

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА А.А.БУРОВА

на работу Охитиной Анны Сергеевны

«Построение трехосного магнитного управления ориентацией космических аппаратов с использованием метода роя частиц»,
представленную в качестве диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин

Актуальность темы диссертации. В эпоху резкого роста применения малых и сверхмалых спутников для исследования космического пространства возрастает важность разработки эффективных методов управления их ориентацией. Малость размеров и ограниченность по массе таких спутников диктуют необходимость применения средств, отличающихся от использования гироскопических систем, для решения задачи управления ориентацией. Как оказалось, средства, опирающиеся на использование магнитных взаимодействий, являются эффективной заменой классическим. Исследование особенностей их функционирования требует тщательного анализа математических моделей, используемых при их описании. Настройка таких моделей, в свою очередь, опирается на решение сложных, многопараметрических задач оптимизации. Рассмотрение возникающего множества задач в совокупности составляет основную тему диссертации, чем и обусловлена её несомненная актуальность.

Структура и содержание работы. Диссертация изложена на 116 страницах и состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 90 наименований, и приложений. Результаты диссертационной работы в полной мере отражены в 6 печатных работах, 4 из них – статьи в журналах, индексируемых в Scopus и/или Web of Science, 2 – статьи в сборниках трудов конференций, индексируемых в базах данных Scopus и/или Web of Science.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, излагается цель работы и положения, выносимые на защиту. Там же обосновываются научная новизна и практическая значимость выполненных исследований, рассказывается об апробации результатов, предьявляется список работ, опубликованных автором, выделяется личный вклад автора в полученные результаты, подтверждается соответствие диссертации паспорту специальности и приводится краткое содержание.

Первая глава посвящена построению алгоритма магнитного управления трёхосной ориентацией космического аппарата. Выписываются уравнения

движения, описываются моменты, действующие на космический аппарат: гравитационный, аэродинамический и магнитный моменты, а также ограничения на использование магнитных моментов для управления ориентацией. Обсуждаются известные подходы к моделированию внешнего магнитного поля. Описывается подход к отысканию коэффициентов, возникающих в выражениях для управляющих воздействий. Так как для отыскания таких коэффициентов используется так называемый «метод роя частиц», известный из теории глобальной оптимизации, в разделе 1.7 осуществляется краткое изложение этого метода, приводятся соображения по выбору присутствующих в нём настроечных коэффициентов. Далее, метод роя частиц применяется сначала для отыскания так называемого опорного движения, на котором проекция управляющего момента на направление вектора магнитной индукции Земли минимальна, а затем — для отыскания оптимальных коэффициентов в выражении для управляющих воздействий, обеспечивающих асимптотическую устойчивость. Приводятся примеры опорных движений для высот орбит в 550 км и 650 км соответственно.

Вторая глава посвящена вопросам управления ориентацией космического аппарата при наличии возмущений. Рассматривается чувствительность получаемых результатов

- к различию моделей геомагнитного поля, используемых при построение опорного решения и при численном моделировании,
- к разбросу параметров тензора инерции космического аппарата,
- к вариациям параметров в модели взаимодействия космического аппарата с атмосферой,
- к неучтённым случайным возмущающим моментам.

Указываются возмущения, влияющие только на итоговую точность ориентации, и возмущения, влияющие как на итоговую точность ориентации, так и на устойчивость движения. Поскольку так называемые опорные движения строятся отдельно на последовательности примыкающих друг к другу временных интервалов, то в моменты перехода от одного интервала к другому они, вообще говоря, терпят разрывы второго рода. Поскольку такое поведение опорных решений, вообще говоря, считается недопустимым, предлагается так называемая процедура «склейки», позволяющая добиться построения опорного решения, непрерывно-дифференцируемого по времени.

Также во второй главе рассматривается влияние возмущений на устойчивость требуемого движения и на общую точность ориентации сопутствующей системы координат относительно целевой системы координат. Согласно результатам первой главы, найденные коэффициенты в выражениях управляющих воздействий обеспечивают асимптотическую устойчивость изучаемого движения, такую, что все собственные числа матрицы монодромии по абсолютной величине меньше единицы. Однако коэффициенты управляющих воздействий при наличии возмущений могут оказаться таковы, что означенные собственные могут оказаться вне области устойчивости, то есть

хотя бы некоторые из упомянутых неравенств на собственные значения окажутся невыполненными. Автором предложена эмпирически разработанная процедура «сдвига», опирающаяся на дополнительное исследование матрицы монодромии: на каждом шаге работы роевого алгоритма вычисляется максимальное по абсолютной величине собственное значение матрицы монодромии и отслеживается условие его минимума в области устойчивости.

Третья глава посвящена адаптации методов, развитых в первых двух главах, к трём типовым режимам движения космического аппарата, среди которых

- орбитальная ориентация в положении относительного равновесия, неустойчивом под действием гравитационного и центробежного моментов;
- «косая» орбитальная ориентация, когда одна из осей направлена не по нормали к плоскости орбиты;
- инерциальная ориентация.

В качестве примера рассмотрен космический аппарат типа кубсат. Для него осуществлена оценка гравитационного и аэродинамического моментов, показавшая необходимость принимать во внимание оба этих момента в первых двух постановках задачи и возможность пренебречь аэродинамическим моментом в третьем случае. Предъявлены 16 целевых функций, используемых в дальнейшем для решения оптимизационных задач при поиске параметров дипольной модели и параметров опорного движения. Для различных возмущений тензора инерции вычисляются углы максимального (на определённых временных промежутках) отклонения от опорного движения. Для иллюстрации отклонений при всех обследованных режимах движения используются так называемые коробчатые диаграммы, также известные в математической статистике как «ящички с усами». В численном эксперименте предполагается, что погрешность знания состояния атмосферы составляет 20%, вариации параметров тензора инерции оцениваются в 5%. Время моделирования принимается равным 18 виткам. Установлено, что точность ориентации в несколько раз лучше, чем получается при иных подходах. Полученные графические представления статистических данных предоставляют возможность статистического исследования применяемых целевых функций.

Наконец, на примере «косой» орбитальной ориентации продемонстрированы важность и целесообразность применения операций по «улучшению параметров», предложенных в первой и второй главах.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

В приложениях содержатся подробные аналитические выкладки, дополняющие и обосновывающие некоторые аспекты основной части текста работы.

Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

Научная новизна результатов работы: полученные результаты новы и строго обоснованы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных методов теоретической механики и механики космического полёта, математической теории управления, теории оптимизации и математической статистики. Она подтверждена публикацией результатов в рецензируемых журналах мирового уровня и их обнародованием на научных семинарах и конференциях.

На несомненную *практическую значимость* полученных результатов указывает не только общая тенденция использования спутников с магнитной системой ориентации, но и наличие сотрудничества с упоминаемыми в тексте конкретными организациями, занимающимися данным кругом вопросов.

Замечания. По диссертации можно сделать следующие замечания:

- 1) Автором вводятся понятия «линейная окрестность» (стр. 49) и «геометрический центр области устойчивости» (стр.68), смысл которых непонятен.
- 2) На стр. 23 автор пишет: «... с помощью токовых катушек вдоль вектора геомагнитной индукции невозможно выдать компоненту механического момента (Рис.4)». Слово «выдать» в этой фразе выглядит как элемент жаргона, которого в печатных текстах всё же лучше избегать.
- 3) В списке литературы в позициях [20,23,24] автор почему-то ссылается на переводные версии статей, опубликованных в журнале «Космические исследования», а не на оригинал.

Указанные недостатки не влияют на общее положительное впечатление от диссертации. Работа выполнена на высоком научном уровне, аккуратно оформлена. Текст оснащён цветными иллюстрациями, способствующими пониманию материала.

Заключительные выводы. Диссертационная работа и автореферат А.С. Охитиной по содержанию и представленным результатам *соответствуют* паспорту специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин». Диссертация и автореферат логичны по своей структуре. Материалы изложены современным грамотным научным русским языком. Полученные результаты новы и строго обоснованы с помощью классических и современных методов теоретической механики и механики космического полёта, математической теории управления, теории оптимизации и математической статистики.

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа А.С.Охитиной «Построение трехосного магнитного управления ориентацией космических аппаратов с использованием метода роя частиц» является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ к кандидатским диссертациям (пп. 9-11,13,14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013) на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин». Автор диссертации, Анна Сергеевна Охитина, несомненно заслуживает присуждения ей искомой ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук

(специальность 01.02.01 – «Теоретическая механика»),

доцент, ведущий научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», отдел 24

профессор кафедры высшей математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

Александр Анатольевич Буров

119333, Москва, Вавилова, д.44, кор.2

E-mail: jtm@yandex.ru

Тел: +7 (499) 135-35-90

«05» октября 2023 г.

А.А. Буров

