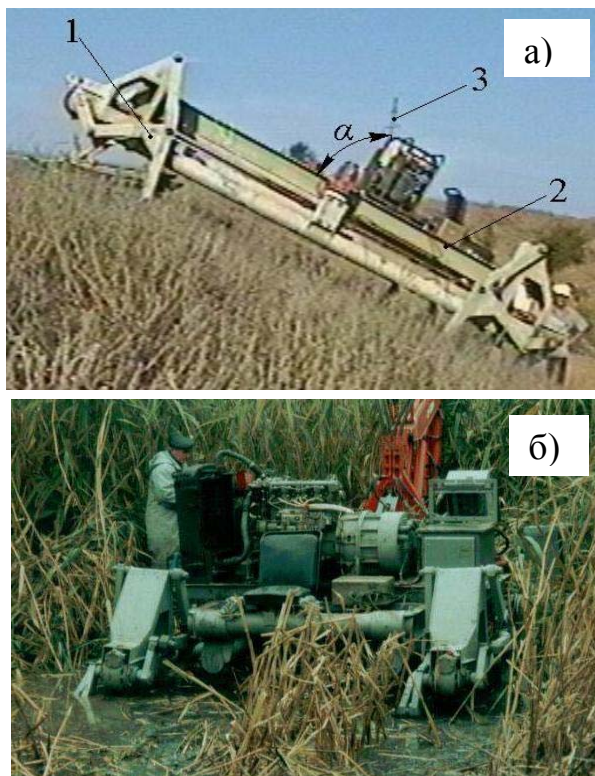


Рис.21. Определение предельных уклонов (а) и предельной грунтовой проходимости (б)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена обобщенная динамическая модель многоногой машины с побортно объединенными в шагающие модули (шагающие опоры) цикловыми двигателями, которая позволяет решать задачи динамического анализа движения, включая изучение пространственных колебаний машины, как системы твердых тел — корпуса и шагающих опор правого и левого борта.

2. Исследована структура энергозатрат в системе и проанализирована возможность повышения скорости движения шагающих роботов с цикловыми двигателями. Анализ показал, что задача кардинального снижения энергозатрат на преодоление цикловых сил инерции не может быть достигнута, в полной мере, только за счет оптимизационного синтеза механизмов шагания.

3. На базе результатов динамического моделирования разработан метод динамического управления колебаниями в системе, позволяющий взаимно компенсировать затраты мощности на преодоление цикловых сил инерции корпуса и шагающих опор. Предложен принцип выбора собственных частот, обеспечивающий указанный эффект без ухудшения показателей виброзащиты. Разработаны новые схемы системы подрессоривания, позволяющие реализовать указанный эффект. Рассмотрена возможность использования электродвигателей колебательного движения в приводе шагания. Показано, что они могут обеспечить рекуперацию энергии расходуемой на преодоление сил инерции в двигателе и позволяют варьировать параметры шагания в широких пределах.

4. Разработаны новые способы повышения адаптивности и профильной проходимости, позволяющие довести профильную проходимость шагающих машин с цикловыми двигателями до уровня аналогов с адаптивным управлением. Система пассивной адаптации, реализованная в работе «Восьминог», позволила увеличить его профильную проходимость более чем в 2 раза. Исследована возможность корректировки программного движения ног. Для снижения интенсивности ударных процессов при встрече с препятствием и смене стоп предложен новый способ корректировки параметров шага за счет управляемой диссипации в шарнире стопы. Разработаны алгоритмы полуактивного управления стопой в условиях неполного и неоднозначного представления о положении и типе преодолеваемого препятствия.

5. Разработаны методы расчета поворота шагающих машин на реальных грунтах, проведена его оценка по критериям энергетической эффективности, маневренности и кинематической точности. Изучено влияние схем размещения ног на момент сопротивления повороту при бортовом способе его осуществления. Исследованы новые способы поворота за счет изменения ориентации плоскостей шагания, за счет управляемой трансформации траектории опорной точки и за счет управления законом движения опорной точки по траектории. Разработаны новые механизмы поворота. Предложен новый способ управления бортовым поворотом в статически неустойчивом положении.

6. Разработана методика экспериментальных исследований динамики, тягово-сцепных свойств, грунтовой и профильной проходимости шагающих машин. Методика основана на видеосъемке процесса движения с покадровой обработкой видеозаписи на ЭВМ и позволяет, с достаточной точностью, определять характеристики и энергетическую эффективность движения. Впервые в условиях реальной местности на базе полномасштабных опытных образцов исследована динамика шагающих машин «тяжелой» весовой категории и изучены их тягово-сцепные свойства, грунтовая и профильная проходимость. Результаты экспериментов подтвердили адекватность разработанных математических моделей и подтвердили исключительно высокую проходимость шагающих машин и повышенные их тягово-сцепные свойства.

7. Полученные результаты явились основой новых методов расчета и оптимального проектирования шагающих движителей мобильных роботов и нашли практическое применение при разработке многоцелевого шагающего шасси с цикловыми движителями, которое может быть базовым как для простейших шагающих машин, так и для сложных робототехнических систем.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Монографии

1. Брискин, Е.С. Основы расчета и проектирования шагающих машин с цикловыми движителями: монография [Текст] / Брискин Е.С., Жога В.В., Чернышев В.В., Малолетов А.В. М. : Изд-во Машиностроение, 2006. 164 с.

Статьи в периодических изданиях по перечню ВАК

2. Брискин, Е.С., Динамика шагающих машин с движителями на базе цикловых механизмов при ослабленной гравитации [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Проблемы машиностроения и надежности машин. РАН. 2006. №1. С.15-20.
3. Курсовая устойчивость шагающей машины «Восьминог» [Текст] / Брискин Е.С., Шурыгин В.А., Жога В.В., **Чернышев В.В.** и др. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2006. №1–3, Т.4. С.56–58.
4. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч.1. Концепция проектирования [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №5. С.22-27.
5. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч.2. Динамика движения шагающих машин серии «Восьминог» [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №6. С.19-26.
6. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч.3. Алгоритмы управления движением шагающих машин серии «Восьминог» и экспериментальные исследования [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №7. С.13-18.
7. Концепция проектирования шагающих машин [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Наука – производству. 2005. №1. С.33–38.
8. **Чернышев, В.В.** Полевые исследования шагающих машин [Текст] / Чернышев В.В. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2004. №4. С.20–22.
9. Шагающая машина «Восьминог» [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. №5. С.48-49.
10. **Чернышев, В.В.** Сопротивление бортовому повороту шагающей машины / Чернышев В.В. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2003. №2. С.24–27.
11. **Чернышев, В.В.** Пассивное поддресоривание в мобильных робототехнических системах с цикловыми механизмами шагания [Текст] / Чернышев В.В. // Известия вузов. Машиностроение. 2003. №1. С.31–39.
12. **Чернышев, В.В.** Опыт использования шагающей машины для ликвидации аварийного разлива нефти [Текст] / Чернышев В.В. // БЖ. 2003. №5. С.28–30.
13. Мобильный робототехнический комплекс на базе многоопорной шагающей ма-

шины: динамика движений [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Мехатроника: Механика. Автоматика. Электроника. Информатика. 2001. №3. С.19–27.

14. **Чернышев, В.В.** Многофункциональный механизм поворота для транспортно–технологических шагающих машин [Текст] / Чернышев В.В., Малолетов А.В. // Известия вузов. Машиностроение. 2001. № 1. С.48–52.

15. Брискин, Е.С. Экспериментальные исследования динамики многоопорной шагающей машины с движителями лямбдаобразного вида [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Известия вузов. Машиностроение. 1999. №4. С.32–37.

16. Гудушаури, Э.Г. Резонансные режимы электромагнитных вибровозбудителей с сильно нелинейной позиционной зависимостью вынуждающей силы [Текст] / Гудушаури Э.Г., **Чернышев В.В.** // Машиноведение. РАН. 1989. №4. С.113–116.

Статьи и доклады в российских изданиях

17. **Чернышев, В.В.** Поворот шагающих машин с движителями на базе цикловых механизмов [Текст] / Чернышев В.В. // Теория механизмов и машин: Период. науч.-метод. ж-л. 2007. №2(10). С.72–84.

18. Брискин, Е.С. Повышение точности автономного движения шагающих роботов в условиях реальной местности с искусственными ориентирами [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Интеллектуальные и многопроцессорные системы–2006. Матер. междунаrod. науч. конф. Т.3. Таганрог : ТРТУ, 2006. С.201–205.

19. **Чернышев, В.В.** Объединение механизмов шагания в цепь шагающих движителей [Текст] / Чернышев В.В. // Сб. докл. междунаrod. конф. по теории механизмов и механике машин. Краснодар : Кубан. гос. технол. ун-т, 2006. С.71–72.

20. Брискин, Е.С. Динамика шагающих машин с цикловыми движителями в условиях пониженной гравитации [Текст] / **Чернышев В.В.** // Планетоходы, космическая робототехника и наземные роверы для экстремальных условий: Матер. 1, 2 и 3-го междунаrod. сем. СПб. : ВНИИ трансмаш., 2006. С.91–96.

21. **Чернышев, В.В.** Исследование динамики шагающей машины как системы твердых тел с упруго-диссипативными связями [Текст] / Чернышев В.В. // Прогресс транспортных средств и систем: Матер. междунаrod. конф. Ч.2. Волгоград : ВолгГТУ, 2005. С.621–623.

22. Шурыгин, В.А. Алгоритмы управления движением шагающих машин серии «Восьминог» [Текст] / Шурыгин В.А., Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Интел-

- лектуальные и многопроцессорные системы-2005: Матер. науч. конф. Т.3. Таганрог : ТРТУ, 2005. С.30–34.
23. Брискин, Е.С. Цикловые механизмы шагания с пассивно управляемой стопой [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Теория механизмов и машин: Период. науч.-метод. ж-л. 2004. №1(3). С.80–88.
24. Брискин, Е.С. Управление стопой в шагающих движителях с жесткой траекторией опорных точек [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Мобильные роботы и мехатронные системы: Матер. науч. шк.-конф. М. : МГУ, 2004. С.25–31.
25. Брискин, Е.С. Управление стопой циклового шагающего движителя в маршевом режиме движения [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Экстремальная робототехника: Тр.VII науч.-практ. конф. СПб. : Рос. акад. ракетных и артиллерийских наук, 2004. Т.4. С.241–245.
26. **Чернышев, В.В.** Экспериментальные исследования механизма взаимодействия шагающего движителя с локальными препятствиями [Текст] / Чернышев В.В. и др. // Поволжский экологический вестник. 2004. Вып.10. С.127–132.
27. Брискин, Е.С. О динамике движения шагающей машины «Восьминог» [Текст] / Брискин Е.С., Жога В.В., **Чернышев В.В.** // Адаптивные роботы–2004: Тр. Меж-дунар. шк.-сем. в рамках Недели высок. технол. СПб., 2004. С.24–26.
28. Брискин, Е.С. Методы корректировки программных движений цикловых шагающих движителей мобильных робототехнических систем [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Интеллектуальные и многопроцессорные системы-2004. Матер. международ. науч. конф. Т.2. Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2004. С.368–372.
29. Брискин, Е.С. Алгоритмы управления движением шагающей машины при преодолении препятствий [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Экстремальная робототехника: Матер. XIV науч.-техн. конф. / СПб. : СПбГПУ, 2004. С.191-196.
30. Исследование механизма преодоления локальных препятствий мобильными робототехническими системами с шагающими движителями [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Мобильные роботы и мехатронные системы: Матер. науч.шк.-конф. М. : МГУ, 2004. С.167–179.
31. Повышение профильной проходимости и адаптивности шагающих машин с движителями на базе цикловых механизмов / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Экстремальная робототехника: Матер. XIII науч. конф. СПбГПУ, 2003. С.125–132.

32. Брискин, Е.С., Реализация походок алгоритмического уровня для шагающего робототехнического комплекса с цикловыми движителями [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Интеллектуальные и многопроцессорные системы-2003: Матер. междунаро. науч. конф. Т.2. Таганрог : ТРТУ, 2003. С.172–175.
33. Брискин, Е.С. О концепции проектирования шагающих машин [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.**, Малолетов А.В. // Проблемы механики современных машин: Матер. 2-й междунар. конф. Улан-Удэ : ВСГТУ, 2003. Т.3. С.25–28.
34. Брискин, Е.С. Теоретические и экспериментальные исследования управляемого движения шагающих машин [Текст] / Брискин Е.С., Малолетов А.В., Русаковский А.Е., **Чернышев В.В.** // Российская наука: Дорога жизни: Сб. ст. М. : «Октопус», 2002. С.27–34.
35. **Чернышев, В.В.** Системы частичной адаптации, подрессоривания и поворота шагающих машин с движителями на основе цикловых механизмов [Текст] / Чернышев В.В. // Мобильные роботы: Матер. науч. шк.-конф. М.: МГУ, 2002. С.181–196.
36. **Чернышев, В.В.** Пассивное подрессоривание в мобильных робототехнических системах с шагающими движителями на базе цикловых механизмов [Текст] / Чернышев В.В., Брискин Е.С. // Сб. докл. 5-й междунаро. конф. по проблемам вибрации. М. : Ин-т машиноведения РАН, 2002. С.492–496.
37. Брискин, Е.С. Концепция создания шагающей машины для МЧС [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.**, Жога В.В. // Экстремальная робототехника: Матер. XII науч.-техн. конф. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2002. С.139–146.
38. Брискин, Е.С. Устойчивость системы управления четырехопорной шагающей машины с поворотной передней балкой [Текст] / Брискин Е.С., Тельдеков А.В., **Чернышев В.В.** // Прогресс транспортных средств и систем-2002: Матер. междунаро. науч.-практич. конф. Волгоград : ВолгГТУ, 2002. Ч.2. С.291–293.
39. Брискин, Е.С. Оценка профильной проходимости шагающих машин с движителями на основе цикловых механизмов [Текст] / Брискин Е.С., Жога В.В., Савин А.Ю., **Чернышев В.В.** // Прогресс транспортных средств и систем-2002: Матер. междунаро. науч.-практич. конф. Волгоград : ВолгГТУ, 2002. Ч.2. С.288–290.
40. Создание мобильного технологического робототехнического комплекса для работы на грунтах с низкой несущей способностью / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Производственные технологии-2001: Сб. ст. М.: МГУП, 2002. С.66–67.

41. **Чернышев, В.В.** Разработка шагающего робототехнического комплекса для ликвидации последствий аварийного разлива нефти в труднопроходимой местности [Текст] / Чернышев В.В., Брискин Е.С., Малолетов А.В. // Экология. Наука, образование: Сб. науч. тр. Вып.3. Брянск : БГИТА, 2002. С.72–74.
42. О повороте шагающих машин с двигателями на основе цикловых механизмов шагания [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Мобильные роботы и мехатронные системы: Мат. науч. шк.-конф. М. : МГУ, 2001. С.152–163.
43. Мобильный комплекс для сбора нефтепродуктов на базе шагающей машины [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Экстремальная робототехника: Мат. XI науч.-техн. конф. СПб. : СПбГПУ, 2001. С.117–125.
44. **Чернышев, В.В.** Полевые исследования тягово-сцепных свойств и проходимости шагающих машин на слабых и экологически ранимых грунтах [Текст] / Чернышев В.В. // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. науч. тр. Вып.4. Брянск : БГИТА, 2001. С.116–118.
45. **Чернышев, В.В.** Использование шагающих машин на слабых и экологически ранимых грунтах [Текст] / Чернышев В.В. // Состояние и перспективы развития дорожного комплекса: Сб. науч. ст. Вып.3. Брянск : БГИТА, 2001. С.65–67.
46. **Чернышев, В.В.** Электромагнитный вибропривод шагающих двигателей мобильных робототехнических систем [Текст] / Чернышев В.В. // Вибрационные машины и технологии: Матер. междунар. науч.-техн. конф. «Вибрация-2001», Курск : КГТУ, 2001. С.417–421.
47. **Чернышев, В.В.** Исследование механизма взаимодействия опорных элементов (стоп) шагающих машин со слабыми и экологически ранимыми грунтами [Текст] / Чернышев В.В. // Состояние и перспективы развития дорожного комплекса: Сб. науч. тр. Вып.2. Брянск : БГИТА, 2001. С.35–36.
48. **Чернышев, В.В.** Особенности управления и стабилизации положения корпуса многоногих статически устойчивых шагающих машин [Текст] / Чернышев В.В., Брискин Е.С., Буданов В.М., Девянин Е.А. и др. // Мобильные роботы и мехатронные системы: Мат. науч. шк.-конф. М. : МГУ, 2000. С.256–273.
49. О проблемах проектирования шагающих машин грунтовой проходимости [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Проблемы механики современных машин: Мат. междунар. конф. Улан-Удэ : ВСГТУ, 2000. С.206–211.

50. **Чернышев, В.В.** Гармонический анализ сил инерции в лямбдаобразном шагающем двигателе [Текст] / Чернышев В.В., Демидов М.Г. // Наземные транспортные системы: Межвуз. сб. науч. тр. Волгоград : ВолгГТУ, 2000. С.72–81.
51. Многоцелевое шагающее шасси для работы на грунтах с низкой несущей способностью [Текст] / Брискин Е.С., Герасун В.М., **Чернышев В.В.** и др. // Экстремальная робототехника: Матер. X науч.-техн. конф. СПб. : СПбГТУ, 1999. С.223–226.
52. О энергетической эффективности, маневренности, вибронагруженности и управлении шагающими машинами грунтовой проходимости [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Мобильные роботы и мехатронные системы: Докл. науч. шк.-конф. М. : МГУ, 1999. С.89–108.
53. Проблемы расчета и проектирования шагающих машин грунтовой проходимости [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. // Мобильные роботы и мехатронные системы: Докл. науч. шк.-конф. М. : МГУ, 1998. С.124–153.
54. Брискин, Е.С. Проблемы проектирования и перспективы развития шагающих машин с двигателями на основе цикловых механизмов [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Прогресс транспортных средств и систем: Мат. междунар. науч.-практ. конф. Волгоград: ВолгГТУ, 1999. Ч.2. С.102–104.
55. О выборе рациональных параметров шестизвенного механизма шагания [Текст] / Брискин Е.С., Малолетов А.В., **Чернышев В.В.** и др. // Наземные транспортные системы: Межвуз. сб. науч. тр. Волгоград : ВолгГТУ, 1999. С.95–99.
56. **Чернышев, В.В.** Проблемы проектирования и эксплуатации транспортных шагающих машин высокой проходимости [Текст] / Чернышев В.В., Шерстобитов С.В., Брискин Е.С. // Проблемы адаптации техники к суровым условиям: Докл. междунар. науч.-практич. конф. Тюмень : ТГНГУ, 1999. С.253–258.
57. **Чернышев, В.В.** Привод шагающих машин на базе электродвигателей колебательного движения [Текст] / Чернышев В.В. // Механика и управление движением шагающих машин: Межвуз. сб. науч. тр. Вып.2. Волгоград : ВПИ, 1995. С.134–140.

Статьи и доклады в иностранных изданиях

58. Briskin, E.S. On conception of walking machines designing [Текст] / Briskin E.S., **Chernyshev V.V.**, Maloletov A.V. // Proc. of the 11-th Int. Conf. on Advanced Robotics 2003 (ICAR 2003). Coimbra, Portugal, 2003. Vol.3. P.1763–1768.
59. Briskin, E.S. Power efficiency and control algorithms of walking machine with

- cycle propellers [Текст] / Briskin E.S., **Chernyshev V.V.**, Maloletov A.V. // Climbing and Walking Robots and their Supporting Technologies. CLAWAR 2003: Proc. of the 6-th Int. Conf. Catania, Italy, 2003. P.861–870.
60. The control of compound eight–legged walking machine movement with the individual drives [Текст] / Briskin E.S., **Chernyshev V.V.** and others // Climbing and Walking Robots and their Supporting Technologies. CLAWAR 2002: Proc. of the 5-th Int. Conf. Paris, France, 2002. P.487–493.
61. On the Turn of Walking Machines with Moving Propellers Made on the Basis of Cycled Mechanisms [Текст] / Briskin E.S., **Chernyshev V.V.** and others // Theory and Practice of Robots and Manipulators. ROMANSY 14: Proc. of the 14-th CISM–IFTToMM Sympos. Udine, Italy, 2002. P.423–430.
62. On ground and profile practicability of multi–legged walking machines [Текст] / Briskin E.S., **Chernyshev V.V.** and others // Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe, Germany, 2001. P.1005–1012.
63. **Chernyshev, V.V.** Passive subsupport in mobile robot-technical systems with walking gears on the basis of cycle mechanisms [Текст] / Chernyshev V.V., Briskin E.S. // Abs. of the 5-th Int. Conf. on Vibration problems ICOVP-2001. Moscow, 2001. P.26.
64. On Dynamics of Movement of Walking Machines with Gears on the Basis of Cycle Mechanisms [Текст] / Briskin E.S., **Chernyshev V.V.** and others // Theory and Practice of Robots and Manipulators. ROMANSY 13: Proc.of the 13-th CISM–IFTToMM Sympos. Zakopane, Poland, 2000. P.313–322.
65. Брискин, Е.С. Отработка методов повышения точности автономного движения шагающих роботов в условиях реальной местности с искусственными ориентирами [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Искусственный интеллект: Науч.-теор. ж-л НАН Украины. 2006. №3. С.671-676.
66. Брискин, Е.С. Методы корректировки программных движений цикловых шагающих движителей мобильных робототехнических систем [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Искусственный интеллект: Науч.-теор. ж-л. 2004. №4. С.685-694.
67. Брискин, Е.С. Реализация походок алгоритмического уровня для шагающего робототехнического комплекса с цикловыми движителями [Текст] / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** // Искусственный интеллект: Науч.-теор. ж-л НАН Украины. 2003. №4. С.114–121.

Патенты РФ

68. Пат. 2239577 РФ, В 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.**, Тельдеков А.В. 2004.
69. Пат. 2207583 РФ, В 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.**, Савин А.Ю. 2003.
70. Пат. 2191131 РФ, В 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / **Чернышев В.В.** 2002.
71. Пат. 2174085 РФ, В 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / **Чернышев В.В.**, Брискин Е.С., Малолетов А.В. 2001.
72. Пат. 2171194 РФ, В 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных транспортно–погрузочных средств повышенной проходимости / **Чернышев В.В.**, Брискин Е.С., Малолетов А.В. 2001.
73. Пат. 2153437 РФ, В 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных самоходных машин транспортно–погрузочных средств повышенной проходимости / Брискин Е.С., **Чернышев В.В.** и др. 2000.
74. Пат. 2156711 РФ, В 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Охоцимский Д.Е., Брискин Е.С., **Чернышев В.В.**, Шерстобитов С.В. 2000.
75. Пат. 2156712 РФ, В 62 D 57/032. Шагающая опора повышенной проходимости / **Чернышев В.В.** 2000.
76. Пат. 2086943 РФ, G 01 M 7/02, G 01 N 3/32. Способ определения логарифмического декремента колебаний / Чернышев В.М., **Чернышев В.В.** 1997.
77. Пат. 2086450 РФ, В 62 D 57/032. Шагающая опора / **Чернышев В.В.** 1997.
78. Пат. 2055333, G 01 L 3/10. Устройство для определения вынуждающего момента электромагнитного вибро-возбудителя с поворотным якорем / **Чернышев В.В.** 1996.
79. Пат. 2063354 РФ, В 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Брискин Е.С., Русаковский А.Е., Арзамасков А.М., **Чернышев В.В.** 1996.
80. Пат. 2063353 РФ, В 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных самоходных машин и для транспортных средств повышенной проходимости / Брискин Е.С., Русаковский А.Е., Арзамасков А.М., **Чернышев В.В.** 1996.