

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию 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**

Текст диссертации состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы.

Во введении даётся общая характеристика работы, в том числе обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, излагается краткое содержание диссертации, производится обзор литературы.

Глава 1 посвящена получению уравнений динамики мобильного экипажа с тремя произвольно расположенными омни-колёсами произвольного типа без учёта реальной геометрии и инерционности роликов.

Приведён вывод компактной формы уравнений движения неголономных механических систем в псевдоскоростях, предложенной Я.В. Татариновым. Указанные уравнения использовались для получения модели омни-экипажа с тремя омни-колёсами без учёта инерционности и реальной геометрии роликов. В качестве псевдоскоростей использовались проекции скорости центра масс экипажа на подвижные оси платформы и угловая скорость платформы с нормирующим множителем (корень квадратный из момента инерции экипажа). Управляющие моменты линейно зависят от напряжений на электродвигателях и скорости вращения колёс (из-за протого-ЭДС). Как частные случаи, получены уравнения движения симметричного экипажа с ортогональными («классическими») омни-колёсами и экипажа с двумя параллельными задними омни-колёсами. Показано, что учёт линейного по скоростям трения на осях колёс не приводит изменению структуры уравнений движения.

Глава 2 посвящена исследованию устойчивости прямолинейных движений омни-экипажа с двумя параллельными задними колёсами с учётом инерционности роликов переднего колеса при отсутствии трения на осях колёс и их роликов.

Приведена сводка результатов по исследованию стационарных движений указанной системы без учёта инерционности роликов, полученных Я.В. Татариновым и А.А. Зобовой. Получены уравнения динамики омни-экипажа с учётом геометрии и инерционности роликов переднего колеса. Проведено исследование устойчивости стационарного движения – продольного поступательного равномерного перемещения платформы. Показано, что движение центром масс вперёд устойчиво, центром масс назад – не устойчиво. Проведено математическое моделирование, иллюстрирующее устойчивость стационарного движения и характер переходных процессов (для случаев безынерционной модели переднего колеса и с учётом инерции его роликов).

В дополнение к главе приводятся вывод уравнений динамики экипажа с учётом линейного трения на осях колёс и роликов.

Глава 3 посвящена исследованию управления трёх колёсного омни-экипажа по схеме «разгон-торможение». Цель управления – привести экипаж из заданного начального состояния в заданное целевое состояние за фиксированное время. Управляющие напряжения ищутся в виде кусочно-постоянных функций времени с одним наперёд заданным моментом переключения.

Основное внимание уделено решению поставленной задачи управления симметричным омни-экипажем (как начальному приближению решения для экипажа с произвольным расположением колёс). Приводится аналитическое решение уравнений динамики симметричного экипажа при постоянных напряжениях на двигателях: угол поворота платформы определяется интегрированием независимого линейного ОДУ, а скорости центра масс – методом компресии (переходом к комплексной переменной, по смыслу совпадающим с перепроектировкой скоростей на неподвижные оси, сопровождающуюся уничтожением гироскопических членов в (3.5)-(3.6)).

Точное решение ДУ динамики экипажа использовано для аналитического решения краевой задачи терминальным управлением экипажем с одним одновременным переключением всех управляющих напряжений. Проведено исследование энергопотребления для частных случаев. Для поворота экипажа на заданный угол определено оптимальное время переключения. Установлено, что при

поступательном перемещении экипажа в заданную точку энергозатраты определяются только расстоянием до целевой точки. Проведён сравнительный анализ энергозатрат при полученной стратегии управления и двухэтапной стратегии, подразумевающей сначала поворот на заданный угол, а затем – перемещение в целевую точку.

Для трёхколёсного омни-экипажа с произвольным расположением колёс предложен численный итерационный алгоритм решения поставленной задачи управления, сводящийся к численному решению системы неявных нелинейных уравнений относительно управляющих напряжений. Начальное приближение – закон управления для симметричного экипажа. Далее происходит изменение геометрических параметров экипажа с постепенным переходом к заданной геометрии. Краевая задача решается методом пристрелки с использованием метода Рунге-Кутты 8 порядка для решения ОДУ и методом Ньютона для решения неявного нелинейного уравнения. В качестве примера рассмотрен случай экипажа с двумя параллельными задними колёсами.

Глава 4 посвящена исследованию условий безотрывного движения трёхколёсного омни-экипажа с произвольным расположением колёс. Из общих теорем динамики получены аналитические выражения для нормальных реакций опор при движении по горизонтальной плоскости. Получены условия безотрывного движения экипажа (система трёх неравенств относительно управляющих напряжений и псевдоскоростей), а также достаточное условие, сформулированное в виде ограничения на сумму квадратов управляющих напряжений. Проведён анализ безотрывности движения колёс экипажа в частных случаях.

Список литературы содержит 105 источников из них 87 – научные работы.

В качестве **приложения** к диссертации можно рассматривать репозиторий <https://github.com/DifferentialOrange/omni-vehicle-dynamics-control>, включающий в себя программы, разработанные соискателем для выполнения математического моделирования движения омни-робота для иллюстрации результатов исследований в главах 2–4.

Актуальность тема диссертационного исследования обусловлена широким использованием омни-колёс для создания мобильных роботов для движения в стеснённой среде по подготовленной поверхности (например, в сфере складской логистики), создания новых специализированных транспортных средств; плохой разработанностью некоторых вопросов, таких как влияние инерции опорных роликов колёс и реальной геометрии роликов на движение системы в целом, исследование отрыва колёс омни-экипажей, выходящее за рамки статики.

Достоверность и обоснованность положений, выносимых на защиту, обеспечивается:

- для положения 1 – корректным применением аппарата аналитической механики неголономных систем (уравнения Я.В. Татаринова) для вывода уравнений динамики омни-экипажа с учётом инерционности ролика переднего колеса; методов теоретической механики для получения кинетической энергии системы и анализа работы активных сил; аппарата исследования устойчивости по первому приближению с использованием матричной алгебры;
- для положения 2 – корректным применением аппарата аналитического решения линейных ОДУ с переменными коэффициентами; аппарата решения СЛАУ для краевой задачи синтеза управления;
- для положения 3 – корректным применением общих теорем динамики материальной системы для получения уравнений для нормальных реакций опор; методов решения систем неравенств; аппарата матричной алгебры.

Достоверность других основных результатов работы обеспечивается по тем же причинам.

Достоверность полученных результатов также иллюстрируется численным моделированием, проведённым с использованием метода Дормана-Принса с автоматическим выбором шага для решения ОДУ, метода LU-разложения для решения СЛАУ, методов Ньютона и продолжения по параметру с контролем шага для решения нелинейных систем уравнений.

В рамках работы получены следующие **новые научные результаты**:

- уравнения динамики трёх колёсных омни-экипажей с учётом инерционности и геометрии роликов, трения на осях колёс и роликов; анализ устойчивости одного класса стационарных движений омни-экипажа (развитие научных результатов Я.В. Татарина, А.А. Зобовой);
- аналитическое решение краевой задачи терминального управления симметричным трёхколёсным омни-экипажем с кусочно-постоянными напряжениями (с одним единовременным переключением) на основе точного решения уравнений динамики (развитие научных результатов Ю.Г. Мартыненко и А.М. Формальского);
- итерационный алгоритм решения краевой задачи терминального управления трёхколёсным омни-экипажем с произвольной геометрией с кусочно-постоянными напряжениями (с одним единовременным переключением);
- точные условия безотрывного движения трёхколёсного омни-экипажа с произвольной геометрией, а также достаточные условия неопрокидываемости, сформулированные в виде ограничения на 2-норму вектора управляющих напряжений, и разработанный на их основе алгоритм исследования движения экипажа.

В рамках выполнения исследования соискатель решил несколько комплексных задач исследования и синтеза движения омни-экипажей, продемонстрировав владение методами динамики многозвенных систем, аналитической динамики неголономных систем, методов исследования устойчивости движения, матричной алгебры, аналитической геометрии, методов численного моделирования динамических систем.

Отмечу следующие **недостатки** диссертационной работы:

- 1) Недостаточный обзор источников по задачам управления системами с омни-колёсами с кусочно-постоянными управляющими воздействиями или

релейным управлением (как, например, в задаче оптимального по быстродействию управления).

- 2) Постановка задачи в главе 2 представляется надуманной. Рассматривается трёхколёсный омни-экипаж, но инерционность роликов учитывается только на одном (переднем) колесе. Рассматривается прямолинейное движение, на котором переключение роликов переднего колеса не происходит. Т.е. в рассматриваемом случае задние омни-колёса функционируют «почти», как обычные. (Результаты исследования устойчивости такого стационарного движения также аналогичны случаю прямолинейного движения тележки с дифференциальным приводом.) Диссипативные силы – трение на осях колёс и роликов – при анализе устойчивости игнорируются, хотя они вносят существенный вклад (как можно судить по исследованию механум-платформы youBot с экспериментально оцененными коэффициентами трения [54, 55]).
- 3) В главе 3 в постановке задачи управления не учтены объективные ограничения на величины управляющих напряжений. Для рассматриваемой схемы управления с фиксированным временем движения и заданным временем переключения ограничения на управляющие напряжения приводят к ограничению области достижимости из заданного начального состояния (т.е. целевое состояние не может задаваться произвольно). При проведении математического моделирования использовались параметры шасси с омни-колёсами [1, 100], оснащённого двигателями постоянного тока с номинальным напряжением 12 В. Анализ максимальных напряжений (рисунок 3.8) показывает о необходимости подачи 10 000 – 100 000 В на двигатели в определённых случаях.
- 4) Главы 3 и 4. Гипотеза о движении по абсолютно шероховатой поверхности (т.е. заведомого непревышения контактными силами трения максимальной величины) является необоснованной. При отсутствии ограничений на управляющие напряжения моменты двигателей могут быть сколь угодно

большими, т.е. может достигаться максимальная величина контактной силы трения, что приведёт к проскальзыванию.

- 5) В параграфе 3.4.5 рассматриваются примеры движений экипажа с целевым изменением угла курса более чем на один полный оборот. Практическая целесообразность такого движения подлежит сомнению.
- б) Не указаны условия применимости теоремы 4.2. Происходит сравнение неотрицательной величины $\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2}$ со знакопеременной величиной в правой части неравенства (4.45). Аналогичное замечание справедливо для следствий 4.2 (4.58), 4.3 (4.59).
- 7) В следствиях 4.7, 4.8 используется рубежное значение кинетической энергии. Какой порядок имеет её величина, и каким величинам псевдоскоростей она соответствует?
- 8) В главе 4 отсутствует анализ отрыва колёс для следующих практически важных частных случаев движения:
 - а. разгон из неподвижного состояния с постоянными напряжениями;
 - б. торможение с резкой сменой управляющих напряжений;
 - с. прохождение поворота.

Отмечу, что первые два вида движения используются в главе 3 для синтеза терминального управления. Анализ нормальных реакций для движений, рассмотренных в главе 3, также отсутствует.

- 9) Формула для g_1^N (стр. 106, снизу), возможно, содержит опечатки. Судя по формуле, скаляр g_1^N равен произведению скаляра на матрицу.

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:

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Адамов Борис Игоревич

Контактные данные:

тел.:

e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.02.01 Теоретическая механика

Адрес места работы:

111250, Россия, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово,
ул. Красноказарменная, д.14, стр.1

НИУ «МЭИ», кафедра робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин
Тел.: +7 (495) 362 77 19; e-mail: AdamovBI@mpei.ru

Подпись сотрудника

НИУ «МЭИ» Б.И. Адамова удостоверяю:

Заместитель начальника управления
по работе с персоналом

Л.И. Полевая