

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Моисеева Георгия Николаевича

на тему: «Динамика и управление мобильным омни-экипажем»

по специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин»

Диссертационная работа Моисеева Г.Н. посвящена исследованию динамики мобильного устройства, перемещающегося на омни-колесах, а также построению программных движений данного устройства с учетом его динамических свойств и инерционных характеристик.

Актуальность предметной области исследований диссертационной работы обусловлена быстрым развитием мобильных робототехнических систем, построенных на базе омни-платформ, а также необходимостью применения методов математического и компьютерного моделирования на всех этапах разработки и эксплуатации современной техники. Мобильные роботы, перемещающиеся на омни-колесах, в последние годы получают все большее применение. Такие устройства отличаются высокой маневренностью, проходимостью, способностью двигаться в любом направлении без разворота корпуса. Благодаря этим свойствам они используются во многих сферах человеческой деятельности от медицины до космической отрасли. В связи с возможностью применения этих устройств в трудно доступных местах или опасных для человека условиях, возрастает потребность в создании систем автономного управления их движением. Поэтому разработка методов моделирования динамики и построения программного управления движением омни-экипажей представляет не только теоретический интерес, но также имеет важное прикладное значение.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 105 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, описаны используемые в работе методы и подходы, кратко изложено содержание диссертации и основные результаты, выносимые на защиту. Во введении также дается достаточно подробный обзор

литературы, который охватывает научные работы, посвященные построению математических моделей омни-экипажей, компьютерному моделированию их динамики, изучению стационарных движений и их устойчивости, а также разработке методов управления и построения программных движений мобильных роботов на омни-колесах.

В первой главе дано математическое описание омни-экипажа, моделируемого горизонтальной платформой с тремя омни-колёсам, которые приводятся в движение посредством электродвигателей постоянного тока. В рамках данной математической модели не учитываются инерционные свойства роликов колёс. Рассматривается движение такого устройства по горизонтальной абсолютно шероховатой плоскости. В данной главе излагаются в основном известные результаты, которые необходимы для дальнейшего исследования. В частности, здесь дается краткое описание формализма лаконичных уравнений Я.В. Татаринова, который затем применяется для получения уравнений управляемого движения омни-экипажа произвольной конфигурации. Далее приводится вид этих уравнений для омни-экипажа симметричной конфигурации и омни-экипажа с тремя параллельными колёсами. Показано, что рассматриваемая модель позволяет также учитывать вязкое трение в осях колёс.

Вторая глава посвящена исследованию устойчивости поступательных прямолинейных движений омни-экипажа с учётом инерционных свойств роликов колёс. В отличие от математической модели омни-экипажа, рассмотренной в первой главе здесь рассматривается математическая модель омни-экипажа, ролики колес которого обладают инерционными свойствами. В рамках данной математической модели получены уравнения движения экипажа. Показано, что в случае омни-экипажа с тремя параллельными колёсами уравнения движения допускают стационарные решения, которые описывают поступательные прямолинейные движения экипажа по инерции. Получены условия устойчивости таких движений по части переменных. Сделан вывод о том, что учет инерционных свойств роликов колес не оказывает влияние на выводы об устойчивости. Вместе с тем показано, что учёт инерционных свойств роликов колёс влияет на выводы о характере возмущенного движения экипажа в окрестности стационарного движения. В частности, при учете инерционных свойств роликов колёс возмущенные движения асимптотически приближаются к устойчивому стационарному невозмущенному движению. Если же инерционные свойства

роликов колёс не учитываются, то возмущенное движение в общем случае стремится к некоторому стационарному движению, которое реализуется вблизи невозмущенного движения.

В третьей главе рассматривается задача управления омни-экипажем, которая формулируется следующим образом. За наперёд заданное время необходимо переместить омни-экипаж из произвольного начального положения при произвольных начальных скоростях в заданное положение так, чтобы в конце интервала он имел заданную угловую скорость и скорость центра масс. Здесь рассматривается математическая модель, в рамках которой омни-колёса моделируются без учёта инерционных свойств роликов. Наиболее полное и строгое решение данной задачи управления получено в предположении, что омни-экипаж имеет симметричную конфигурацию. В частности, показано, что построение данного управления можно свести к последовательному решению двух систем линейных алгебраических уравнений. Строго аналитически доказано, что первая система всегда имеет единственное решение. Выводы о существовании и единственности решения второй системы сделаны на основании численного анализа. Для некоторых частных случаев существование и единственность доказана аналитически. Построен численный алгоритм, который позволяет решать аналогичные задачи управления для омни-экипажей произвольной конфигурации.

В четвертой главе в рамках математической модели, не учитывающей инерционные свойства роликов омни-колёс, получены условия движения экипажа без отрыва его колес от опорной плоскости, т.е. условий положительности нормальных реакций в точках контакта колес с плоскостью. Эти условия имеют вид неравенств, накладывающих ограничения на управляющие напряжения при заданных псевдоскоростях системы, скорости центра масс системы, угловой скорости платформы и кинетической энергии системы. Проведен анализ влияния параметров конструкции симметричного омни-экипажа на условия движения экипажа без отрыва от опорной плоскости.

В заключении кратко сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Научные результаты, вынесенные соискателем на защиту, являются **новыми** и представляют несомненный интерес для развития методов

математического моделирования динамики и построения управления движением транспортных средства на омни-колесах. Результаты диссертации обсуждались на научных семинарах, докладывались на российских и международных конференциях и были в полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Обоснованность полученных результатов гарантируется корректностью постановки задачи и строгостью применявшихся математических методов. **Достоверность** диссертационного исследования подтверждается численными экспериментами, проведенными соискателем, а также соответствием выводов, полученных в диссертации, известным результатам классических и новых работ, относящихся к исследуемой области.

К работе имеются следующие замечания.

1. В работе имеются опечатки и некоторые стилистические неточности. Так например:

- на странице 43 диссертационной работы в формулировке утверждения 2.1 не объясняется, что означают величины λ_r и ϕ_{ij} , используемые в формуле (2.20), а необходимые разъяснения даются лишь в ходе доказательства этого утверждения;
- на странице 45 диссертационной работы в формуле (2.26) имеются явные опечатки (пропущены нижние индексы у переменной ϕ), а в непрономерованной формуле в конце страницы 45 допущена опечатка в указании пределов индекса суммирования;
- используя терминологию «прямолинейные движения омни-экипажа», в главе 2, следовало бы дать разъяснение, что фактически здесь идет речь о прямолинейном движении центра масс омни-платформы.

2. В главе 2 показано, что учет инерционных свойств ролика омни-колеса влияет на финальный характер возмущенного движения. Этот интересный вывод можно было бы подкрепить более подробным и содержательным объяснением причин, влияющих на финальный характер возмущенного движения.

3. В главе 3 приводятся диаграммы (рис. 3.7а и рис. 3.7b), описывающие затраты энергии для двух типов движения. Качественно эти диаграммы выглядят одинаково. Стоило бы дать комментарии к приведенным рисункам и разъяснить, как эти диаграммы иллюстрируют различия в затратах энергии для рассматриваемых типов движения.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Таким образом, соискатель Моисеев Георгий Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, профессор РАН
Заведующий кафедрой мехатроники и теоретической механики
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»

Бардин Борис Сабирович

Подпись Бардина Бориса Сабировича заверяю

Заместитель начальника Отдела кадров МАИ _____ Иванов М.А.

Контактные данные:

тел.: _____, e-mail: _____

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.02.01 – Теоретическая механика

Адрес места работы:

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4., ФГАОУ ВО «Московский
авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
кафедра «Мехатроника и теоретическая механика»

тел.: +7(499)158-44-66, e-mail: bardinbs@mai.ru