

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального государственного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр Институт  
прикладной математики им. М.В. Келдыша  
Российской академии наук», член-корреспондент РАН

А.И. Аптекарев



2023 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики  
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Диссертация «Построение трехосного магнитного управления ориентацией космических аппаратов с использованием метода роя частиц» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», отдел № 7. «Динамика космических систем».

В период подготовки диссертации соискатель Охитина Анна Сергеевна работала в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», отдел №7, младший научный сотрудник (с 2019 года).

В 2017 г. окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет) г. Москва» по специальности 03.03.01 Прикладные математика и физика, диплом бакалавра серия 107724 2779059 № 17407058 от 15.07.2017.

В 2019 г. окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) г. Москва» по специальности 03.04.01 Прикладная математика и физика, диплом магистра с отличием серия 107724 3408309 № 19607086 от 16.07.2019.

Кандидатские экзамены сданы в Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) г. Москва».

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, доцент Ткачев Степан Сергеевич работает в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», отдел 7, старший научный сотрудник.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертационная работа Охитиной Анны Сергеевны «Построение трехосного магнитного управления ориентацией космических аппаратов с использованием метода роя частиц» посвящена разработке и всестороннему исследованию новой методики построения управляемого углового движения космического аппарата (КА), оснащенного только магнитной системой управления ориентацией (МСО). Построение системы управления ориентацией только на основе токовых катушек позволит значительно снизить расходы, а также обеспечит длительный срок службы аппарата за счёт износостойкости магнитных исполнительных органов. Данная задача является в настоящий момент особенно актуальной, так как возникает необходимость внедрения менее дорогих, но не менее эффективных малых космических аппаратов для обеспечения возможности доставлять в космос и отрабатывать передовые технологии как можно быстрее и надежнее. Такие аппараты позволят расширить круг задач, решаемых с помощью правильного построения управления. В связи с этим встает вопрос о построении законов

управления, которые позволят добиться приемлемой точности ориентации для типовых задач трехосной стабилизации – инерциальной и орбитальной – используя при этом только магнитные катушки. Практическая значимость работы также подтверждается участием соискателя в производственных работах с ведущими предприятиями отечественной промышленности, в том числе выполнении контрактов с ООО «Спутниковые инновационные космические системы», выполнения госзадания Министерства науки и высшего образования РФ темы FFMN-2022-0006, а также грантов РФФИ №17-71-20117, РФФИ №22-71-10009.

Перед тем, как использовать управление на борту спутника, необходимо тщательное исследование и математическое моделирование его работы. В первую очередь, автор изучил результаты и достижения в области магнитного управления спутниками. В рамках обзора и последующего исследования автор следует требованиям, установленным пунктом 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней от 24.09.2013 г. № 842. Автор приводит и обосновывает логику формирования нового закона управления, который включает в себя два основных этапа – построение вспомогательного опорного движения и поиск коэффициентов управления, обеспечивающих асимптотическую устойчивость построенного движения. Для формализации задачи на каждом этапе проводится математический анализ поведения линейной неоднородной системы дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами, описывающей движение КА в окрестности целевой ориентации (инерциальной или орбитальной). Автор хорошо демонстрирует умение формализовать задачу, исследовать преимущества выбора конкретных целевых функций, показывает важность проведения такого исследования, а также влияния формализации на итоговое решение задачи, что является одним из главных и ключевых моментов исследования. Для решения задач оптимизации с выбранными целевыми функциями автор использует метод роя частиц, подробное исследование

работы и настройка параметров которого для конкретных задач также приведены и рассмотрены в полной мере.

Далее автор проводит детальное исследование и математическое моделирование работы закона управления при наличии внешних возмущений. Получена методика поиска оптимальных параметров для дипольной модели геомагнитного поля, лучше соответствующего реальному полю на некотором заданном промежутке времени. Также предложены процедуры, уменьшающие влияние возмущений на итоговую точность ориентации: автоматический «сдвиг» коэффициентов усиления управления в области устойчивости и процедура построения дважды непрерывно-дифференцируемого опорного движения – «склейка». С использованием этих процедур автору удастся улучшить точность итоговой ориентации в несколько раз по сравнению с известными методиками построения управления для КА с МСО.

Приняв в качестве примера стабилизацию в инерциальной, орбитальной и «косой» орбитальной ориентациях, А.С. Охитина проводит математическое моделирование динамики аппарата с помощью разработанной методики построения управляемого углового движения КА с МСО. Для каждого случая проведен статистический анализ, подтверждающий работоспособность методики и хорошую итоговую точность ориентации при наличии возмущений. Тем самым результат, полученный в рамках аналитического исследования, дополняется численным моделированием с использованием уточненных моделей внешней среды и возмущений, действующих на аппарат.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обоснована корректным использованием методов теоретической механики, теории управления, методов оптимизации. Строгие аналитические выкладки, а также оценки предельно допустимой точности ориентации согласуются с численными вычислениями и подтверждаются численным моделированием и сравнением с результатами других авторов.

Основные результаты докладывались на ведущих отечественных и зарубежных конференциях:

1. Международная конференция «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления», 3-5 июня 2020 г, Москва, ИПУ РАН, Россия.
2. 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 23-29 ноября 2020 г, Москва, Россия.
3. XLV Академические чтения по космонавтике, 30 марта – 2 апреля 2021 г, Москва, Россия.
4. 72-й Международный Астронавтический Конгресс (72nd International Astronautical Congress, IAC), 25-29 октября 2021, Дубай, ОАЭ.
5. XLVI Академические чтения по космонавтике, 25-28 января 2022 г, Москва, Россия.
6. XLVII Академические чтения по космонавтике, 24-27 января 2023 г, Москва, Россия.
7. Конференция молодых ученых ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 24 марта 2023 г, Москва, Россия.

Диссертационное исследование обсуждалось на следующих семинарах:

1. Семинар «Динамика космических систем» отдела №7 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (под рук. М.Ю. Овчинникова).
2. Семинар по прикладной механике и управлению НИИ механики МГУ (под рук. В.В. Александрова, Н.А. Парусникова, Ю.В. Болотина).
3. Научный семинар ИПМех РАН «Теория управления и динамика систем» (под рук. академика Ф.Л. Черноушко).
4. Научный семинар «Механика и управление движением космических аппаратов» Баллистического центра ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (под рук. А.Г. Тучина).
5. Семинар отдела механики ФИЦ «Информатика и управление» РАН (под рук. проф. С.Я. Степанова).
6. Семинар «Динамические системы и механика» МАИ (под рук. Б.С. Бардина, П.С. Красильникова).
7. Научный семинар АО «Корпорация «ВНИИЭМ» «Вопросы электромеханики»» (под рук. В.Я. Гечи).

8. Научный семинар кафедры теоретической механики МФТИ (под рук. С.В. Соколова).
9. Семинар отдела №5 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (под рук. проф. Ю.Ф. Голубева).

Результаты, полученные в работе, в полной мере доведены до научной общественности в рамках 6 работ, из них 4 – журнальные статьи, индексируемые в базах данных Scopus и/или Web of Science, 2 – конференционные статьи в сборниках трудов конференций, индексируемые в базах данных Scopus и/или Web of Science:

1. A. Okhitina, S. Tkachev, D. Roldugin, Comparative cost functions analysis in the construction of a reference angular motion implemented by magnetorquers, *Aerospace*, 2023, 10(5), paper 468. WoS, Scopus, Q1.
2. A. Okhitina, D. Roldugin, S. Tkachev, M. Ovchinnikov, Academy transaction note “closed form solution for a minimum deviation magnetically controllable satellite angular trajectory”, *Acta Astronautica*, 2023, 203, p. 60–64. WoS, Scopus, Q1.
3. A. Okhitina, D. Roldugin, S. Tkachev, Application of the PSO for the construction of a 3-axis stable magnetically actuated satellite angular motion, *Acta Astronautica*, 2022, 195, p. 86–97. WoS, Scopus, Q1.
4. A. Guerman, D. Ivanov, D. Roldugin, S. Tkachev, and A. Okhitina. Orbital and Angular Dynamics Analysis of the Small Satellite SAR Mission INFANTE, *Cosmic Research*, 2020, 58(3), p. 206–217. WoS, Q4.
5. A. Okhitina, D. Roldugin, S. Tkachev. Magnetically controllable attitude trajectory constructed using the particle swarm optimization method // 72nd International Astronautical Congress (IAC), 2021, 9 p. Scopus (конф.).
6. A. Okhitina, D. Roldugin, S. Tkachev. Biologically inspired optimization algorithm in satellite attitude control problems // 15th International Conference on Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference) (STAB), 2020, p. 1-3. WoS (конф.).

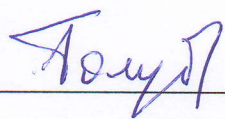
Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Все приведенные в диссертации результаты получены автором лично.

Диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к диссертации кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин и соответствует паспорту специальности (ПС) по ряду направлений. При анализе уравнений движения используются методы аналитической механики (направление 1 ПС), механики твердого тела (направление 6 ПС), динамики космических аппаратов (направление 10 ПС). Возможность применения предложенного стабилизирующего закона управления КА опирается на методы теории устойчивости (направление 2 ПС). Для верификации моделей и алгоритмов управления проводилось математическое и компьютерное моделирование кинематики и динамики (направление 14 ПС) КА с МСО.

Диссертация «Построение трехосного магнитного управления ориентацией космических аппаратов с использованием метода роя частиц» Охитиной Анны Сергеевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин.

Заключение принято на заседании семинара «Механика и управление движением» (семинар отдела №5 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН). Присутствовало на заседании 18 чел., в том числе 5 докторов наук по специальности, соответствующей тематике диссертации. Выступили с положительной оценкой диссертации: д.ф.-м.н. проф. В.В. Сидоренко, д.ф.-м.н. проф. М.Ю. Овчинников, д.ф.-м.н. проф. Ю.Ф. Голубев.

Результаты голосования: «за» – 18 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 61 от 29 июня 2023 г.



Ю.Ф. Голубев, д.ф.-м.н., профессор,  
г.н.с. отдела №5, и.о. заведующего  
отделом, руководитель семинара

« 4 » июня 2023 г.