

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Доктора физико-математических наук Юрия Владимировича
Болотина
на диссертацию Александра Васильевича МАЛОЛЕТОВА

ДИНАМИКА И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ, ПАРАМЕТРОВ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ШАГАЮЩИХ МАШИН СО СДВОЕННЫМИ ШАГАЮЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика»

Исследования в области шагающих машин (ШМ) ведутся во многих странах мира. В области теории мобильных роботов, в том числе с шагающими движителями, Россия занимает одно из ведущих мест благодаря работам Д.Е.Охоцимского, А.К.Платонова, Е.А.Девянина, А.В.Ленского, В.В.Белецкого, Е.С.Брискина, А.Л.Кемурджиана, А.М.Формальского, и др. Хотя большинство созданных ШМ представлены лабораторными макетами, некоторые достиг уровня, при котором их практическое использование становится возможным.

К числу ШМ, которые близки к выходу на практику, следует выделить разработанные в Волгоградском государственном техническом университете (ВолгГТУ) под руководством Е.С.Брискина и при участии автора диссертации шагающие опоры для дождевальная машины «Кубань», шагающие машины «Восьминог», «Восьминог М», «Ортоног».

Интересной особенностью шагающих машин ВолгГТУ является использование сдвоенных шагающих движителей, состоящих из двух механизмов шагания, которые кинематически связаны друг с другом. В сдвоенном шагающем движителе в каждый момент времени один из механизмов находится в опоре, а второй — в переносе. Таким образом, шагающий движитель одной из своих двух стоп всегда опирается на грунт, что повышает устойчивость машины и упрощает алгоритмы управления ею.

Достоинства ШМ определяются потенциально более высокой проходимостью, маневренностью и лучшими экологическими свойствами по сравнению с колесными или гусеничными механизмами. Однако при проектировании ШМ встает ряд противоречивых задач. Следовательно, разработка и исследование методов многокритериальной оптимизации структуры, параметров и алгоритмов управления шагающих аппаратов, что, по замыслу автора, является целью работы, весьма актуальна.

Первая глава носит обзорный характер. В ней обсуждаются различные подходы и результаты в данной области как в России, так и за рубежом, приведен обширный библиографический список работ. Следует отметить, что по методу структуризации материала данный обзор, пожалуй, не имеет аналогов в доступной литературе.

На основе этого обзора введен список возможных критериев качества движения шагающих машин, применимый как к статически устойчивым, так и статически неустойчивым ШМ. Введена и другая группа т.н. структурных критериев, характеризующих особенности конструкции ШМ, и выделяющих типы конструкции и число звеньев движителей ШМ.

Часть этих показателей заимствованы из теории транспортных средств с традиционными движителями, другие специфичны для шагающих машин и введены впервые. Некоторые показатели качества, характерные для колёсных машин, для шагающих машин не актуальны. Например, из-за малой скорости движения для многоногих ШМ не нужны показатели, определяющие характеристики торможения, потери устойчивости за счёт инерционных свойств транспортного средства.

После того, как поставлена многокритериальная задача оптимизации, введена связка интегральных критериев качества управления, каждый из которых оптимизирует ту или иную характеристику, а все в целом – позволяют строить точку множества Парето многокритериальной задачи. Предложен полу-эвристический метод поиска в множестве Парето удовлетворительного решения. Показано, что связка интегральных критериев по сложности минимальна для ШМ со сдвоенными движителями, которые и рассматриваются в диссертации.

Во второй главе разработаны теоретико-механические модели шагающих машин, рассматриваемых как системы твёрдых тел, и программное обеспечение, включающее в себя методы моделирования динамики управляемого движения шагающих аппаратов и методы расчёта значений различных механических показателей состояния машины. Проведена проверка разработанных теоретико-механических моделей на экспериментальных образцах шагающих машин.

В основе формирования моделей лежит разделение ШМ на твердые тела со связями различных типов и сведение связей к условиям на вторые производные по времени обобщенных координат. Решая на каждом шаге интегрирования систему линейных алгебраических уравнений, моделирование движения ШМ сводится к решению задачи Коши для уравнения, разрешенного относительно производных. Этот подход применим как к голономным и неголономным связям, но также и к условиям одностороннего контакта стопы с опорой с учетом податливости последней.

Универсальность и модульность метода составления уравнений движения позволяет использовать для его реализации объектно-ориентированный подход. Это значит, в частности, что возможно постепенное наращивание сложности модели без необходимости ревизии ранее написанного кода. Особую полезность моделей обеспечивает простота их встраивания в алгоритмы управления реального времени.

В третьей главе разработаны методы оптимизации алгоритмов и законов управления шагающими машинами. Практическое применение этих методов иллюстрируется на примере машин «Восьминог» и «Ортоног».

Функционал качества – связка интегральных функций обобщенных скоростей, ускорений и координат с неопределенными пока множителями. Для каждого из случаев выписаны уравнения Эйлера разных порядков, описывающее поле экстремалей. Эти уравнения, хотя и не новые, но, собранные и проанализированные вместе, представляют несомненный методический интерес. Решив уравнения Эйлера для нескольких несложных случаев, автор строит соответствующие множества Парето и обсуждает разумные компромиссы между критериями.

В четвёртой главе разработаны методы структурно-параметрической оптимизации шагающих машин. Методы изменения структуры включают в себя добавление новых механизмов или звеньев механизмов, изменение числа степеней свободы, удаление или отключение приводов. В задачах структурной оптимизации часто происходит скачкообразное изменение показателей при изменении структуры машины, например, при изменении количества движителей. При изменении структуры требуется и подбор новых значений параметров аппарата. В задачах многокритериальной оптимизации сложность изменённых механизмов, оцениваемая количеством звеньев, обычно выступает в качестве одного из частных критериев.

Решение задачи структурной оптимизации конструкции в диссертации ограничено ШМ со сдвоенными механизмами шагания, для которых число критериев оптимальности обозримо. Новыми в этой главе являются формулировка и обоснование полного набора критериев оптимальности конструкции ШМ, по которым следует Парето-оптимизировать конструкцию. Основой оптимизации является прямой перебор на гиперкубе возможных параметров.

Методы структурной оптимизации применены для машин, построенных на модульном принципе, который использовался, например, при разработке машины «Ортоног» и дождевальная машины с шагающими движителями. Применение отдельных модулей позволяет наращивать возможности машины, собирая из однотипных модулей транспортный агрегат необходимого состава, а также предполагает возможность реконфигурации аппарата во время движения путём отключения или включения некоторых приводов и блокировки соответствующих степеней свободы. Одним из важных практических выводов работы является то, что число управляемых степеней свободы в машине «Ортоног» является избыточным.

В пятой главе разработаны методы одновременной структурно-алгоритмической оптимизации шагающих машин. Изменение структуры шагающей машины в ряде случаев требует не столько оптимизации параметров, сколько разработки новых алгоритмов управления.

Так, одним из недостатков дождевальных машин кругового действия является наличие значительных участков необрабатываемой земли. Применение шагающих приводов в опорах дождевальных машин позволяет менять форму фермы дождевальной машины во время движения так, чтобы

обрабатываемый участок поля был не круглым, что увеличит коэффициент использования земли. В качестве критерия оптимальности здесь принимается минимум механической работы сил, реализуемых приводами.

Следующие результаты диссертации можно считать безусловно новыми:

Предложена и обоснована система показателей качества шагающих машин, позволяющая оценивать качество машин со сдвоенными движителями и формировать общий критерий качества при решении задач многокритериальной оптимизации.

На основе системы показателей качества построена функция механического состояния шагающей машины, позволяющая находить оптимальные законы управления методами вариационного исчисления.

Разработаны оригинальные теоретико-механические модели шагающих машин, реализованные в виде программно-алгоритмических комплексов, позволяющие осуществлять расчёт динамики движения машин, вычислять показатели качества, осуществлять оптимизацию структуры, параметров и алгоритмов управления, и работать в режиме реального времени.

Разработаны методы многокритериальной оптимизации параметров, структуры и алгоритмов управления движением шагающих машин со сдвоенными шагающими движителями, позволяющие определять структуру и параметры шагающей машины и разрабатывать алгоритмы управления её движением на этапе проектирования и эксплуатации.

Предложены методы повышения эффективности шагающих аппаратов на основе целенаправленного изменения структуры и параметров, позволяющие улучшать показатели качества машины. Эти методы использовались при разработке и управлении лабораторными образцами шагающих машин «Восьминог», «Восьминог М», «Ортоног».

Диссертация выделяется всесторонним охватом, осмыслением и классификацией типов задач, возникающих при проектировании ШМ со сдвоенными движителями.

Значимость результатов автора. В работе содержатся новые постановки задач управления ШМ со сдвоенными движителями, проведена классификация возникающих при конструировании ШМ проблем, и приведены методы их преодоления, базирующиеся на уравнениях теоретической механики, теории вариационного исчисления и выпуклой оптимизации.

Предложена и обоснована система показателей качества шагающих машин, позволяющая оценивать качество шагающих машин со сдвоенными движителями и формировать общий критерий качества при решении задач многокритериальной оптимизации. На основе системы показателей построена функция состояния шагающей машины, позволяющая находить оптимальные законы управления методами вариационного исчисления.

Разработаны теоретико-механические модели шагающих машин, реализованные в виде программно-алгоритмических комплексов,

позволяющие осуществлять расчёт динамики движения машин, вычислять показатели качества, осуществлять оптимизацию структуры, параметров и алгоритмов управления.

Разработаны методы многокритериальной оптимизации параметров, структуры и алгоритмов управления движением шагающих машин со сдвоенными шагающими движителями, позволяющие определять структуру и параметры шагающей машины и разрабатывать алгоритмы управления её движением на этапе проектирования и эксплуатации.

По работе имеются следующие замечания.

1. В работе предложен удобный для рассматриваемого класса задач способ вывода уравнений движения ШМ, основанный на формировании системы линейных уравнений относительно ускорений на базе объектно-ориентированного подхода. Однако, к сожалению, нет обсуждения по существу отличий, достоинств и недостатков подхода в сравнении с имеющимися аналогами (Верещагин, Виттенбург, Погорелов и др.), в том числе с системами автоматического составления уравнений движения (Универсальный механизм, Simmechanics, и др.).

2. Каждый из методов оптимизации движений и конструкции, предложенных в работе, обсуждается на примере модельных, зачастую очень простых задач. Диссертация сильно выиграла бы, если бы одна из глав была посвящена сквозному конструированию механизма и разработке закона управления какой-либо конкретной ШМ, решающей какую-либо прикладную задачу.

3. Для вычисления Парето-оптимальных траекторий предлагается решать уравнения Эйлера. Для нескольких несложных случаев двух критериев автор строит соответствующие множества Парето и обсуждает разумные компромиссы между критериями. При этом остался неясным вопрос, как строить экстремали уравнений Эйлера в сложных случаях, когда возможны фокальные точки, или приходится решать не задачу Коши, а двухточечную, или даже многоточечную краевую задачу.

Указанные недостатки не умаляют достоинств работы. Диссертация Малолетова является законченной научно-квалификационной работой, в которой решаются актуальные задачи теории шагающих машин. Работа написана хорошим и ясным языком, все результаты либо обоснованы, либо указаны ссылки на первоисточники.

Достоверность теоретических результатов. Методы исследования базировались на основных положениях теоретической механики, теории системного анализа, теории механизмов и машин и вариационного исчисления, и тем самым являются строгими.

Достоверность прикладных результатов проверялась по результатам экспериментов и проверкой разработанных моделей и алгоритмов на тестовых задачах, имеющих аналитические решения, и на реальных ШМ.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные

методы позволяют на этапе разработки шагающего аппарата со сдвоенными двигателями осуществлять прогноз и оценку эффективности его использования в тех или иных условиях, и целенаправленно изменять параметры для повышения эффективности машины. Эти методы использовались при разработке и управлении лабораторными образцами ШМ «Восьминог», «Восьминог М», «Ортоног».

Диссертацию в целом можно охарактеризовать как крупное научное достижение, базируясь на широте охвата материала, связанного с проектированием ШМ, и исчерпывающим анализом проблем, возникающих при управлении ШМ со сдвоенными двигателями, и их решений.

В диссертации изложены научно обоснованные математические, технические и технологические решения, внедрение которых может внести значительный вклад в развитие экономики страны и повышение ее обороноспособности.

Результаты полностью опубликованы в статьях в журналах из списка ВАК, в монографиях, в трудах международных и всероссийских конференций. Тематика и содержание работы полностью соответствуют заявленной специальности. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, критериям положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор, МАЛОЛЕТОВ Александр Васильевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук,

Профессор кафедры прикладной механики и управления

Механико-математического факультета МГУ

Болотин Юрий Владимирович

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1.

Тел-факс (495) 939-33-83

Подпись Ю.В.Болотина заверю



И.о. декана мех-мата МГУ
Профессор В.Н.Чубариков