

АННОТАЦИЯ

Актуальность исследования. Современные тренды развития мобильных роботов указывают на растущий интерес к шагающим роботам как альтернативы транспортным средствам на колёсной и гусеничной основе. На сегодняшний день преимущества шагающей мобильности при перемещении по сложному рельефу следует считать полностью доказанным, что и обуславливает растущий интерес к движителям на шагающей основе. Шагающий робот способен «перешагивать» препятствия, что ещё больше повышает её проходимость. В отличие от колеса или гусеницы, ноги шагающего робота почти не испытывают сопротивления среды при перемещении, что практически исключает пробуксовку на месте, и во многих случаях позволяет обойтись без грунтозацепов. Также шагающий принцип перемещения позволяет минимизировать давление на грунт, сделать её существенно ниже, чем в случае гусеничной машины или, тем более, колёсной. Повышенный интерес к шагающим роботам можно наблюдать в связи с стремительным ростом сельскохозяйственных роботов, т.к. шагающие роботы наносят минимальный вред несущей поверхности. Благодаря дискретной следовой дорожке вместо сплошной колеи, существенно уменьшается эрозия почвы, практически исключается риск образования оврагов, что позволяет говорить о хороших экологических свойствах шагающего движителя. Таким образом, использование шагающего способа передвижения становится незаменим для работы в зонах разрушений.

Лидирующими группами в области исследований и разработок шагающих роботов являются [26, 27, 28]: компания Бостон Дайнамикс (Boston Dynamics, США), Ghost Robotics (США, Филадельфия), Лаборатория роботов Case Western Reserve University (США), Массачусетский технологический институт, Институт машиноведения имени А.А.Благонравова РАН (г.Москва), Волгоградский Государственный технический университет, ФНИЦ «Титан-Баррикады», АО ЦКБ «Титан» (Россия), Технологический институт Токио (Dept. Of Mechano-Aerospace Engineering, Япония, лаборатория профессоров Шигео Хирозе и Едвардо Фукушима), Университет Токио (Dept. of Mechano-Informatics, группа профессора Нориаки Такасуки), Немецкий исследовательский центр искусственного интеллекта (Германия, [Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH](#), [Robotics Innovation Center](#)), Исследовательский центр информационных технологий FZI (Karlsruhe, Германия), Китайская оборонная компания «НОРИНКО», Шанхайский Университет Цзяотун (Китай, Shanghai Jiao Tong University), Институт технологии и инженерии (Institute of Technology and Engineering, Changchun, Китай), Университет Кассино (Италия, группа профессора М.Чеккарелли), Итальянский технологический институт (Генуя, Италия, Advanced Robotics Department). Подробный обзорный материал представлен в монографиях профессора Марко Чеккарелли (Университет Кассино, Италия) [29], профессора Кеннета Уалдрона (Университет штата Огайо), Г.Гента (Германия), в ряде специализированных выпусков международного журнала «The International Journal of Robotics Research».

Однако существующие подходы основаны на активном согласовании работы двигателей и имеют сложную иерархическую систему управления. Кроме того,

двигатели работают в режимах интенсивного разгона-торможения и из-за этого имеют неоправданно низкий КПД. Если во главу угла ставить вопрос экономичности, простоты и доступности технических средств, то нерациональность универсальных конструкций не вызывает сомнений. Нерациональность структурного решения большинства ШР связана также со структурной избыточностью и многократной статической неопределённостью. Количество активных приводов в таких системах гораздо больше числа степеней свободы системы. Так, например, антропоморфные ШР, стремящиеся повторить двуногую ходьбу и бег человека, используют динамическую походку и являются очень дорогими, несмотря на то, что достигнуты фантастические результаты (бипедальные ШР типа Atlas и др.) То же самое во многом относится и к четвероногим (Quadruped) и шестиногим (Hexapod) структурным схемам, характеризующимся сложностью многоуровневой системы управления, большими энергозатратами на поддержание веса корпуса и реверсивными режимами работы двигателей.

Альтернативным в отношении “биоморфных” конструкции является использование ортогональных схем движителя. Такое разделение двигателей важно с точки зрения увеличения КПД и упрощения системы управления. Копирующие или ортогональные движители обладают всеми преимуществами движителей инсектоморфного типа (представляющих собой открытые кинематические цепи), в то же время они обладают рядом дополнительных преимуществ. В таких движителях основное линейно-поступательное движение корпуса машины осуществляет главный двигатель, а весовая нагрузка от корпуса приходится только на устройство блокировки двигателя. Однако недостаток таких движителей состоит в использовании возвратно-поступательных приводов, в наличии значительных поперечных нагрузок в поступательных парах. Использование прямолинейно-направляющих механизмов позволяет добиться кинематической развязки движения и разделения функций двигателей, когда основной двигатель отвечает за прямолинейно-поступательное движение корпуса, другая группа приводов – за адаптацию к неровностям пересеченной местности, а третья группа – за поворот и маневрирование. Перспективными считаются копирующие механизмы пантографного типа, которые позволяют достаточно просто регулировать высоту траекторий, обеспечивают линейное передаточное отношение между входными и выходными обобщёнными координатами. Так построен, например, шагающий робот «с адаптивной подвеской» Adaptive Suspension Vehicle профессора К.Уалдрона и др. К недостаткам таких конструкций относятся значительные силовые воздействия на задающие органы, использование поступательных пар, нагруженных поперечной нагрузкой.

На основании вышеизложенного проблема оптимальности конструкции шагающего аппарата и его движителя остаётся **актуальной** с точки зрения минимизации потребления энергии и упрощения управления (и, как следствие, увеличения быстродействия системы управления).

- **Целью работы** является разработка методов синтеза механизмов ШР и оптимизация параметров робота на основе функциональной декомпозиции, что позволяет упростить систему управления и обеспечить движение по пересеченной

местности с минимальными энергозатратами.

- **Объект исследования:** шагающий робот повышенной проходимости;
- **Предмет исследования:** оптимальный структурно-параметрический синтез кинематической схемы шагающего робота;
- **Методы исследования:** методы проектирования роботов, рационального синтеза рычажных механизмов, аналитические и численные методы оптимизационного, многокритериального синтеза механики машин;
- **Теоретическая и практическая значимость исследования:** обоснование оптимальной кинематической схемы шагающего робота на основе функционального разделения двигателей, что приводит к существенной разгрузке системы управления и повышает к.п.д. системы, разработка метода многокритериального синтеза движителя ШР, аналитического метода синтеза кинематической схемы ШР.

Новизна исследования заключается в разработке методов синтеза и оптимизации структурных и метрических параметров ШР на основе функционального разделения двигателей, что позволяет

- упростить координацию ног и осуществлять движение с минимальным количеством двигателей, наименьшим энергопотреблением и применением максимально простого управления;
 - решить проблему адаптации каждой стопы к неровностям поверхности индивидуально и независимо от основного блока управления;
 - решить проблему избыточных связей существующих конструкций и устранить паразитные нагрузки на исполнительные механизмы, связанные с множественной статической неопределенностью;
 - исключить дополнительные затраты энергии на проскальзывание стопы и уменьшения реакции в шарнирах при поворотах;
- а также оптимизация поворота робота на основе критерия изотропности.

Согласно плану исследования, научно-исследовательская работа состоит из нескольких частей, каждая из которых фокусировалась на определенных прикладных и теоретических аспектах исследования.

Задачи исследования:

- Обзор и анализ исследований в области шагающих роботов и анализ основных типов движителей.
- Разработка метода рационального синтеза шагающего робота на основе функционально разделения двигателей.
- Разработка численно-аналитического метода синтеза движителя ШР.
- Разработка и тестирование алгоритмов и программ синтеза.
- Численная реализация и оптимизация параметров механизма ноги.
- Разработка механизма адаптации к неровностям несущей поверхности.
- Исследование режимов поворота и структурно-параметрический синтез механизмов поворота.
- проектирование механизма движителя и макета ШР в ПО SolidWorks и Autodesk Inventor.
- Разработка и тестирование электронно-управляющих компонент и системы

управления ШР.

- Тестирование функционала ШР на разработанном макете.

Основное содержание работы.

В первой части диссертационной работы был проведен детальный сравнительный анализ мировых тенденций в области разработки шагающих роботов за последние годы, в результате чего были выявлены перспективные направления для дальнейшего развития этой области исследований.

Во второй части работы разработан принцип проектирования на основе разделения функций приводов на основе рационального проектирования конструкции робота. Предложенный принцип позволяет спроектировать ШР, работающий в оптимальном с механической точки зрения режиме, с минимальными затратами энергии.

Рациональный структурный синтез ШР позволил устранить проблему избыточных связей и многократной статической неопределенности в конструкциях традиционных шагающих роботов;

Предложенный принцип проектирования позволяет обойтись минимальным количеством активных приводов. В результате конструктивной оптимизации количество основных двигателей сокращено до шести. При этом дополнительные шесть приводов адаптации не участвуют в основном движении, координация их работы не требуется, поскольку адаптация каждой ноги осуществляется индивидуально (независимо от других).

В результате, это приводит к существенному упрощению системы управления. Использование данного подхода позволяет осуществлять параметрический синтез ШР на основе известных методов многокритериального синтеза параллельных манипуляторов (на основе таких критериев, как манипулируемость, изотропность и т. д.).

Представлена кинематически эквивалентная схема робота для упрощения дальнейших исследований режимов поворота.

Построена модель механизма «безопасного» поворота, главными условиями для которого являются устойчивость и отсутствие сингулярности.

В третьей части:

Разработан новый аналитический метод синтеза механизмов на основе приближения наименьших квадратов и представлена его численная реализация. За счет минимизации отклонения непосредственно от желаемого выходного движения метод не страдает так называемым «дефектом ветвления», который является распространенным недостатком существующих методов синтеза. Было показано, что предложенный метод позволяет синтезировать механизм с желаемым углом передачи.

Разработана новая схема лямбда-образного механизма для использования в качестве движителя ШР с *неограниченным диапазоном адаптации* стопы к неровностям опорной поверхности. Широкий (теоретически неограниченный) диапазон адаптации к неровностям, т.е. вертикального движения ноги обеспечивается благодаря выходному звену механизма, который совершает прямолинейно-поступательное движение.

Разработана оптимальная конструкция ног, обладающая *высокой точностью, оптимальной передачей движения и цикловым параметром шага*, которые были достигнуты путем *многокритериальной оптимизации* на основе предложенного метода синтеза.

Четвертая часть – разработка механизма адаптации к неровностям, который обеспечивает отсутствие вертикального движения (тряски) при движении по неровной местности, что вновь способствует повышению энергоэффективности.

Пятая часть. Критерий изотропности используется другими авторами для синтеза параллельных манипуляторов как *критерий оптимальной передачи сил и движений во всех направлениях*. В данном исследовании метод впервые применяется для *исследования и синтеза механизма поворота шагающего робота*. Выведены условия изотропности шагающего робота с движителями ортогонального типа и на их основе определены оптимальные конфигурации робота с точки зрения передачи силы и движения. Найдены решения уравнений изотропности и на основе анализа изотропных решений найдены оптимальные метрические параметры робота.

Шестая часть посвящена разработке макета ШР. Разработаны несколько шести- и восьминогих макетов, тестирован функционал ШР в разных режимах движения при походке «трешкой», и четовероногой походке: в главном направлении (вперед и назад), при повороте и передвижении по нерегулярной поверхности. Испытания прошли успешно.

Действующий макет шагающего робота, а также публикации в международных индексируемых журналах (Scopus, WoS, Q1, Q2, и т.д.), публикации на международных конференциях и патент доказывает **корректность** полученных в указанных разделах результатов.