



Смирная Лилия Дмитриевна

**МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЙ
ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ И ИХ ДВИЖИТЕЛЕЙ**

2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Динамика и прочность машин» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

Научный руководитель

доктор физико-математических наук, профессор
БРИСКИН Евгений Самуилович.

Официальные оппоненты:

ПРЯНИЧНИКОВ Валентин Евгеньевич,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», отдел № 5, ведущий научный сотрудник, г. Москва;

ВОРОБЬЕВА Наталья Сергеевна,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет», кафедра «Механика», заведующая.

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва.

Защита состоится «21» декабря 2023 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.282.07, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и на сайте www.vstu.ru по ссылке <https://www.vstu.ru/upload/iblock/dde/dde3fdd4b614e9c8a2c92f13bc7998e8.pdf>

Автореферат разослан «_____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Попов Андрей Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При разработке мобильных роботов с шагающими движителями приходится сталкиваться со специфическими задачами, почти не имеющими аналогов в других областях мобильной техники. Эти задачи логически обусловлены особенностями взаимодействия шагающего робота с внешней средой – с неподготовленной поверхностью движения. Они же определяют требования ко всем системам и механизмам шагающего робота.

При управлении перемещением шагающих многоногих мобильных роботов в новое положение возникает задача формирования программного движения как в целом робота, так и его движителей, обеспечивающих выполнение требуемых показателей качества. Среди них могут быть энергоэффективность, измеряется затратами энергии на единицу пройденного пути, усилие, развиваемое приводами на единицу веса перемещаемого груза и др. Многие задачи оптимального управления движением шагающего робота в той или иной степени уже решены. Однако для мобильных роботов, перемещающихся в специфических условиях, например, в составе группы, когда требуется занимать вполне определенное место в ее составе или в среде со специфическими свойствами, требующими учета своеобразного взаимодействия с ней как роботов, так и движителей требуют изучения. Например, для мобильных роботов перемещающихся по дну водоемов, в силу определенной специфики движения, проявляющееся в таких хорошо известных явлениях как: возникающая выталкивающая сила, возможное наличие течения, затрудненный отрыв стопы движителя от поверхности дна, вызываемый «компрессионным эффектом» задачи оптимального управления полностью не решены. Так для осуществления переноса движителя в новое положение требуется «оторвать» стопу от грунта, а это в силу «компрессионного эффекта» требует большего усилия, чем при отрыве от сухого грунта. Это подтверждается экспериментально, но отсутствуют как математическая модель процесса, так и установленные в соответствии с ней закономерности, позволяющие производить учет и целенаправленно управлять подъемом стопы с целью обеспечения допустимых усилий приводов. Учет особенностей свойств среды с которой взаимодействуют как движители робота, так и его корпус требуют и исследования точности позиционирования движителей в их программном движении и в формировании такого движения. Известны работы в которых изучается распределение реакций движителей при их взаимодействии с опорной поверхностью. Однако такая задача формирования программного движения должна решаться совместно с задачей минимизации сил сопротивления. Следовательно, исходя из выше изложенного, можно сделать вывод об актуальности работы, направленной на развитие эффективного метода планирования и реализацию оптимальных режимов движения и обоснования кинематических схем как роботов, так и их движителей для различных условий и сред перемещения.

Степень разработанности проблемы. Движение любой транспортной или технологической машины обеспечивается взаимодействием её движителей с внешней средой. При движении по твердой деформируемой поверхности такое взаимодействие является источником как тяговых сил, так и сил сопротивления движению. Для колесных и гусеничных движителей закономерности, которым подчиняются такие силы, изучены достаточно хорошо в работах Гуськова В.В., Велева Н.Н., Атаманова Ю.Е., Чудакова Д.А., Кемурджиана А.Л. Скотникова В.А., Пономарева А.В., Климанова А.В. и др. Однако до сих пор проводятся исследования и обнаруживаются новые явления, изложенные, например, в работах Трояновской И.П., Голубевой Т.А., Балакиной Е.В., Котович С.В. Для шагающих движителей, которые по профильной и грунтовой проходимости имеют потенциальные преимущества перед традиционными имеются лишь некоторые работы, в которых изучаются закономерности реализации тяговых свойств и сил сопротивления движению. Одной из первых публикаций, в которой устанавливается зависимость работы на нормальную деформацию грунта от его вязкоупругих характеристик и геометрических параметров шагающего движителя и режимов движения, является работа М.Б. Игнатъева. Это позволило определить среднюю силу сопротивления движению для роботов с шагающими движителями в работе Брискина Е.С. и Соболева В.М. К одной из первых работ по управлению взаимодействием стопы шагающего движителя с грунтом относится исследование Шнейдера А.Ю. и Гориневского Д.М. Фроловой Н.Е. предложен метод управления тяговыми свойствами за счет поворота стопы в вертикальной плоскости. Полученные результаты основаны на анализе напряженно-деформируемого состояния грунта. Калининым Я.В. предложено управление жесткостью стопы в касательном направлении, что оказывает влияние на энергоэффективность перемещения и улучшает эксплуатационные качества робота. Что касается мобильных шагающих роботов перемещающихся по дну водоемов, то известны исследования, подтверждающие нетипичный для наземных транспортных шагающих машин «компрессионный» эффект, возникающий при отрыве стопы движителя от грунта изложенные в работах Чернышева В.В. и Арыканцева В.В. Известны методы управления нормальными реакциями ползающих роботов за счет перемещения внутренних масс, которые изучают в своих работах Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г.

Однако в комплексе эти исследования и полученные результаты не охватывают решения вновь возникающих проблем, например, для подводных роботов, у которых можно регулировать соотношение между выталкивающей силой и силой тяжести или за счет подъема или опускания якорей якорно-тросовых движителей, рассматриваемых как «шагающеподобные» за счет периодического взаимодействия с опорной поверхностью и вообще отсутствуют работы, в которых

ставится задача об определении компромисса между силами сопротивления движению и тяговыми силами, зависящими от нормальных нагрузок.

Объектом исследования являются мобильные роботы с шагающими и «шагающеподобными» движителями, а **предметом исследования** – метод планирования программного движения мобильных роботов и их движителей.

Цель диссертационного исследования – повышение тягово-динамических свойств шагающих движителей мобильных роботов на основе выбора их программных режимов движения и кинематических схем.

Данная цель реализуется при постановке и решении следующих исследовательских задач:

1. Обзор, анализ: - кинематических схем шагающих движителей (количество управляемых приводов последовательной, параллельной и гибридной схем, их достоинства и недостатки), - методов повышения тягово-сцепных свойств шагающих движителей и снижения сил сопротивления движению.

2. Разработка методов повышения тягово-сцепных свойств шагающих движителей и снижения сил сопротивления движению за счет расположения посадочных осей движителей на различной высоте для цикловых движителей или управления диапазоном вертикального перемещения стопы для движителей других типов.

3. Оценка влияния неравномерности скорости стопы шагающего движителя на тяговый расчет в фазе взаимодействия ее с опорной поверхностью.

4. Установление закономерностей отрыва стоп шагающих движителей от грунта, учитывающих «компрессионный» эффект, обусловленный наличием области разряжения в «подстоповом» пространстве.

Методологические и теоретические основы исследования. Методы решения поставленной задачи основываются на математическом моделировании динамики управляемого движения мобильных роботов и экспериментальном подтверждении некоторых из полученных результатов на лабораторных моделях. Теоретические исследования включают в себя:

– составление дифференциальных уравнений движений системы твердых тел (корпуса робота и его движителей) с учетом накладываемых голономных и неголономных связей с помощью методов теоретической механики;

– определение внешних сил взаимодействия корпуса робота и его движителей с окружающей средой: вязкоупругопластичным и грунтом на основе известных закономерностей взаимодействия твердых тел с вязкоупругопластичной средой;

– установление законов оптимального управления движением движителей при их переносе в новое положение и при взаимодействии с вязкоупругопластичным грунтом, а также методов формирования параметров движителей, например, жесткости, геометрических характеристик и др., обеспечивающих оптимальность законов движения по заданным критериям. Критерием оптимальности, в

соответствии с поставленной задачей является максимальная реализация тягово-сцепных свойств.

Полученные результаты сопоставляются и с известными эффектами, установленными экспериментально при изучении динамики движения шагающих машин «Ортоног», «Восьминог», а также лабораторных моделей роботов с «шагающеподобными» движителями.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Дополнительно введен новый показатель в критерий оптимальности шагающего способа передвижения, представляющий собой аддитивную свертку показателей максимального тягового усилия по сцеплению и средней силы сопротивления движению в пределах одного цикла с коэффициентами значимости устанавливаемыми разработчиком. Изложена процедура определения величины введенного показателя, учитывающая что сила сопротивления движению пропорциональна квадрату нормальных реакций, а сила тяги по сцеплению линейно зависит от этих реакций.

2. В дополнении к известной характеристике точности механизма по его передаточной функции для механизма шагающего движителя предложена дополнительная характеристика – функция ошибок по скоростям, состоящий из компонент частных производных от передаточной функции по управляющим воздействиям умноженных на программные скорости управляющих воздействий. Важность этой характеристики обусловлена необходимостью обеспечения одинаковых скоростей стоп всех движителей при поступательном перемещении робота с прямолинейным движением его центра масс. Функция ошибок по скоростям определен для типовых кинематических схем шагающих движителей.

3. На основе совместного применения теоремы о движении центра масс, закона Дарси о фильтрации жидкости, закона Генри о растворении газа в жидкости получено уравнение движения стопы шагающего движителя при ее отрыве от влагонесущего грунта учитывающее «компрессионный» эффект, что позволяет определять оптимальный режим, обеспечивающий минимум тепловых потерь в приводных двигателях движителя, осуществляющих подъем стопы на этапе переноса.

Научная новизна работы раскрывается в следующих **положениях, выносимых на защиту**:

1. Влияние установки шагающих движителей на корпусе мобильного робота на соотношение между тягово-сцепными свойствами и силами сопротивлению движению на грунтах с различными физико-механическими свойствами.

2. Влияние выбора конструктивной схемы шагающих движителей на кинематическую точность движения их стоп.

3. Закономерности отрыва шагающих движителей от влагонесущего грунта на энергетические характеристики их приводов и определение оптимальных режимов движения.

Теоретическая значимость результатов обусловлена получением закономерностей влияния структуры и параметров мобильного робота и его движителей на динамические, силовые и энергетические характеристики движения.

Практическая значимость результатов состоит в развитии и уточнении методик проектирования мобильных роботов с шагающими и «шагающеподобными» движителями.

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

- Прогресс транспортных средств и систем – 2018 (Волгоград, ВолгГТУ);
- XXX Международная инновационная конференция молодых учёных и студентов по проблемам машиноведения МИКМУС – 2018 (Москва, ИМАШ РАН);
- 30-я Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника – 2019» (Санкт-Петербург, ЦНИИ РТК);
- 31-я Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника – 2020» (Санкт-Петербург, ЦНИИ РТК);
- CLAWAR 2020 is the 23rd issue of the International Conference Series on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (Москва, ИМАШ РАН);
- CLAWAR 2021 is the 24th International Conference Series on Climbing and Walking Robots (Takarazuka, Japan; virtual platform);
- CLAWAR 2022 is the 25th Conference Series on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (Ponta Delgada, Portugal; virtual platform).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы отражены в 22 публикациях, в том числе 10 в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов работ по диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, 4 в иностранных научных изданиях, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 7 в других изданиях.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 4 глав, включающих 19 параграфов и заключения. Список использованной литературы включает 113 наименований. Общий объем 137 страниц. Основная часть работы изложена на 110 страницах и содержит 64 рисунка и 7 таблиц.

Поддержка. Диссертация выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-31-90131 Аспиранты).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во «Ведении» обоснована актуальность темы, сформулирована цель, определены задачи, научная новизна, практическая ценность работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации сделан обзор и проведен анализ методов учета массово-геометрических параметров шагающих движителей мобильных роботов и их взаимодействия с опорной поверхностью на характеристики движения мобильных роботов. Рассмотрены известные решения задач об обеспечении минимума тепловых потерь в двигателях курсового перемещения. Установлено, что максимальная мощность, развиваемая приводными двигателями движителей, пропорциональна кубу скорости. Проанализирован метод снижения уровня тепловых потерь в двигателях за счет отказа от равномерного движения корпуса робота. В этом случае также имеет место рекуперация энергии: часть кинетической энергии корпуса робота передается механизму движителя и обратно. Установлено, что для снижения уровня тепловых потерь возможно регулировать походку, расписание движения движителей и необходимо учитывать физико-механические свойства опорной поверхности (грунта). На энергоэффективность шагающего способа перемещения оказывает влияние не только работа по уплотнению грунта, но и работа, затрачиваемая на отрыв от грунта. Особенно это важно для шагающих роботов, работающих на влагонасыщенных грунтах и под водой. Опыты показывают, что усилия, развиваемые приводом на подъем движителя, зависят от режима движения при подъеме. Однако рекомендации по выбору оптимального режима подъема не даны. Дана оценка сил сопротивления движению на грунтах различного типа. Установлено, что приближенно средняя сила сопротивления движению шагающего робота определяется работой по необратимой деформации опорной поверхности. Проанализированы тягово-динамические характеристики роботов с шагающими движителями. Рассмотрены различные способы повышения тягово-сцепных свойств: за счет внезапно приложенной нагрузки и за счет управления ориентацией стопы движителя. Рассмотрены особенности многокритериальной оптимизации, в качестве показателей предложены: конструктивные, динамические, маневренности, грунтовой и профильной проходимости и др. Проанализирована точность реализации программного движения опорной стопы от кинематической схемы наиболее часто изучаемых движителей. Установлено, что при известных методах учета кинематической точности позиционирования рабочего органа механизма на основе передаточных функций отсутствует должный учет кинематической точности по скоростям, что для мобильных роботов является важным показателем.

Во второй главе диссертации рассматривается метод повышения тягово-сцепных свойств шагающих движителей и снижения сил сопротивления за счет расположения посадочных осей движителей на различной высоте для цикловых

двигателей или управления диапазоном вертикального перемещения стопы для двигателей других типов.

Двигатель транспортной машины можно определить, как механизм преобразующий энергию, генерируемую двигателем или внешним источником в работу по перемещению этой машины во внешней среде за счет взаимодействия с этой средой.

Если рассматривать транспортную машину с двигателем и окружающую среду как замкнутую механическую систему, то количество движения в ней сохраняется. Поэтому, для начала перемещения рассматриваемого транспортного средства из состояния покоя возникает также и движение окружающей среды, такое что суммарное количество движения равняется нулю. Усилие, необходимое для обеспечения движения транспортного средства можно определить, как тяговое, а для движения окружающей среды как силы сопротивления.

Для наземных транспортных средств с колесными или гусеничными двигателями вводятся максимальная сила тяги по сцеплению и сила сопротивления движению, обусловленные взаимодействием с грунтом. Для шагающих машин известно выражение для осредненной силы сопротивления движению $Q_{\text{сопр}}$. Максимальную силу тяги $Q_{\text{тяг. max}}$ можно оценить если рассматривать стопы, погружающиеся в грунт на глубину, пропорциональную максимальной нагрузке $P_{j \text{ max}}$

$$Q_{\text{сопр}} = \sum_{j=1}^N \frac{P_{j \text{ max}}^2}{2c_n l}, \quad Q_{\text{тяг. max}} = \alpha \sum_{j=1}^N P_{j \text{ max}}, \quad (1)$$

где c_n – нормальная жесткость системы: опора двигателя – опорная поверхность, l – длина шага, α – коэффициент пропорциональности, зависящий от физико-механических свойств грунта, геометрической формы и размеров стопы.

Таким образом на силу сопротивления движению и максимальную тяговую силу влияет распределение нормальных реакций, а возможность управления их величинами, благодаря статической неопределимости этой задачи при числе ног, взаимодействующих с опорной поверхностью на одном борту более двух и дискретностью взаимодействия с опорной поверхностью, является характерной особенностью роботов с шагающими двигателями, чем они и отличаются от транспортных средств с традиционными типами двигателей.

Рассмотрено плоское движение шагающей машины в вертикальной плоскости как твердого тела (рис. 1).

Положение корпуса робота характеризуется координатами его центра масс x_c , y_c и углом поворота φ . Ось OX лежит в условно недеформированной горизонтальной плоскости опорной поверхности. Курсовое положение стопы j двигателя a_j ($j=1, N$) относительно центра масс робота при его равномерном движении вдоль горизонтальной оси OX со скоростью V_0 задается функцией

$$a_j = a_{j\max} - V_0(t - \tau_{Hj}), \quad \tau_{Hj} < t < \tau_{Kj}, \quad (2)$$

где $a_{j\max}$ – положение стопы движителя в начале фазы ее взаимодействия с опорной поверхностью, τ_{Hj} , τ_{Kj} – начало и конец фазы взаимодействия стопы движителя. Причем рассматривается только один цикл движения движителя

$$-\gamma T < \tau_{Hj} < T(1 - \gamma), \quad \tau_{Kj} = \tau_{Hj} + \gamma T. \quad (3)$$

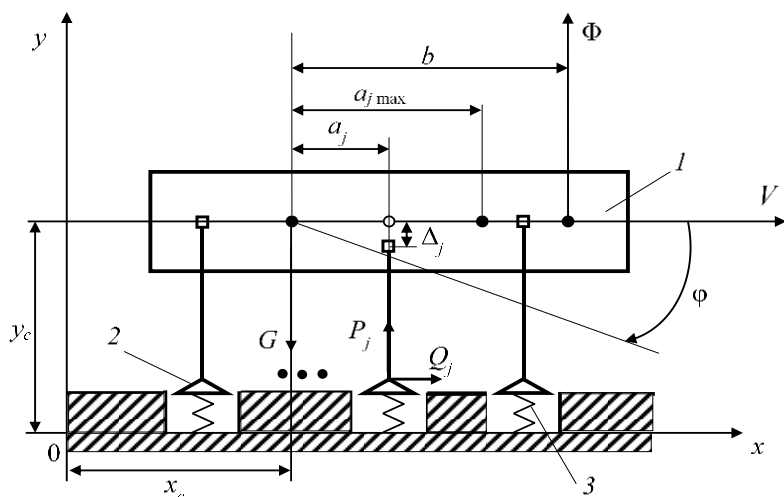


Рис. 1. – Расчетная схема шагающей машины:
1 – корпус робота, 2 – опоры шагающего движителя, 3 – эквивалентный упругий элемент жесткости с системы: стопа – опорная поверхность.

Положение стопы j движителя, взаимодействующего с опорной поверхностью в вертикальном направлении относительно корпуса робота, определяется характерной величиной S_0 . Эта величина зависит от типа движителя. Так, например, для ортогонального движителя S_0 зависит от длины опорной стойки h и ее расположения Δ_j . Оси всех движителей не обязательно должны располагаться на одной горизонтальной оси.

Таким образом возможна постановка задачи о нахождении управления $\Delta_j = \Delta_j(t)$ обеспечивающее максимум критерия

$$I = Q_{\text{тяг. max}} - Q_{\text{сопр}}. \quad (4)$$

Для цикловых движителей, не имеющих индивидуального привода адаптации, определяются оптимальные расположения точек подвеса $\Delta_j = \text{const}$, обеспечивающих условие (4) на этапе проектирования, что и является предметом исследования.

Проведены экспериментальные исследования зависимости тягового усилия от расположения опор движителей относительно центра масс.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 2, а схема на рис. 3.

Методика эксперимента состояла в последовательном перемещении груза G по твердому телу от «кормы» к «носу» и установления силы натяжения T , при которой начинается проскальзывание опор. Регулирование силы натяжения T осуществляется за счет управления силой P при помощи добавления или удаления в емкости водной фракции. Изучалось взаимодействие стоп с различными опорными поверхностями: сыпучими – песок сырой, песок сухой, пластичными – пластилин,

галечная крошка. Устанавливалось 6 опор (3×2) на расстояниях от «кормы» к «носу» 9,5 см, 14,5 см, 29 см.

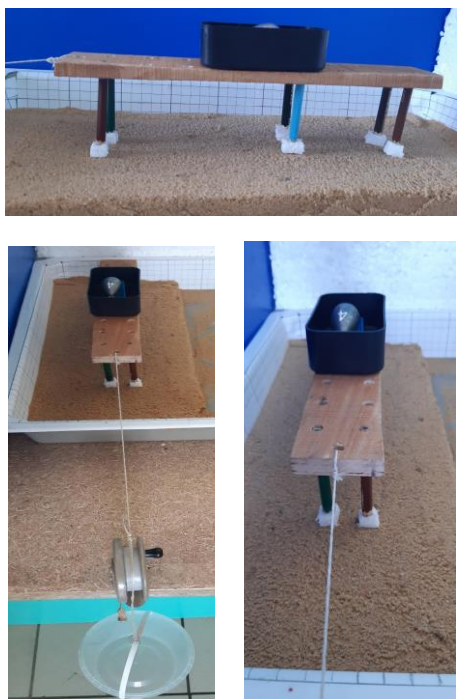


Рис. 2 – Общий вид экспериментальной установки

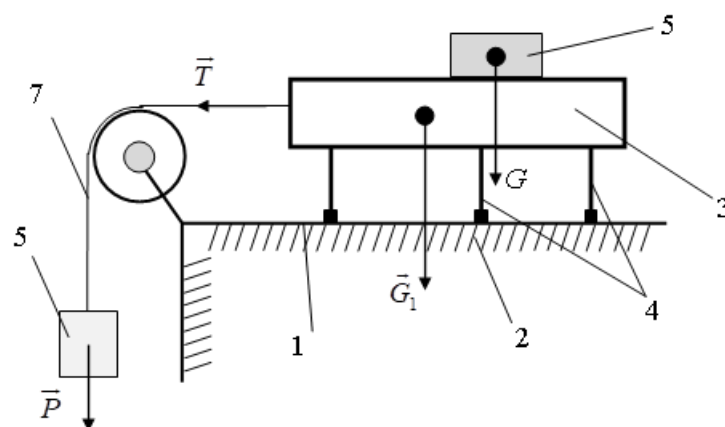


Рис. 3 – Схема экспериментальной установки: 1 – грунтовая ванна, 2 – грунт, 3 – твердое тело весом \vec{G} , 4 – опорные стойки имитирующие движители, 5 – перемещаемый в продольном направлении груз за счет чего производится имитация перемещения твердого тела 4, 6 – груз P имитирующий силу сопротивления движению твердого тела за счет возникновения силы натяжения троса 7.

Основной результат исследований состоял в том, что эксперимент подтвердил возрастающую зависимость тягового усилия от перемещения центра масс робота ΔS .

В третьей главе рассмотрена реализация программных режимов движения мобильных роботов с шагающими движителями.

Одна из важнейших характеристик всех движителей, обусловленная их кинематической схемой, состоит в обеспечении программного движения стопы с минимальной ошибкой позиционирования, вызываемой ошибкой в системе управления приводами. Еще более важной является обеспечение программной скорости

Действительно, как известно, состояние механической системы определяется координатами и скоростями ее точек. Для этого необходимо учитывать и скорость центра масс стопы как функцию времени.

$$\dot{x}^j = \frac{\partial x^j}{\partial u^n} \dot{u}^n. \quad (5)$$

Уравнения (5) позволяют оценить ошибку в позиционировании δx^j стопы и ее программной скорости $\delta \dot{x}^j$

$$\delta x^j = \frac{\partial x^j}{\partial u^n} \delta u^n; \quad \delta \dot{x}^j = \frac{\partial^2 x^j}{\partial u^n \partial u^k} \dot{u}^n \delta u^k + \frac{\partial x^j}{\partial u^n} \delta \dot{u}^n. \quad (6)$$

Таким образом, эти ошибки, влияющие на устойчивость программных режимов движения шагающего движителя, могут быть обусловлены как ошибками

системы управления $\delta u, \delta \dot{u}$, так и кинематической схемой движителей, что описывается функциями

$$\Psi_n^j = \frac{\partial x^j}{\partial u^n}; \quad \lambda_{nk}^j = \frac{\partial^2 x^j}{\partial u^n \partial u^k}. \quad (7)$$

Таким образом, ставится задача оценки кинематической точности программного движения стопы механизма шагания на основе передаточных функций (7). Функции (7) позволяют при постоянных $u^n = u^n(t)$ оценить интегральные ошибки по положению I_{nk} и скорости Φ_{nk} стопы механизма шагания в форме постоянных элементов квадратных матриц с размерностью, равной количеству приводов.

$$\begin{cases} I_{nk} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \chi_{nk} dt \\ \Phi_{nk} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau v_{nk} dt \end{cases} \quad (8)$$

где τ – время одного цикла; χ_{nk}, v_{nk} – локальные компоненты элементов интегральных ошибок.

$$\begin{cases} \chi_{nk} = \delta_{jl} \Psi_n^j \Psi_k^l, \\ v_{nk} = \delta_{jl} \{ (\lambda_{nk}^j \dot{u}^r + \Psi_n^j) (\lambda_{kq}^l \dot{u}^q + \Psi_k^l) \}, \end{cases} \quad r, q = 1, 2 \dots N \quad (9)$$

δ_{jl} – функция Кронекера.

Особенностью предложенных оценок, в частности v_{nk} , является зависимость от скорости программного управления приводами $\dot{u}^r = \dot{u}^r(t)$.

Оценка кинематических схем движителей по этим показателям осуществляется введением скалярной функции G , построенной на основе введенных оценок и ошибок в программной реализации движений управляемых приводов $\delta u^n, \delta \dot{u}^n$.

Тогда

$$G = I_{nk} \delta u^n \delta u^k + \Phi_{nk} \delta \dot{u}^n \delta \dot{u}^k \quad (10)$$

В четвертой главе рассматривается движение стопы шагающего движителя при ее отрыве от влагонасыщенного грунта при переходе в фазу переноса.

В качестве расчетной схемы стопы шагающего движителя взаимодействующего с грунтом дна водоема рассматривается горизонтальная плита массы m и площади S поступательно перемещающаяся вдоль вертикальной оси в жидкой среде с известным коэффициентом проницаемости k и динамической вязкостью μ (рис. 4). На этапе тягового режима плита находится в покое, а на этапе подъема на нее действуют силы: mg – вес плиты, T – усилие, развиваемое приводом подъема стопы движителя, $p_0 S, p S$ – соответственно силы давления воды на верхнюю и нижнюю поверхность плиты. В положении равновесия $p = p_*$

$$p_*S - p_0S = F \quad (11)$$

где F – выталкивающая сила.

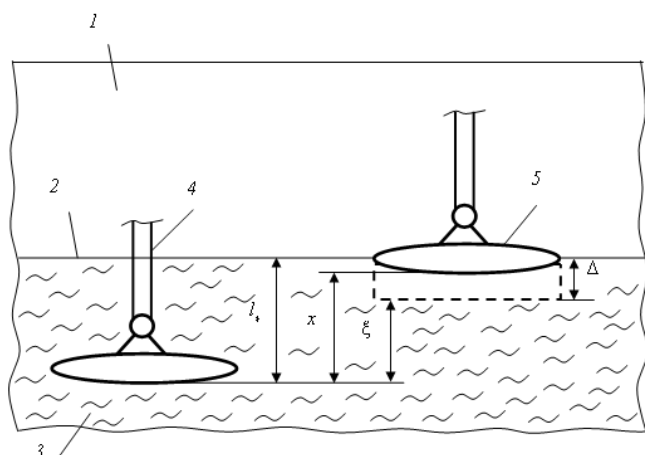


Рис. 4 – Расчетная схема движителя, погруженного во влагонасыщенный грунт: 1 – среда с высокой проницаемостью, 2 – граница раздела сред с высокой и низкой проницаемостью, 3 – среда с низкой проницаемостью, 4 – опорная стойка движителя, 5 – стопа движителя, l – условная высота столба донного грунта, x – координата нижней поверхности стопы, ξ – граница уровня жидкости под стопой.

При движении плиты погруженной в грунт вверх под ней образуется разрежение, за счет расширения объема растворенного воздуха в жидкости в соответствии с законом Генри. В расчетной схеме это учитывается разностью координат между нижней поверхностью плиты x и поверхностью жидкости ξ

$$\Delta = x - \xi \quad (12)$$

В положении равновесия стопы при $t = 0$

$$\xi_0 = -\Delta_0, \quad x_0 = 0, \quad \dot{x}_0 = 0, \quad \dot{\xi}_0 = 0 \quad (13)$$

Подъем стопы осуществляется с начальной нулевой скоростью под действием силы T , развиваемой приводом подъема. При достижении стопой высоты $x_* = l_*$, стопа отрывается от грунта и на нее перестает действовать сила, вызываемая «компрессией» под ее нижним основанием.

Прямая задача состоит в определении уравнения движения стопы $x(t)$ шагающего движителя при известной силе $T=T(t)$, реализуемой приводом подъема.

Обратная задача состоит в определении требуемого усилия $T=T(t)$, обеспечивающего необходимый закон подъема стопы $x(t)$.

Метод решения основан на учете нескольких законов и теорем.

Закон Генри, о концентрации газа в жидкой среде. Это выражается во введении в расчетную модель высоты Δ_0 столба газа под опорой.

Закон расширения объема газа при политропическом процессе при подъеме стопы

$$p(x - \xi)^n = (p_0 + F/S)\Delta_0^n \quad (14)$$

где n – показатель политропы.

При относительно медленном подъеме и теплообмене, обеспечивающем постоянство температуры, $n=1$.

Закон Дарси фильтрации жидкости

$$\frac{d\xi}{dt} = \alpha \left(p_0 + \frac{F}{S} - p \right), \quad \alpha = \frac{k}{\mu L}, \quad (15)$$

где k – коэффициент проницаемости грунта, μ – динамическая вязкость жидкости, l – условная высота столба донного грунта, через который происходит фильтрация.

Для стопы шагающего движителя условная высота столба фильтрации l трудно устанавливаемая величина. Считается, что по мере подъема стопы в грунте столб фильтрации уменьшается, а максимальной величины достигает при неподвижной стопе, воспринимающей нагрузку G от веса робота с учетом перевозимого груза

$$l_* = G / S c \quad (16)$$

где c – коэффициент объемного смятия донного грунта.

В реальных условиях α определяется экспериментально, а в расчетной схеме считается постоянной величиной.

Теорема о движении центра масс твердого тела в отсутствии нормальной реакции грунта

$$m\ddot{x} = -mg + T - p_0 S + p S. \quad (17)$$

Уравнения (14 – 17) сводятся к двум совместно решаемым уравнениям

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \alpha \left(p_0 + \frac{F}{S} \right) \left(1 - \frac{\Delta_0}{x - \xi} \right), \\ m\ddot{x} = T - mg + F \frac{\Delta_0}{x - \xi} + p_0 S \frac{\Delta_0 + \xi - x}{x - \xi}. \end{cases} \quad (18)$$

Уравнения (18) представляют собой систему двух нелинейных дифференциальных уравнений, относительно переменных $x(t)$, $\xi(t)$. Начальные условия для переменных устанавливаются из (13). Полученные уравнения допускают возможность решения двух задач: прямой, обратной.

Решение системы дифференциальных уравнений (18) можно осуществить численными методами. Однако, это может создать лишь видимость точного решения в силу приближенного определения параметров α , Δ_0 . Поэтому целесообразно линеаризовать уравнения (18), полагая что $x - \xi - \Delta_0$ мало.

Тогда, вместо (18) имеют место линеаризованные уравнения, допускающие аналитическое решение

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \alpha \left(p_0 + \frac{F}{S} \right) \frac{x - \xi - \Delta_0}{\Delta_0} \\ m\ddot{x} = T - mg + F - (p_0 S + F) \left(\frac{x - \xi}{\Delta_0} - 1 \right) \end{cases} \quad (19)$$

Уравнения (19) можно привести к одному дифференциальному уравнению. Для этого из первого уравнения (19) выражается

$$x = \xi + \frac{\dot{\xi}\Delta_0}{\alpha(p_0 + F/S)} + \Delta_0 \quad (20)$$

и подставляется во второе уравнение. В результате имеет место линейное дифференциальное уравнение третьего порядка относительно ξ или второго относительно $\dot{\xi} = V$.

В итоге получено уравнение третьего порядка

$$\frac{m\Delta_0 S}{\alpha(p_0 S + F)} \ddot{V} + m\dot{V} + \frac{S}{\alpha} V + mg - F = T. \quad (21)$$

Особенностью уравнения (21) является второй порядок относительно скорости, что объясняется объединением двух уравнений (19).

Уравнение (21) позволяет исследовать влияние физико-механических свойств среды и массово-геометрических параметров стопы движителя на усилия, развиваемые приводом адаптации как прямой, так и обратной задачи, а на их основе получить оптимальный режим движения, в частности по критерию минимума тепловых потерь.

Если ставится задача определения такого закона вертикального перемещения стопы, за заданное время τ , который обеспечивает минимум тепловых потерь W в приводном двигателе то тепловые потери определяются интегралом

$$W = v \int_0^{\tau} T^2 dt \quad (22)$$

где v - постоянная двигателя.

Для обеспечения минимума интеграла (22) основанный на применяются уравнения Эйлера-Пуассона с привлечением изопериметрического условия прохождения расстояния l (рис. 4) за время τ .

Для составления уравнений Эйлера-Пуассона функционал (22) следует объединить функционалом, характеризующим изопериметрическое условие

$$\int_0^{\tau} V dt = l \quad (23)$$

Тогда объединённая подынтегральная функция с неопределённым множителем η имеет вид

$$\Phi = vT^2 + \eta V \quad (24)$$

относительно которой составляется уравнение Эйлера-Пуассона

$$\frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{V}} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{V}} \right) + \frac{\partial \Phi}{\partial V} = 0 \quad (25)$$

Уравнение оптимального режима движения имеет вид

$$\left[\frac{m\Delta_0 S}{\alpha(p_0 S + F)} \right]^2 \ddot{V} + \left[\frac{2m\Delta_0 S^2}{\alpha^2(p_0 S + F)} - m^2 \right] \dot{V} + \frac{S^2}{\alpha^2} V + \frac{2S}{\alpha} (mg - F) + \frac{\eta}{v} = 0 \quad (26)$$

Анализ некоторых результатов показывает, что характер оптимальных режимов движения отличается от полученных ранее законов движения, а энергетически оптимальный режим по критерию тепловых потерь превосходит неоптимальный на 5%.

В заключении подведены итоги работы, сделаны выводы о значении проведенного исследования:

1. Решена двухкритериальная задача, учитывающая силу сопротивления движению тела и тяговую силу, направленная на установление оптимального соотношения между нормальными реакциями взаимодействия стоп шагающих движителей с опорной поверхностью. За счет регулирования вертикального положения стопы движителя относительно корпуса робота можно управлять силой сопротивления движению и максимальной тяговой силой. Устанавливать вертикальное положение стопы относительно корпуса робота можно на стадии проектирования или в процессе движения.

Предложен критерий эффективности грунтовой проходимости робота, перемещающегося по дну водоема, состоящего из двух показателей: тяговое усилие, сила сопротивления движению.

Установлены зависимости тягового усилия и силы сопротивления движению от массово-геометрических параметров робота и свойств грунта (жесткости).

Определена оптимальная величина выталкивающей силы в соответствии с установленными закономерностями.

Реализация предложенного метода повышения тягово-сцепных свойств шагающих движителей и снижения сил сопротивления предъявляет повышенные требования к точности позиционирования стоп механизмов шагания в процессе движения робота.

2. Введен скалярный показатель точности кинематической схемы механизма шагающего движителя, который позволяет производить сравнение механизмов по этому показателю. В основе введенного показателя лежат передаточные функции механизма первого и второго порядка и их средние значения в пределах цикла. Геометрический смысл скалярной функции G – сумма средних квадратов отклонения стопы и скорости в её фактическом движении от программного. Введенный показатель точности позволяет также производить оценку возможных дополнительных усилий развиваемых приводами движителей для реализации программного движения.

Предложен метод формирования уравнений движения переноса шагающих движителей в новое положение, опирающийся на задаваемую траекторию переноса и соотношение между усилиями, развиваемыми приводами, обеспечивающими устойчивость программного движения.

Предложено определение «квазиидеальных» связей, отличающихся от идеальных тем, что их реакциями являются «квазиобобщенные» силы, но

виртуальная работа которых, так же, как и для реакций идеальных связей, равна нулю. Получены уравнения Лагранжа для механической системы с избыточными координатами и с дополнительными уравнениями голономных «квазиидеальных» связей. Рассмотренный метод составления уравнений движения представляет дополнительные возможности для построения оптимального программного движения по критерию, состоящего из различных показателей. Применение «квазиидеальных» связей в системе управления расширяет возможности обеспечения устойчивости движения механических систем.

3. Предложена математическая модель процесса подъема стопы движителя мобильного робота от грунта, учитывающая «компрессионный» эффект.

Получены линеаризованные дифференциальные уравнения движения поднимаемой стопы движителя, позволяющие получать аналитические решения и анализировать влияние геометрических и физико-механических параметров свойств грунта на усилие, развиваемое приводом.

Установлены закономерности развиваемых приводом подъема стопы усилий от времени качественно совпадающие с известными экспериментальными результатами. Установленные закономерности позволяют ставить задачи о целенаправленном управлении нормальными реакциями, действующими на стопы шагающих движителей подводных мобильных роботов или грузов якорно-тросовых движителей, за счет применения конструкций, позволяющих регулировать коэффициент проницаемости донного грунта, через который происходит фильтрация жидкости.

Предложен метод определения оптимальных, с точки зрения минимума тепловых потерь в приводе подъема шагающего движителя, режимов движения, учитывающий дополнительную силу, действующую на стопу за счет «компрессионного» эффекта. За счёт оптимального управления движением опоры шагающего движителя можно добиться снижения потерь энергии на сопротивление силам движению под водой. Это вызвано тем, что описание физических процессов позволяет находить пути решения задачи.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Об управлении тяговыми характеристиками и сопротивлением движению мобильных роботов с шагающими движителями / Брискин Е.С., Смирная Л.Д., Артемьев К.С. // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2023. - Т. 24, № 2. - С. 101-106. - DOI: 10.17587/mau.24.101-106.
2. Об управлении вертикальными реакциями шагающих движителей и их влиянии на тягово-сцепные характеристики мобильного робота / Артемьев К.С., Смирная Л.Д. // Известия ВолгГТУ. Серия Роботы, мехатроника и робототехнические системы. - Волгоград, 2023. - № 4 (275). - С. 6-12. - DOI: 10.35211/1990-5297-2023-4-275-6-12.

3. О построении уравнений движения шагающих движителей мобильных роботов в фазе переноса / Смирная Л.Д., Брискин Е.С. // Известия ВолгГТУ. Серия Роботы, мехатроника и робототехнические системы. – Волгоград, 2022. - № 9 (268). - С. 75-79.
4. Групповое отклонение роботов при учете влияния связей с отклоняющимся аргументом / Смирная Л.Д., Брискин Е.С. // Известия ВолгГТУ. Серия Роботы, мехатроника и робототехнические системы. - Волгоград, 2022. - № 4 (263). - С. 53-57.
5. Формирование свойств движения механических систем за счет управления реакциями голономных квазиидеальных связей / Брискин Е.С., Павловский В.В., Павловский В.Е., Смирная Л.Д. // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. - 2021. - № 6. - С. 13-23. - DOI: 10.31857/S0002338821060068.
6. О точности позиционирования шагающих движителей мобильных роботов / Смирная Л.Д., Вершинина И.П. // Известия ВолгГТУ. Серия Роботы, мехатроника и робототехнические системы. - Волгоград, 2021. - № 9 (256). - С. 69-73.
7. Об управлении усилием отрыва стопы шагающего движителя подводного робота от опорной поверхности / Смирная Л.Д. // Известия ВолгГТУ. Серия Роботы, мехатроника и робототехнические системы. - Волгоград, 2020. - № 9 (244). - С. 80-83.
8. Об отрыве стопы шагающего движителя мобильного подводного робота от грунта / Брискин Е.С., Смирная Л.Д. // Робототехника и техническая кибернетика. - 2019. - Т. 7, № 3. - С. 215-223.
9. Об оптимальном распределении нормальных реакций шагающих движителей подводных роботов / Смирная Л.Д., Вершинина И.П. // Известия ВолгГТУ. Серия Роботы, мехатроника и робототехнические системы. - Волгоград, 2019. - № 3 (226). - С. 47-50.
10. Определение усилий в движителях якорно-тросового типа / Брискин Е.С., Пеньшин И.С., Смирная Л.Д., Шаронов Н.Г. // Известия ВолгГТУ. Серия Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. - Волгоград, 2017. - № 14 (209). - С. 87-90.

Публикации в зарубежных изданиях, индексируемых Scopus и WoS

1. On the Kinematic Characteristics of Walking Mechanisms of Mobile Robots with Walking Propulsion Devices / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов, Л.Д. Смирная, К.С. Артемьев // Robotics in Natural Settings. CLAWAR 2022 : proceedings of 25th Conference Series on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (Ponta Delgada, Portugal, September 12-14, 2022) / eds.: J. M. Cascalho [et al.]; CLAWAR Association in collaboration, University of the Azores. – Cham (Switzerland): Springer Nature Switzerland AG, 2023. – P. 195-203. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-15226-9_20. – (Book ser. Lecture Notes in Networks and Systems (LNNS); vol. 530). – [First Online: 25 August 2022].
2. About the Distribution of Traction Efforts Between the Propulsion Devices of Walking Robots / Брискин Е.С., Платонов В.Н., Смирная Л.Д. // Robotics for Sustainable Future. CLAWAR 2021: Climbing and Walking Robots Conference: proceedings of 24th International Conference Series on Climbing and Walking Robots (Takarazuka, Japan, 30 August – 1 September, 2021; virtual platform) / eds.: D. Chugo [et al.]; CLAWAR Association in collaboration, Kwansai Gakuin University. – Cham (Switzerland): Springer Nature Switzerland AG, 2022. – P. 286-294.
3. Formation of the Motion Properties of Mechanical Systems by Controlling the Reactions of Holonomic Quasi-Ideal Constraints / Брискин Е.С., Павловский В.В., Павловский В.Е., Смирная Л.Д. // Journal of Computer and Systems Sciences International. - 2021. - Vol. 60, issue 6 (November). – P. 853-863.

4. On determining the optimal lifting law of the walking propulsion device foot of an underwater robot from the bottom / Брискин Е.С., Калинин Я.В., Смирная Л.Д. // Robots in Human Life. CLAWAR 2020 (Moscow, Russian Federation, 24-26 August, 2020): Proceedings of 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines / eds.: V. G. Gradetsky [et al.] ; CLAWAR Association in collaboration, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPMech-RAS). – [Publisher: CLAWAR Association Ltd, UK], 2020. – P. 412-418.

Свидетельства о государственной регистрации

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021617113 от 11 мая 2021 г. Российская Федерация. Программное обеспечение для персонального компьютера системы управления стендом якорно-тросового движителя / Е.С. Брискин, Н.Г. Шаронов, Л.Д. Смирная, В.Н. Платонов; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. - 2021.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661798 от 18 сентября 2018 г. Российская Федерация. Автоматизированная система определения режимов управления касательной жёсткостью опор шагающего движителя / А.В. Малолетов, Я.В. Калинин, Л.Д. Смирная; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. - 2018.

Публикации в других изданиях

1. On the Control of the Movement of Robots Due To Introducing Holonomic Quasi-Ideal Constraints / Брискин Е.С., Смирная Л.Д., Шаронов Н.Г., Калинин Я.В. // 2021 International Conference «Nonlinearity, Information and Robotics» (NIR) (Innopolis, Russian Federation, 26-29 August 2021) / Innopolis University [et al.]. – Publisher: IEEE, 2021. – 4 p.
2. Управление нормальными реакциями шагающих движителей подводных роботов с грунтом / Смирная Л.Д., Брискин Е.С. // Сборник тезисов 31-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (г. Санкт-Петербург, 28-29 сентября 2020 г.) / Гос. научный центр РФ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский ин-т робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК) [и др.]. - Санкт-Петербург, 2020. - С. 184-186.
3. The interaction of the foot walking propulsion of mobile underwater robot with the bottom soil = Взаимодействие стопы шагающего движителя мобильного подводного робота с грунтом / Смирная Л.Д., Брискин Е.С. // Экстремальная робототехника: сб. тез. 30-й междунар. науч.-техн. конф. (International Scientific and Technological Conference «Extreme Robotics–2019») (г. Санкт-Петербург, 13-15 июня 2019 г.) / Гос. научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский ин-т робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК) [и др.]. - Санкт-Петербург, 2019. - С. 181 (англ); С. 182 (рус.).
4. Исследование закономерностей, сопровождающих взаимодействие движителей шагающих роботов с опорной поверхностью, и их учёт для повышения энергетической эффективности / Калинин Я.В., Мирошкина М.В., Смирная Л.Д. // XII мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019) (Дивноморское, Геленджик, 23-28 сентября 2019 г.): материалы конф. В 4 т. Т. 2 / редкол.: И.А. Каляев (отв. ред.), В.Г. Пешехонов, Д.А. Новиков [и др.] ; РФФИ, Южный научный центр РАН, ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Южный федеральный ун-т, Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН [и др.]. - Ростов-на-Дону; Таганрог, 2019. - С. 199-201.
5. О взаимозависимости тягово-сцепных свойств и сил сопротивления движению для подводных мобильных роботов с ортогональными шагающими движителями / Смирная Л.Д., Брискин Е.С. // Юбилейная XXX Международная инновационная конференция молодых учёных и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС –

- 2018) (г. Москва, 20-21 ноября 2018 г.): сб. тр. конф. / отв. ред.: Н.А. Татусь; Российская Академия наук, Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления, РФФИ, Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН). - Москва, 2019. - С. 509-511.
6. Динамика и управление движением робота заклинивающего типа при перемещении по горизонтальной опоре / Малолетов А.В., Азарян Д.К., Смирная Л.Д. // Проблемы механики современных машин: материалы VII междунар. науч. конф. (г. Улан-Удэ, 25-30 июня 2018 г.). В 2 т. Т. 2 / редкол.: В. С. Балбаров (отв. ред.) [и др.]; Восточно-Сибирский гос. ун-т технологий и управления, Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Уханьский текстильный ун-т (Китай), Иркутский гос. ун-т путей сообщения, Братский гос. ун-т. - Улан-Удэ, 2018. - С. 68-72.
7. Об оптимальных режимах движения шагающих машин при движении по неровному грунту / Мирошкина М.В., Брискин Е.С., Смирная Л.Д. // Прогресс транспортных средств и систем – 2018 : материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.) / редкол.: И. А. Каляев, Ф. Л. Черноусько, В. М. Приходько [и др.] ; ВолгГТУ, РФФИ, «ФНПЦ «Титан–Баррикады». - Волгоград, 2018. - С. 142-144.

Подписано в печать _____ Заказ № _____. Тираж 75 экз. Печ. л. 1,0

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Типография ИУНЛ

Волгоградского государственного технического университета

400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корпус 7.