

## 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

Диссертационная работа Баранова Андрея Анатольевича посвящена разработке теории маневрирования космических аппаратов (КА) в окрестности круговых орбит.

Текст диссертации состоит из введения, восьми глав и заключения.

**Во введении** дается анализ работ в данной области, приводится описание существовавших методов, используемых для решения задач данного типа, обоснованы научная новизна и актуальность исследования, сформулированы цели и задачи работы, описана ее структура, показана практическая значимость и достоверность полученных результатов, сформулированы основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрено решение линеаризованной системы уравнений движения КА в цилиндрической системе координат. Приведена постановка задачи расчета параметров маневров КА и для нее сформулированы необходимые условия оптимальности. Приведена классификация маневров, служащая основой для изложения материала во второй, третьей и четвертой главах. Описана итерационная процедура, позволяющая с необходимой точностью сформировать заданную орбиту с учетом всех необходимых возмущений.

**Во второй главе** в линеаризованной постановке рассмотрены три типа решений задачи перехода между компланарными орбитами и четыре типа решений задачи перехода между некомпланарными орбитами. Приведено разработанное автором универсальное аналитическое решение задачи перехода между некомпланарными орбитами.

**Третья глава** посвящена задаче встречи на компланарных орбитах. Для задачи перелета между компланарными непересекающимися орбитами, когда годограф базис-вектора вырождается в точку, предложены алгоритмы определения параметров двух-, трех- и четырёхимпульсных решений, установлены области существования этих решений. Для задачи перелета между компланарными пересекающимися орбитами, когда годограф базис-вектора имеет вид эллипса, аналитически определены параметры трех- и четырёхимпульсных решений. Когда годограф базис-вектора – циклоида, также аналитически определяются параметры трех- и четырёхимпульсных решений. Описаны преимущества и недостатки задачи Ламберта. В последнем разделе главы приведено решение задачи встречи с ограничением на высоту переходной орбиты.

**Четвертая глава** посвящена решению некомпланарной задачи встречи. Описан универсальный алгоритм расчета параметров маневров четырёхимпульсной многовитковой встречи, основанный на разбиении импульсов скорости решения задачи перехода. Приведен численно-аналитический алгоритм расчета параметров маневров дальнего наведения КА типа «Союз», «Прогресс», во всех баллистических центрах данная задача решается с помощью симплекс метода. Приведены формулы для определения параметров шестиимпульсных решений, соответствующих годографу базис-вектора в форме спирали.

**В пятой главе** приводится описание разработанного автором численного метода, который использовался в баллистическом центре (БЦ) ИПМ им. М.В. Келдыша РАН для



определения параметров маневров КА «Союз» и «Прогресс». В данном методе последовательно проводится оптимизация функционала задачи в пространстве углов приложения импульсов скорости и в пространстве составляющих импульсов скорости. Для минимизации в пространстве составляющих импульсов скорости определяется, какие из составляющих импульсов оптимально использовать в качестве независимых переменных. Для ускорения процесса минимизации в пространстве составляющих импульсов скорости используются оценка снизу минимизируемого функционала и  $L_4$  последовательность.

Разработанный автором графический диалог с задачей позволяет, изменяя углы приложения импульсов скорости, находить решение, учитывающее дополнительные ограничения. Данный диалог дает возможность оперативно анализировать различные схемы маневрирования, что особенно важно при возникновении нештатной ситуации.

**В шестой главе** рассматривается задача определения параметров маневров, позволяющих сформировать заданную конфигурацию спутниковой системы. Отличие заданной задачи от классической задачи встречи состоит в большом первоначальном отклонении долгот восходящего узла начальной и конечной орбит, которое может достигать нескольких десятков градусов. Данная задача значительно сложнее классической задачи встречи, т.к. компромиссная угловая дальность перелета может превышать тысячу витков. Имеется возможность при однократном решении задачи определять эту компромиссную угловую дальность перелета.

Эффективность данного метода подтверждается его использованием для расчета маневров формирования спутниковой системы Globalstar и спутниковой группы Aqua Train.

**В седьмой главе** рассмотрена задача поддержания заданной конфигурации спутниковой системы. Решается наиболее сложная задача «относительного» (иногда употребляется термин «гибкого») поддержания. При данном типе поддержания приходится согласовывать движение всех спутников системы. Значительно чаще используется более простое удержание каждого спутника в заданном для него боксе.

Высокая скорость решения задачи «относительного» поддержания обеспечивается с помощью использования численно-аналитического прогноза.

Предлагаемый метод основан на геометрической интерпретации процесса поддержания положения спутников вдоль орбиты и поддержания долготы восходящего узла. Маневры выполняются в начале процесса поддержания. Данный метод позволяет сократить число маневров по сравнению с традиционными численными методами, а также обеспечить равномерный расход топлива между составляющими систему спутниками.

**В восьмой главе** приводятся начальные условия и результаты расчета с помощью метода, описанного в пятой главе, параметров четырех-, трех- и двухимпульсных маневров встречи КА «Союз» с орбитальной станцией.

Приведены также примеры решения с помощью метода, описанного в шестой главе, двух задач встречи на орбите Марса в проекте Mars Sample Return Mission. Для каждой задачи приведены результаты двух типов решений. Первое аналогично решению NASA, когда импульс скорости имеет только трансверсальную или боковую составляющую. Такое решение простое, но не оптимальное. Во втором решении каждый импульс скорости имеет как трансверсальную, так и боковую составляющую. Показано, что каждое из приведенных решений значительно лучше решений аналогичного типа, полученных зарубежными командами специалистов.



Описанный в шестой главе метод, оказался очень эффективным также для решения ряда задач маневрирования в проблеме увода с рабочих орбит крупногабаритного космического мусора. Описанные в первых главах методы были использованы в задаче оценки маневров исполненных активными космическими объектами. В заключительном разделе восьмой главы приведен результат решения задачи, в которой реализация маневров осуществлялась с помощью ДУ малой тяги.

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

Основные результаты диссертационной работы А.А. Баранова 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.

**Актуальность работы** связана с несколькими важными причинами. Во-первых, большинство современных околоземных КА для решения своих целевых задач должны совершать те или иные маневры, а целевые орбиты большинства типов КА близки к круговым. Во-вторых, увеличение срока эксплуатации современных КА и требования повышения эффективности их функционирования приводят к необходимости оптимизации маневров. В третьих, в связи с расширением областей применения КА растет и разнообразие типов маневров: это маневры для выведения КА на целевую орбиту, маневры сближения с другим КА, маневры для формирования орбитальных систем КА, маневры поддержания орбит единичных КА и орбитальных систем, маневры уклонения от космического мусора, маневры увода КА на орбиту захоронения в конце срока эксплуатации, маневры поддержания конфигурации тесных формаций КА, маневры увода объектов космического мусора и другие. На практике, выполнение многих из этих маневров сопровождается требованиями безусловного выполнения ряда ограничений (по ориентации КА, по условиям его радиовидимости, по светотеневой обстановке и т.д.), что многократно усложняет задачу выбора схемы маневрирования и оптимизации ее параметров. Возможное возникновение нештатных ситуаций, требующих принятия оперативных решений, приводит к необходимости разработки быстродействующих методов расчета маневров. Перечисленные причины приводят к необходимости развития теории и методов маневрирования на околокруговых орбитах. Известно большое количество работ по маневрированию КА на околокруговых орбитах, однако представленные в них теоретические результаты и методы, как правило, предназначены для решения достаточно узких классов задач. Поэтому, разработка общей теории маневрирования КА в окрестности околокруговых орбит и, на ее основе, эффективных методов решения разнообразных типов задач орбитального маневрирования, является актуальной задачей.

**Новыми научными результатами** диссертационной работы являются:

- аналитический метод расчета параметров оптимальных импульсных маневров перехода между некомпланарными орбитами без радиальных составляющих импульсов скорости;
- численно-аналитический метод расчета параметров оптимальных маневров встречи на компланарных орбитах с 2-4 импульсами скорости, когда годограф базис-вектора вырождается в точку;
- аналитический метод расчета параметров оптимальных трех- и четырехимпульсных маневров встречи на компланарных орбитах, когда годограф базис-вектора имеет вид эллипса или циклоиды;
- определение областей существования различных типов оптимальных решений задачи встречи на компланарных орбитах;



- численно-аналитический метод расчета параметров оптимальных маневров встречи на компланарных орбитах при наличии ограничений на высоту орбиты ожидания;
- универсальный численно-аналитический метод расчета параметров оптимальных маневров встречи на некомпланарных орбитах;
- аналитический метод расчета параметров оптимальных пяти- и шестиимпульсных маневров встречи на некомпланарных орбитах, когда годограф базис-вектора имеет вид спирали;
- численно-аналитический и численные методы расчета параметров оптимальных маневров дальнего наведения;
- разработка графических диалоговых средств, позволяющих находить компромиссные решения при наличии противоречивых ограничений;
- универсальный численно-аналитический метод расчета параметров оптимальных маневров встречи на некомпланарных орбитах при наличии значительного (десятки градусов) первоначального отклонения долготы восходящего узла;
- численно-аналитический метод расчета параметров оптимальных маневров «гибкого» поддержания заданной конфигурации спутниковой системы;
- численно-аналитический метод расчета параметров оптимальных маневров поддержания угла между плоскостями орбит разноуровневой спутниковой системы.

Разработанная А.А. Барановым совокупность методов и проведенный анализ свойств маневров является значительным вкладом автора в механику космического полета и позволяет находить решения для большинства представляющих интерес задач маневрирования космических аппаратов в окрестности круговой орбиты.

**Практическая значимость** работы заключается в разработке совокупности методов для решения практических баллистических задач, возникающих при проектировании и оперативном управлении КА и группировками КА на околокруговых орбитах, которые уже продемонстрировали свою эффективность в ряде космических проектов и, безусловно, будут востребованы при разработке новых перспективных КА.

### **Замечания**

1) Полученные в диссертации оптимальные решения фактически являются оптимальными только для невозмущенной линеаризованной системы дифференциальных уравнений. В результате применения процедуры уточнения решения (фактически – с помощью метода дифференциальной коррекции) автору удается удовлетворить краевые условия и в нелинейной постановке с учетом возмущающих ускорений, однако полученное решение нелинейной задачи не является оптимальным. В большинстве случаев такой подход оправдан с практической точки зрения, однако иногда разница между оптимальным и полученным решениями может быть большой и даже критической (в случае существенного ограничения на располагаемый запас характеристической скорости).

2) В работе не приведены методы, позволяющие оценить степень отличия оптимальных решений для линеаризованной и нелинейной математической модели движения КА в зависимости от граничных условий (элементов начальной и конечной орбит), необходимые для определения области применимости разработанных методов.

3) В работе мало внимания уделено задаче маневрирования КА с конечным значением тяги. На странице 224, где приводятся некоторые результаты рассмотрения этой задачи, введены нерасшифрованные обозначения  $w$  и  $w_c$ . Непонятно, почему принято



допущение о постоянстве угла ориентации вектора тяги в орбитальной системе координат на активном участке траектории.

4) В работе есть небольшое количество опечаток и неточностей, отсутствует ряд необходимых пояснений. Например, нет пояснения к численному значению коэффициента  $20.647 \cdot 10^{13}$  в формулах (7.8) и (7.9); не приведена модель возмущений в примере из раздела 7.8.

Приведенные замечания не снижают ценности и достоверности полученных автором результатов.

### **Заключение**

Диссертация Баранова Андрея Анатольевича «Разработка методов расчета параметров маневров космических аппаратов в окрестности круговой орбиты» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу на актуальную тему. А.А. Баранов является известным специалистом в области механики космического полета с большим опытом научной и практической работы, внесшим значительный вклад в развитие теории и методов маневрирования космических аппаратов на околокруговых орбитах. В его диссертации разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное научное достижение. Диссертация имеет большую научную и практическую значимость и соответствует паспорту специальности 01.02.01 «Теоретическая механика». Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Рассматриваемая диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор – Баранов Андрей Анатольевич – заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.01 «Теоретическая механика».

Отзыв составил официальный оппонент

#### **Петухов Вячеслав Георгиевич**

доктор технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов», член-корреспондент РАН, начальник отдела Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (НИИ ПМЭ МАИ)  
125080 Москва, Ленинградское шоссе, д. 5, [www.mai.ru](http://www.mai.ru)  
тел. (499)158-59-31, E-mail: [vgpetukhov@mail.ru](mailto:vgpetukhov@mail.ru)

22 января 2019 г.



В.Г. Петухов

Подпись официального оппонента В.Г. Петухова удостоверяю

Ученый секретарь НИИ ПМЭ МАИ,  
к.т.н.



И.В. Кравченко