

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Баранова Андрея Анатольевича
"Разработка методов расчета параметров маневров космических аппаратов в окрестности круговой орбиты", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.01 - "Теоретическая механика".

1. Актуальность темы диссертационной работы.

Исследования, проведенные Барановым А.А., результаты которых изложены в его диссертации, посвящены решению целого комплекса проблем связанных с расчетом многоимпульсных траекторных маневров космических аппаратов (КА) различного назначения, находящихся на орбитах близких к круговым. Это прежде всего быстрый перерасчет параметров орбитальных маневров при ограничениях на запас суммарной характеристической скорости (СХС) для парирования нештатных ситуаций, возникающих в режимах выведения и стыковки. Создание и поддержание спутниковых группировок (СС). Проблемы космического мусора (КМ). Задачи инспектирования (ЗИ) КА, находящихся на орбитах с существенно различными параметрами.

Для решения перечисленных проблем автор применяет разработанные им аналитические и численно-аналитические методы. Эти методы применяются к классической задаче встречи, при наличии различных ограничений характерных для практических задач; к задаче встречи большой продолжительности и ЗИ, когда имеется значительное отличие в долготе восходящего узла у начальной и конечной орбит; к расчету маневров относительного поддержания конфигурации спутниковых систем; к расчетам параметров маневров, исполняемых ДУ малой тяги, к задачам маневрирования, связанных с проблемой КМ, как в режимах увода от осколков, так и в задачах перевода КМ на орбиты захоронения. Отличительной особенностью разработанных методов расчета от существующих методов, основанных на численном интегрировании уравнений в оскулирующих параметрах орбиты, является быстродействие, надежность и относительная простота, позволяющая наглядно вскрыть внутренние закономерности теории орбитального маневрирования космических объектов и реализовать бортовые итерационные процедуры расчета траекторий и орбитальных маневров с целью обеспечения автономности функционирования КА.

Все вышесказанное позволяет констатировать, что диссертационное исследование и тема диссертации безусловно **актуальны**.

2. Краткое содержание диссертации

Представленная диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 184 наименований. Текст работы содержит 304 страницы машинописного текста, 26 таблиц и 87 рисунков.

Во введении приведен подробный обзор работ в области маневрирования в окрестности круговой орбиты. Обосновывается актуальность исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана её научная новизна. Дано описание структуры диссертации и основных положений, выносимых на защиту. Обосновывается практическая значимость и достоверность полученных результатов.

В первой главе сформулирована задача определения параметров маневров КА. Используется линеаризованная система уравнений движения КА в центральном гравитационном поле. Выписаны необходимые условия оптимальности для данной системы уравнений. Приведена классификация маневров и итерационная процедура, которая во всех описанных далее методах используется для формирования с заданной точностью конечной орбиты с учетом нецентральности гравитационного поля, влияния атмосферы, работы двигательной установки и т.д.

Во второй главе рассмотрены задачи перехода между компланарными пересекающимися и непересекающимися орбитами и три типа решений задачи перехода между некомпланарными орбитами. Описано универсальное аналитическое решение, разработанное автором для задачи перехода между некомпланарными орбитами.

В третьей главе исследована задача встречи на компланарных орбитах. Для случая, когда годограф базис-вектора вырождается в точку, предложен численно-аналитический алгоритм определения параметров двух двухимпульсных решений, множества возможных трех- и четырехимпульсных решений. Такие решения существуют для перелетов между непересекающимися орбитами при оптимальной начальной фазе. Для перелетов между пересекающимися орбитами получены формулы для определения углов приложения и величин импульсов скорости трех- и четырехимпульсных решений (годограф базис-вектора имеет вид эллипса). Случаю неоптимальной начальной фазы соответствует годограф базис-вектора в форме циклоиды. Для этих невырожденных решений приведены формулы для определения углов приложения и ориентации импульсов скорости. Проанализированы преимущества и недостатки задачи Ламберта. Приведены аналитическое и численно-аналитическое решение задачи встречи, когда наложены ограничения на высоту фазирующей орбиты.

В четвертой главе рассмотрена некомпланарная задача встречи. Приведен разработанный автором универсальный алгоритм определения маневров четырехимпульсной многовитковой встречи. В алгоритме используется разбиение двух импульсов скорости решения задачи перехода в пропорции, которая обеспечивает заданное время прилета в точку встречи. Описан численно-аналитический алгоритм определения параметров четырехимпульсных маневров дальнего наведения, основанный на геометрической интерпретации импульсов скорости. Для шестиимпульсных невырожденных решений (неоптимальная начальная фаза, годограф базис-вектора имеет форму спирали), приведены формулы для определения углов приложения и ориентации

импульсов скорости. Величины импульсов скорости находятся в результате решения системы шести линейных уравнений.

В пятой главе автор приводит описание разработанного им численного метода. Минимизация функционала задачи осуществляется в пространстве углов приложения импульсов скорости и в пространстве составляющих импульсов скорости. Функционал задачи является выпуклой функцией этих составляющих, поэтому его минимум ищется с помощью метода сопряженных направлений. Перебор точек в пространстве углов приложения импульсов скорости осуществляется с помощью L_p последовательности. Данный метод использовался в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН для определения параметров маневров КА различного типа стыкуемых с ДОС. В данном методе используется также разработанный автором графический диалог с задачей. В этом диалоге импульсы скорости изображаются в пространстве составляющих вектора эксцентриситета. Поиск нового решения осуществляется целенаправленным изменением углов приложения импульсов скорости. Таким образом, находится решение, удовлетворяющее дополнительным ограничениям. Диалог особенно эффективен при возникновении нештатной ситуации, т.к. позволяет анализировать различные схемы маневрирования.

Аналоги этого были использованы для расчета маневров встречи зарубежных КА различного типа.

В шестой главе рассмотрена имеющая важное практическое значение задача встречи, при значительном (нескольких десятков градусов) отклонении долготы восходящего узла. Дополнительным определяемым параметром в этой задаче является компромиссная угловая дальность перелета, которая может превышать тысячу витков. Эту задачу можно считать наиболее сложной задачей встречи, из-за большого времени решения и плохой сходимости итерационной процедуры. Для ускорения получения решения применялись численно-аналитический прогноз и численно-аналитическое определение параметров маневров. Разработанный метод её решения с успехом использовался для расчета маневров создания различных спутниковых систем и Formation Flying, при решении задачи возвращения крупногабаритного космического мусора и задачи обслуживания, требующих ремонта КА.

В седьмой главе рассмотрена задача определения параметров маневров, обеспечивающих поддержание заданной угловой конфигурации спутниковой системы, так называемое «гибкое поддержание» конфигурации. Используются численно-аналитический прогноз движения КА и аналитическое определение параметров маневров, что обеспечивает высокую скорость решения задачи. Как и в других главах предлагается геометрическая интерпретация процесса решения задачи, в данном методе аргументов широты спутников и долгот восходящих узлов. Предлагаемый метод решения данной задачи позволяет сократить число используемых маневров и обеспечить равномерный расход топлива у КА.

Разработанный подход к решению описанной выше задачи, был использован также для решения задачи поддержания угла между плоскостями орбит разноуровневых спутниковых систем.

В восьмой главе продемонстрирована возможность решения с помощью разработанных методов самых разнообразных практических задач. Приведены примеры определения четырех-, трех- и двухимпульсных маневров встречи КА «Союз» с ДОС, решения двух задач встречи на орбите Марса в проекте Mars Sample Return Mission. Каждая из двух последних задач имеет два типа решений: «раздельное», когда четыре импульса скорости имеют только трансверсальную составляющую, а два – только боковую, и «комбинированное», когда используются четыре импульса скорости, которые имеют и трансверсальную, и боковую составляющую. Найденные решения имеют существенно меньшую суммарную характеристическую скорость, чем решения этих задач, полученные в NASA. Также приведен пример решения задачи формирования заданной орбиты с помощью ДУ малой тяги.

Разработанные в диссертации методы были использованы для оценки маневров активных космических объектов, для расчета маневров облета объектов крупногабаритного космического мусора.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы и приведены сделанные выводы.

3. Достоверность и новизна результатов исследований.

Достоверность и новизна результатов исследований автора подтверждаются его многочисленными публикациями, в которых представлены основные результаты диссертационной работы А.А. Баранова. Они опубликованы в 28 статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 19 статей опубликовано в журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus, выпущена монография по теме диссертации. Кроме того **достоверность** результатов диссертационной работы подтверждается их успешным использованием в практической работе в различных проектах, сравнением с результатами, опубликованными отечественными и зарубежными авторами.

4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Результаты полученные в диссертации дают возможность:

- решать основные задачи маневрирования КА в окрестности круговой орбиты;
- существенно сократить время решения этих задач маневрирования, что позволяет проведение массовых расчётов при проектировании новых миссий;
- обеспечить высокую надежность решения задач, получить необходимую точность формирования заданной орбиты, что чрезвычайно важно при баллистическом обеспечении полетов реальных КА;

- объяснить характер получаемого решения;
- осуществить графический диалог с задачей, который особенно эффективен при возникновении нештатных ситуаций на орбите, при проектировании новых миссий, при расчете маневров уклонения от столкновения с космическим мусором;
- рассчитывать параметры многоимпульсных маневров на борту КА;

Полученные в диссертационной работе результаты использовались в баллистическом центре ИПМ им. М.В. Келдыша РАН для расчета маневров КА типа «Союз», «Прогресс» и орбитальных модулей, стыкуемых с ДОС, а также использовались в CNES для расчета параметров маневров европейского ATV, маневров элементов formation flying «Aqua Train» и «Prizm», в проекте “Mars sample return mission”.

5. Оценка содержания диссертации и ее завершенности.

Диссертационная работа Баранова Андрея Анатольевича является законченной, выполнена автором самостоятельно на высоком профессиональном уровне. Результаты работы научно обоснованы. Текст написан технически квалифицированно и аккуратно оформлен. Диссертационное исследование содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, рисунки, графики, таблицы, подробные расчеты. Имеет исчерпывающий литературный список, содержащий ссылки на 184 источника. Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате.

6. Замечания по диссертационной работе

В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить следующее:

1. Излишне большой объем информации, что, очевидно, продиктовано стремлением автора к полноте изложения результатов его многолетней работы по разработке методов расчета траекторных маневров.
2. В работе приведены примеры использования разработанных методов для расчета маневров формирования спутниковых групп (Formation Flying), но фактически использовался тот же программный комплекс, что и для расчета маневров формирования спутниковых систем. Специфика формирования спутниковых групп никак не учитывалась.
3. Описание итерационной процедуры для расчета оптимальных многоимпульсных маневров, представленной в первой главе носит в основном словесный характер. Отсутствует анализ сходимости в пространстве параметров конкретных задач решаемых в других главах с использованием этой процедуры.
4. В универсальном численно-аналитическом методе расчета параметров оптимальных маневров встречи большой продолжительности на компланарных и некомпланарных орбитах не учтены возмущения от сил светового давления, что важно для прогноза эволюций орбит ожидания.

Приведенные замечания ни в коей мере не снижают ценности и фундаментальности полученных автором результатов.

7. Заключение

В целом диссертация Баранова Андрея Анатольевича является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в области механики космического полета, которое имеет важное практическое значение, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Баранов Андрей Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.01 - Теоретическая механика.

Отзыв составил официальный оппонент

Тимаков Сергей Николаевич

доктор технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов», ведущий научный сотрудник ПАО "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва"

25 января 2019 г.



С.Н. Тимаков

Подпись официального оппонента С.Н. Тимакова удостоверяю

Ученый секретарь ПАО "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва"

кандидат физико-математических наук



О.Н. Хатунцева