

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Оливио Адилсон Педро
на тему: «Метод расчета маневров малого космического аппарата, оснащенного
двигателями малой тяги»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных
аппаратов

Диссертация А.П. Оливио «Метод расчета маневров малого космического аппарата, оснащенного двигателями малой тяги» посвящена решению различных задач, связанных с механикой полета космических аппаратов (КА), оснащенных двигателями малой тяги. Целью диссертационного исследования является разработка методов и алгоритмов расчета параметров маневров малого космического аппарата (МКА), оснащенного двигателями малой тяги.

В настоящее время возрастает интерес к разработке методов расчёта манёвров МКА, оснащённых двигателями малой тяги, с целью решения как научно-исследовательских, так и прикладных задач. С увеличением количества космических миссий и усложнением их задач возрастает потребность в совершенствовании подходов к планированию и выполнению манёвров МКА.

К числу характерных задач, требующих разработки более точных и эффективных методов расчёта, относятся: сближение и стыковка космических аппаратов, находящихся на околокруговых орбитах; организация групповых полётов нескольких МКА; формирование заданной конфигурации спутниковых систем; удаление космического мусора; техническое обслуживание орбитальных объектов, а также другие миссии, включающие взаимодействие между несколькими КА.

Несмотря на достигнутые успехи, рассматриваемая тематика остаётся актуальной и требует дальнейшего развития. Возникают новые вызовы, обусловленные усложнением архитектуры миссий, необходимостью учёта различных возмущений, влияющих на движение МКА, ограничениями в работе двигательных установок, а также активным развитием новых технологий создания двигателей и систем управления. В этих условиях задачи оптимального планирования манёвров, минимизации расхода топлива и повышения точности управления становятся особенно актуальными и требуют дальнейших исследований в данной области.

Актуальными являются теоретические исследования, направленные на:

- расширение области применения электроракетных двигательных установок (ЭРДУ) в современных и перспективных космических проектах;
- дальнейшее развитие механики космических полетов МКА в окрестности круговой орбиты;
- разработку алгоритмов, решающих задачи оптимизации и проектирования траекторий МКА с ЭРДУ для использования при полетах реальных МКА;
- разработку методов и алгоритмов, позволяющих добиться оптимальности решения задач, упростить процессы расчета параметров маневров и повысить надежность этого процесса;
- углубление исследований по оптимизации маневров МКА с ЭРДУ для решения

проблем космического мусора;

- расчет маневров МКА непосредственно на борту МКА в связи с резким увеличением числа маневрирующих МКА.

Научная новизна и практическая значимость исследования

В диссертации А.П. Оливио представлены результаты, обладающие научной новизной и имеющие практическую значимость:

- получено новое аналитическое решение задачи оптимизации траектории КА с идеально регулируемым двигателем ограниченной мощности (ИРОМ-двигателем), при наличии ограничений на ориентацию двигательной установки (ДУ) МТ;
- получено новое численное решение задачи оптимизации траектории КА с ИРОМ-двигателем, при наличии ограничений на ориентацию ДУ МТ для проверки аналитического решения задачи с ограниченной мощностью (ОМ-задачи);
- получено новое численное решение задачи оптимизации траектории КА, оснащенного двигателем ограниченной тяги и постоянной скоростью истечения (ОТСИ-двигателем), при наличии ограничений на ориентацию ДУ МТ;
- разработан алгоритм решения компланарной и некомпланарной задачи встречи, выполняемой КА при импульсной модели маневров;
- разработан алгоритм решения компланарной и некомпланарной задачи встречи, выполняемой КА, оснащенным двигателем МТ;
- разработан алгоритм решения компланарной и некомпланарной задачи встречи КА при фиксировании части маневров.

Практическая значимость полученных А.П. Оливио результатов определяется следующими факторами:

- возможностью использования полученных аналитических решений для проектно-баллистического анализа перспективных КМ, формирования алгоритмов управления относительным движением КА, в качестве начального приближения для решения задач оптимизации траекторий КА с двигателями ограниченной тяги и постоянной скоростью истечения;
- необходимостью использования канальных управлений для решения задач, обусловленных ограниченными возможностями системы управления, требованиями к обеспечению радиосвязи или взаимной видимости сближающихся КА, а также по другим причинам;
- сокращением значительного времени, требующегося для выполнения сложных маневров, что позволит ускорить выполнение масштабных расчетов на этапе концептуального проектирования новых КА благодаря внедрению современных вычислительных методов;
- обеспечением высокой устойчивости при решении задач и достижение требуемой точности при формировании заданных орбит. Этот аспект имеет ключевое значение для баллистического сопровождения реальных миссий КА, основывающегося на современных математических и вычислительных основах;
- на борту таких КА могут быть внедрены специализированные алгоритмы

управления движением и маневрами, основанные на предложенных численно-аналитических решениях, что позволит проводить адаптивную корректировку орбиты в реальном времени, что особенно важно для долгосрочных миссий с меняющимися целями или условиями эксплуатации, таких как спутники дистанционного зондирования, навигационные системы и спутниковые группы.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов

Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлена:

- 1) численно-аналитическим моделированием, проведенным с использованием различных математических моделей движения, что позволяет всесторонне оценить точность и устойчивость решения при изменении исходных данных и параметров;
- 2) сравнением с альтернативными методами и результатами других авторов.

Краткая характеристика основного содержания диссертации

Диссертация А.П. Оливьо состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во **введении** обосновывается актуальность исследования, определяются цель работы, подчеркивается научная новизна и практическая значимость достигнутых результатов. Кроме того, приводится краткая характеристика структуры исследования.

В **первой главе** автор представляет математические модели, описывающие движение КА вблизи круговой орбиты, а также вывод и решение линеаризованной системы уравнений HCW. Автор проводит сравнение аналитических и численных решений данной системы уравнений, вводит линеаризованные уравнения, предложенные П.Е. Эльясбергом, с подробным выводом и их решением. А.П. Оливьо рассматривает задачи оптимального управления относительным движением КА вблизи круговой орбиты с учетом использования двигателя с ограниченной мощностью и ограниченной тяги. Рассматриваются два случая: при наличии всех составляющих вектора реактивного ускорения (трехканальное управление) и без радиального составляющего реактивного ускорения (двухканальное управление) для двух моделей движения. Вводится постановка задачи минимизации функционала для обеих задач.

Во **второй главе** рассматриваются различные методы решения краевой задачи (КЗ) оптимального управления. Приводятся различные методы: аналитические, численные и численно-аналитические для решения задачи оптимизации траекторий КА с малой тягой. Применяется принцип максимума Понтрягина, чтобы свести задачу оптимального управления к КЗ для системы линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами граничными условиями. Вводятся аналитический метод решения ОМ-задачи и численный метод продолжения по параметру на основе Ньютоновской гомотопии между искомой системой нелинейных уравнений и системой нелинейных уравнений с заранее известным решением. Этот метод преобразует КЗ для рассматриваемой системы ОДУ задачу Коши, при этом необходимо интегрировать вложенные системы ОДУ.

В **третьей главе** приводятся постановка задачи перехода и встречи КА, алгоритмы решения задачи перехода между компланарными орбитами и импульсной

задачи встречи КА, алгоритмы решения задачи с малой тягой. Алгоритмы расчета параметров маневров КА позволяют получить практически оптимальное решение задачи встречи, если начальная фаза находится в пределах оптимального фазового диапазона, а суммарная характеристическая скорость (СХС) решения задачи встречи совпадает с СХС оптимального решения задачи перехода. Это также верно в случае, когда маневры выполняются с использованием двигателей малой тяги. Приводится алгоритм решения задачи встречи при фиксировании части маневров, который позволяет сократить продолжительность импульсов, ограничивая их величину до такого уровня, при котором они еще максимально изменяют величину эксцентриситета (на 180 градусов).

В четвертой главе приводятся алгоритмы решения задачи перехода между некомпланарными орбитами, задачи встречи КА на некомпланарных орбитах и импульсной некомпланарной задачи встречи КА. Применяется универсальный метод, чтобы решить задачу переходов. Вводится алгоритм расчета параметров маневров КА, который эффективно позволял получать оптимальные решения задачи встречи в двух случаях: когда начальная фаза находится в оптимальном фазовом диапазоне, а СХС решения задачи встречи совпадает с СХС оптимального решения задачи перехода, и когда маневры выполняются двигателями малой тяги. Задача встречи КА на некомпланарных орбитах решается с использованием итерационной процедуры. Также представлен алгоритм для решения задачи встречи на некомпланарных орбитах при фиксировании части маневров, когда из-за очень малой тяги приходится последовательно ограничивать несколько маневров.

В пятой главе описываются современные тенденции к оптимизации траектории КА с двигателем малой тяги. Приводятся решения задачи оптимизации траектории КА, оснащенного двигателями малой тяги. Вводятся две задачи оптимизации траектории КА: одна - для КА с ИР-двигателем ограниченной мощности, а другая - для КА с двигателем, ограниченным по тяге, но с постоянной скоростью истечения. В случае с двигателем малой тяги важно учитывать возможность его выключения (когда тяга равна нулю) или включения с ограничениями на максимальную тягу. Также рассматриваются различные способы управления, в том числе трехканальное и двухканальное управления, с учетом ограничений на ориентацию вектора тяги. Формулируются уравнения оптимального движения и стандартные краевые условия для задач оптимизации траекторий КА с ЭРДУ. Для численного решения применяется метод непрерывного продолжения по параметру на основе Ньютоновской гомотопии с нулевым НП для неизвестных начальных значений сопряженных переменных. Этот метод позволяет преобразовать КЗ для системы ОДУ в задачу Коши, что требует интеграции вложенных систем ОДУ.

В шестой главе рассматриваются численные примеры решения различных задач. Для численного решения задачи оптимизации траектории с ИР-двигателем ограниченной мощности и задача оптимизации траектории с двигателем ограниченной скорости истечения используется метод непрерывного продолжения по параметру, основанный на ньютоновской гомотопии после применения принципа максимума Понтрягина. Приводятся примеры решения задач переходов между орбитами и встречи

КА с применением универсального численно-аналитического метода и итерационной процедуры.

Апробация работы

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 научных работах, в том числе 5 научных статьях в рецензируемых журналах, включенных ВАК в перечень ведущих периодических изданий. Результаты работы прошли апробацию на Международных и Всероссийских конференциях и опубликованы в материалах конференций, а также докладывались на научных семинарах в РУДН, в Международном научном обзоре проблем технических наук, математики и информатики, на научных конференциях «принципы построения новой экосистемы: поликультурное пространство», «IAA/AAS SciTech on Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials: Advances in the Astronautical Sciences Series» и др.

Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают основное содержание диссертации, характеризуют результаты проведенных исследований.

Замечания по работе

К содержанию работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. В работе представлены численные результаты, однако отсутствует анализ чувствительности полученных решений к изменению исходных данных, что важно при практическом использовании разработанных алгоритмов.

2. Отсутствует сравнительный анализ эффективности использованных методов в различных условиях. Неясно, какие из них являются более эффективными и в каких условиях. Проведение такого сравнения позволило бы более объективно оценить предложенные подходы.

3. В представленных численных примерах движение КА рассматривается только в рамках модели центрального гравитационного поля Земли. Учет основных возмущающих ускорений позволил бы повысить практическую значимость разработанных алгоритмов.

Указанные замечания не снижают значимости представленных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования А.П. Оливио.

Общее заключение

В целом диссертация А.П. Оливио является законченным научно-техническим исследованием, представляет решение актуальных задач механики полета КА с ДУ малой тяги.

Результаты диссертационного исследования могут служить теоретической основой для решения задач оптимизации траекторий МКА, оснащённых идеально регулируемыми двигателями ограниченной мощности, в условиях ограничений на ориентацию двигательных установок малой тяги. Предложенный в работе

принципиально новый подход к распределению маневров по виткам, допустимым для коррекций позволяет получать оптимальные решения как в случае применения двигателей большой тяги, так и при использовании двигателей малой тяги. Ключевым достоинством разработанных численно-аналитических методов является их простота реализации и высокая надёжность, что делает возможным их применение как в наземных центрах управления полётами, так и непосредственно на борту КА.

Уровень решаемых задач представляется соответствующим требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Содержание диссертации соответствует специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Диссертационное исследование Оливио Адилсон Педро «Метод расчета маневров малого космического аппарата, оснащенного двигателями малой тяги» является завершённой научной работой, которая отвечает критериям пп. 2.1-2.6 Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утвержденного 22.01.2024 ученым советом университета (протокол заседания № УС-1).

Диссертант Оливио Адилсон Педро заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Заместитель начальника отдела баллистики и навигации АО «НПО Лавочкина»
доктор технических наук (05.07.09)



Назаров Анатолий Егорович

«06» 05 2025 г.

Подпись А.Е. Назарова удостоверяю.

Заместитель генерального директора по персоналу и общим вопросам
АО «НПО Лавочкина»



 И.В. Шолохова

Полное название организации: Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» (АО "НПО Лавочкина")

Почтовый адрес: 141402, РФ, г. Химки, Московская область, Ленинградская ул., д. 24.

Телефон: +7 (495) 573-56-75

Официальный сайт: <http://www.laspace.ru/>

Электронная почта: npol@laspace.ru