

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора ИКИ РАН

д.ф.-м.н., проф.



А.А. Лутовинов

«28» декабря 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

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 А.А. Баранова представляет собой фундаментальное научное исследование, посвященное разработке теории оптимального маневрирования на околорыбовых орбитах. Применение орбитальных маневров является важнейшим этапом реализации любой космической миссии, от которого напрямую зависит ее эффективность. При построении баллистической схемы полета космических аппаратов (КА) решается целый комплекс как научно-технических, так и практических задач, направленных на разработку оптимальной программы полета и, в частности, на определение оптимальных параметров используемых орбитальных маневров. К настоящему времени накоплен уже большой практический опыт

решения подобных задач. Используемые методики описаны в соответствующей литературе. Однако бурное развитие ракетно-космической техники и значительное расширение ее области применения в последние годы, новые этапы освоения космического пространства, широкое развитие спутниковых систем, возникновение проблемы космического мусора — все эти факторы требуют постоянного совершенствования методов орбитального маневрирования, обеспечения возможности быстро и эффективно находить оптимальные решения сложных задач управления спутниками и их системами в современных условиях осуществления космических полетов. В этой связи особенно важным и актуальным представляется глубокий теоретический анализ как существующих, так и вновь разрабатываемых методов расчета маневрирования КА, создание единой универсальной теории, позволяющей осуществлять поиск оптимальных параметров маневров при различных начальных условиях и различных целях орбитального полета. Указанные обстоятельства определяют особую **актуальность** данной диссертационной работы.

В рамках диссертационного исследования автором были предложены решения следующих научно-технических задач:

- определение области существования вырожденных и невырожденных оптимальных решений задачи встречи на компланарных орбитах, разработка численно-аналитических методов нахождения параметров маневров для этих решений;
- разработка численно-аналитических методов нахождения параметров маневров для встречи на некомпланарных орбитах;
- разработка численно-аналитических и численных методов расчета параметров маневров дальнего наведения;
- разработка графического диалога с задачей, основанного на изображении импульсов скорости в пространстве составляющих вектора эксцентриситета;

- разработка численно-аналитического метода решения задачи встречи на некомпланарных орбитах при наличии значительного первоначального отклонения долготы восходящего узла;
- разработка численно-аналитического метода расчета параметров оптимальных маневров гибкого поддержания заданной конфигурации спутниковой системы.

Рассматриваемая 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 (стр. 6 — 23) обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи работы, описана ее структура, рассмотрены научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов, сформулированы основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

В первой главе (стр. 24 — 49) приводится решение линеаризованной системы уравнений движения КА в цилиндрической системе координат. Дана постановка задачи расчета параметров маневров КА в окрестности круговой орбиты при условии существенного упрощения модели движения. Сформулированы необходимые условия оптимальности для данной задачи. Приведена классификация маневров, в соответствии с которой строится дальнейшее изложение материала. Описана итерационная процедура, позволяющая с необходимой точностью выполнять терминальные условия с учетом нецентральности гравитационного поля, влияния атмосферы, солнечного давления, работы двигательной установки и т.д.

Во второй главе (стр. 50 — 79) рассмотрена задача перехода между компланарными (три типа решений) и некомпланарными (четыре типа решений) орбитами. Приведены формулы для расчета параметров маневров. Проведено сравнение решения задачи в линеаризованной постановке с точным решением.

В третьей главе (стр. 80 — 137) рассмотрена задача встречи на компланарных орбитах. Проанализированы три типа возможных решений этой задачи, установлены области их существования. Приведены алгоритмы для определения параметров двух-, трех- и четырёхимпульсных решений для каждого из возможных типов годографа базис-вектора: в виде точки, эллипса и циклоиды. Приведены примеры, когда суммарная характеристическая скорость решения задачи Ламберта в два и в три раза больше суммарной характеристической скорости оптимального трехимпульсного решения. Рассмотрена задача встречи, в которой необходимо учитывать ограничения на высоту переходной орбиты.

В четвертой главе (стр. 138 — 177) описаны универсальный алгоритм расчета параметров маневров четырехимпульсной многовитковой встречи на некомпланарных околокруговых орбитах и численно-аналитический алгоритм расчета параметров маневров дальнего наведения КА типа «Союз», «Прогресс». Исследованы шестиимпульсные решения, соответствующие годографу базис-вектора в форме спирали, получены формулы для вычисления оптимальных углов приложения импульсов скорости этих решений. Проведено сравнение эффективности оптимального решения с решениями, используемыми NASA и ЦУП.

Пятая глава (стр. 178 — 199) посвящена численным методам. В ней приводится описание численного метода, который в течение многих лет использовался в баллистическом центре (БЦ) ИПМ им. М.В. Келдыша АН РАН для определения параметров маневров КА типа «Союз» и «Прогресс». Приводится вид функционала для данной задачи и описывается итерационная процедура поиска минимума этого функционала.

Также в пятой главе приводится описание предлагаемого автором графического диалога, позволяющего оперативно выбрать новую схему маневрирования, учитывающую дополнительные ограничения, вызванные нештатной ситуацией. Данный диалог можно эффективно использовать как на стадии баллистического проектирования, так и во время полёта КА при

возникновении нештатной ситуации, в том числе при необходимости уклонения от столкновения с космическим мусором. В отличие от двух диалогов, использовавшихся ранее, в данном диалоге анализ решения и его изменение происходит не в пространстве, где изображены орбиты, а в пространстве проекций вектора эксцентриситета. Полученному численным методом решению задачи соответствует ломаная линия. В процессе диалога можно менять углы приложения импульсов скорости, добиваясь нужных характеристик решения.

Аналог описанного в этой главе метода был реализован в CNES и использовался для расчета маневров ATV и элементов спутниковой группы «Prizm».

В шестой главе (стр. 200 — 228) рассматриваются вопросы, связанные с маневрированием КА в составе спутниковых систем и спутниковых групп. Обсуждаются особенности применения методов, рассмотренных в предыдущих главах, для расчета параметров маневров КА в этих случаях.

Маневры КА, входящих в систему, можно разделить на два вида: маневры формирования спутниковой системы и маневры ее поддержания. Обсуждаются особенности данных видов маневров. Предлагается быстродействующий численно-аналитический метод, позволяющий находить оптимальное решение наиболее сложной задачи встречи, когда имеется большое первоначальное отклонение долготы восходящего узла. Данный метод дает возможность при однократном решении задачи построить зависимость затрат суммарной характеристической скорости от продолжительности перелёта. Имеется возможность находить решения, уменьшающие влияние ошибок реализации маневров.

Приводится пример использования предлагаемого метода для расчета маневров спутниковой системы «Globalstar» и маневров создания спутниковой группы «Aqua Train».

Седьмая глава (стр. 229 — 250) посвящена вопросам поддержания конфигурации спутниковой системы. Эта задача имеет ряд существенных

отличий от задачи создания спутниковых систем. Если положение каждого из спутников удерживается в определенной для него окрестности некоторого заданного движения, то говорят о «жестком» поддержании. Если требуется согласовать движение всех спутников системы, то используется «гибкое» поддержание. «Гибкое» поддержание является более сложной задачей, поскольку при расчете параметров маневров одного из спутников необходимо учитывать положение всех остальных элементов системы. Описывается численно–аналитический метод, позволяющий при «гибком» поддержании аналитически вычислять величины маневров, обеспечивающих необходимую конфигурацию системы на всем интервале поддержания. Учет физических особенностей задачи позволяет сократить число используемых маневров. Предлагаемая геометрическая интерпретация процесса поддержания дает исчерпывающее объяснение характера оптимального решения.

Восьмая глава (стр. 251 — 281) содержит примеры использования описанных в первых главах методов для решения различных практических задач. Приведены примеры расчета параметров четырех-, трех- и двухимпульсных маневров встречи КА «Союз» с орбитальной станцией. Также приведены примеры определения параметров маневров в двух задачах подлета к капсуле с грунтом в проекте “Mars sample return mission”. Проведено сравнение найденного решения с решениями, полученными NASA и JPL.

Разработанные методы были также использованы при решении ряда задач маневрирования в проблеме космического мусора. Это задачи оценки маневров исполненных активными космическими объектами, задачи уклонения от столкновения с космическими объектами и задачи возвращения крупногабаритных объектов космического мусора. В тексте диссертации приведен обзор результатов, полученных автором при решении этих задач.

В заключении (стр. 282 — 284) сформулированы основные результаты диссертационной работы и сделаны следующие **выводы**:

1. Для классической задачи встречи средней продолжительности установлены типы возможных оптимальных решений, определены области их

существования и предложены численно-аналитические методы определения параметров маневров этих решений.

2. Разработанные численно-аналитические методы определения параметров маневров позволяют решать все основные задачи маневрирования в окрестности круговой орбиты.

3. Достоверность и эффективность этих методов подтверждена их многолетним эффективным использованием в различных проектах полетов реальных космических аппаратов как у нас в стране, так и за рубежом.

4. Геометрическая интерпретация получаемых решений позволяет выполнить их экспресс-анализ и с помощью графического диалога найти решение, удовлетворяющее дополнительным ограничениям. Эта возможность чрезвычайно важна при возникновении нештатной ситуации, когда необходимо оперативно выбрать новую схему маневрирования.

5. Разработанный универсальный метод решения задачи встречи при значительном первоначальном отклонении ДВУ обеспечивает нахождение компромисса между экономией энергетических затрат и сокращением времени перелета, ведущего к увеличению энергетических затрат. Данный метод предназначен для расчета параметров маневров формирования спутниковых систем, может быть использован при возвращении космического мусора с низких орбит, а также при решении задачи обслуживания.

6. Численно-аналитический метод определения параметров маневров относительного поддержания заданной конфигурации спутниковой системы позволяет уменьшить число маневров и обеспечить равномерное распределение энергетических затрат между спутниками системы.

В списке литературы (стр. 285 — 304) представлены библиографические материалы, использованные автором при работе над диссертационной работой.

Научная новизна полученных автором результатов заключается в следующем:

- разработан аналитический метод расчета параметров оптимальных маневров перехода между некомпланарными орбитами при условии, что у импульсов скорости отсутствуют радиальные составляющие;
- разработан численно-аналитический метод расчета параметров оптимальных двух-, трех- и четырехимпульсных маневров встречи на компланарных орбитах, когда годограф базис-вектора вырождается в точку;
- разработан аналитический метод расчета параметров оптимальных трех- и четырехимпульсных маневров встречи на компланарных орбитах, когда годограф базис-вектора имеет вид эллипса;
- разработан аналитический метод расчета параметров оптимальных четырех- и трехимпульсных маневров встречи на компланарных орбитах, когда годограф базис-вектора имеет вид циклоиды;
- определены области существования различных типов оптимальных решений задачи встречи на компланарных орбитах;
- разработан численно-аналитический метод расчета параметров оптимальных маневров встречи на компланарных орбитах при наличии ограничений на высоту орбиты ожидания;
- разработан универсальный численно-аналитический метод расчета параметров оптимальных маневров встречи на некомпланарных орбитах;
- разработан аналитический метод расчета параметров оптимальных пяти- и шестиимпульсных маневров встречи на некомпланарных орбитах, когда годограф базис-вектора имеет вид спирали;
- разработан численно-аналитический метод расчета параметров оптимальных маневров дальнего наведения;
- разработан численный метод расчета параметров оптимальных маневров дальнего наведения;
- разработан графический диалог с задачей, позволяющий находить компромиссные решения при наличии противоречивых ограничений;

- разработан универсальный численно-аналитический метод расчета параметров оптимальных маневров встречи на некомпланарных орбитах при наличии значительного (десятки градусов) первоначального отклонения долготы восходящего узла;

- разработан численно-аналитический метод расчета параметров оптимальных маневров «гибкого» поддержания заданной конфигурации спутниковой системы;

- разработан численно-аналитический метод расчета параметров оптимальных маневров поддержания угла между плоскостями орбит разноуровневой спутниковой системы.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается их успешным использованием в практической работе в различных проектах, сравнением с результатами, опубликованными отечественными и зарубежными авторами.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что полученные в ней результаты 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 данных 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.

Данные результаты использовались при разработке методов оценки маневров активных космических объектов и при определении схем облета объектов космического мусора, при решении задачи обслуживания.

Полученные в диссертационной работе А.А. Баранова результаты применялись 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”. Эти результаты **могут быть рекомендованы** для дальнейшего практического использования в научных организациях ракетно-космической промышленности для расчета оптимального маневрирования как отдельных КА, так и КА, входящих в состав спутниковых систем и спутниковых групп.

Таким образом, по данной работе может быть сделано следующее **заключение:**

Диссертационная работа Баранова Андрея Анатольевича на тему «Разработка методов расчета параметров маневров космических аппаратов в окрестности круговой орбиты» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу на актуальную тему. В данной работе на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Рассматриваемая диссертационная работа имеет большую научную и практическую значимость и соответствует паспорту специальности 01.02.01 «Теоретическая механика». Основное содержание работы, полученные результаты и выводы достаточно полно изложены в автореферате.

По своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и практической значимости полученных результатов, содержанию и оформлению рассматриваемая диссертационная работа соответствует требованиям п. 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 30.01.2002

№ 74 (с изменениями, внесенными Постановлением Правительства РФ от 20.06.2011 № 475), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Баранов Андрей Анатольевич заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.01 «Теоретическая механика».

Заведующий отделом космической динамики
и обработки информации,
д.т.н., проф.

Назирова Равиль Равильевич

Ведущий математик,
к.ф.-м.н.

Федяев Константин Сергеевич

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Научно-технического совета
отдела космической динамики и обработки информации, протокол
№ 11 от 19.12. 2018 года.

Председатель Научно-технического совета,
д.ф.-м.н., проф.

Ковалева Агнесса Соломоновна