

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук

Константинова Михаила Сергеевича

на диссертационную работу **Филиппова Григория Александровича**

«Формирование Парето-оптимальных номинальных программ управления относительным движением космического аппарата с конечной тягой на околокруговых орбитах»,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертация Филиппова Г.А. посвящена решению задачи, связанной с выбором номинального управления относительным движением космического аппарата. В условиях всё более широкого развертывания космических систем, проблема обслуживания космических аппаратов, входящих в эти системы, становится всё более важной. Без качественного исследования траектории сближения КА, без анализа оптимальных по затратам топлива и времени перелета программ управления движением КА при его сближении с обслуживаемым космическим объектом нельзя надеяться на успешную и эффективную работу космической системы. Проблема многокритериальной оптимизация номинального управления относительным движением космического аппарата, которой посвящена диссертационная работа, является **актуальной**.

Целью работы автор поставил построение множества номинальных оптимальных программ управления относительным движением по двум критериям – минимуму затрат топлива (времени работы двигательной установки) и минимуму общего времени.

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из четырёх глав.

В первой главе автором проведён обзор современных методов оптимизации траекторий относительного движения. В ней приведены основные критерии, по которым производится оптимизация номинального управления. Автор предполагает, что рассматриваемая им транспортная задача решается с использованием электроракетной двигательной установки. В работе дан краткий обзор существующих электроракетных двигательных установок, анализируются характеристики этих установок. Представлена математическая модель относительного движения космического аппарата, основанная на уравнениях движения в цилиндрической системе координат, уравнения которой

Входящий № 206-974
Дата 15 ФЕВ 2023
Самарский университет

линеаризованы в окрестности орбиты пассивного космического аппарата, с которым и рассматривается сближение. Автором выделены вековые и периодические составляющие относительного движения, уравнения для которых приведены к безразмерному виду. Сформулирована общая постановка задачи двухкритериальной оптимизации номинальных программ управления относительным движением.

Вторая глава посвящена исследованию оптимальных программ управления продольным относительным движением. Для рассматриваемой плоской задачи автор совершенно обоснованно описывает управление космическим аппаратом с двигателем конечной тяги двумя функциями: функцией включения-выключения двигателя КА и углом отклонения вектора тяги от трансверсального направления, также называемым углом тангажа. Рассмотрен как вариант отсутствия ограничения на величину угла тангажа на траектории перелёта, так и вариант возможного ограничения величины этого угла – тяга может быть или трансверсальной положительной, или трансверсальной отрицательной. Безусловно, это интересный для практики случай, когда ориентация вектора тяги связана с ориентацией всего КА, на которую могут накладываться ограничения.

Для анализа структуры управления, автором на первом этапе решены задачи оптимального управления отдельно вековыми и отдельно периодическими составляющими движения, использованные как начальное приближение к решению задачи оптимального управления относительным движением на втором этапе.

Автором получены новые интересные результаты для случая управления с трансверсальной ориентацией вектора тяги. Так, например, для задачи управления вековыми составляющими движения обоснованно указывается, что на траектории возможны не более двух включений тяги разного знака, которые разделены пассивным участком. Для задачи управления периодическим движением автором показано, что в пределах витка программа содержит два включения тяги, а количество витков коррекции определяется граничными условиями. Для обеих задач автором получены аналитические соотношения, которые позволяют получить зависимость затрат общего времени от затрат моторного и оценить минимальные затраты моторного времени.

Для исследования программ оптимального управления относительным движением автором выделены три специфические области граничных условий. Первая из них соответствует случаю, когда определяющим является коррекция характеристик векового движения. Вторая область соответствует случаю, когда определяющим является коррекция характеристик периодического движения. Третья область соответствует случаю, когда влияние на процесс относительного движения характеристик векового и

периодического движения сопоставимо. Автором показано, что при доминировании требования коррекции векового движения, программа управления движением на перелете содержит три области. В первой и третьей структура управления стремится к структуре оптимального управления вековым движением, во второй – периодическим. При доминировании требования коррекции периодического движения и сопоставимом изменении векового и периодического движения, программа содержит две области. В первой структура оптимального управления стремится к структуре управления периодическим движением, во второй – вековым. На основании серии расчётов, автором сформулированы оценки искомых минимальных затрат моторного времени.

Третья глава посвящена исследованию параметрических программ управления относительным движением КА. Автором выделены структуры управления с двумя и тремя включениями тяги в одинаковом или разном трансверсальном направлении. Автор разработал математическую модель для решения задачи двухкритериальной оптимизации параметрических программ управления по двум критериям (минимум моторного времени и минимума общего времени). Автором проведено исследование областей постоянства знака тяги, в результате которого получена аналитическая формула, определяющая знак тяги на первом активном участке как функцию граничных условий для векового движения.

Проведено детальное исследование программ с двумя включениями двигателя. Автором впервые получены аналитические соотношения, связывающие размеры активных участков с граничными условиями для векового движения и размерами пассивных участков. Автором проведено аналитическое исследование, позволившее построить аналитические формулы для расчёта предельных (минимальных и максимальных) затрат моторного времени и общего времени для принятой структуры управления и определить границы множества Парето в критериях моторное и общее время. Автором проведено исследование влияния размера пассивного участка на возможность коррекции периодических составляющих движения, которое показало, что для принятой структуры управления (с двумя включениями двигателя), предельное изменение малой полуоси эллипса, описывающее периодическое движение, составит четыре безразмерных единицы.

Аналогичные, но к сожалению менее детальные исследования, выполнены для программ с тремя включениями тяги. При этом автором показано, что увеличение количества включений тяги расширяет возможности коррекции периодического движения: предельное изменение малой полуоси эллипса, описывающее периодическое движение, увеличивается до шести безразмерных единиц.

Для подтверждения обоснованности перехода к параметрическому управлению, в диссертационной работе проведено сравнение результатов решения задачи с применением параметрических программ с результатами, получающимися при использовании принципа максимума. Автор показал, что параметрические программы близки к оптимальным программам.

Четвёртая глава посвящена задаче приведения космического аппарата с электроракетным двигателем в точку стояния геостационарной орбиты. Автор, с применением параметрических программ управления, решил указанную задачу для граничных условий, использованных ранее другими авторами. В диссертационной работе показано, что используемые параметрические программы управления относительно движение КА позволяют найти решения, очень близкие к ранее опубликованным решениям. Автор справедливо отмечает, что результаты диссертационной работы дополняют ранее опубликованные, так как содержат серию результатов, не улучшаемых по Парето решений задачи.

Автор выделил области специфических граничных условий, названных «малое» и «большое отклонение», которые отличаются начальным рассогласование характеристик движения космического аппарата от характеристик движения космического объекта, относительно которого движение рассматривается. Для каждого варианта граничных условий автором получена серия оптимальных по Парето решений задачи.

Важным разделом диссертационного исследования следует рассматривать раздел, где также проведено моделирование движения КА с полученным законом управления движением КА с использованием математической модели, не применяя линеаризацию уравнений относительного движения КА. Автор называет эту модель исходной моделью. Автор приводит результаты, которые показывают, что используемая им линеаризация слабо деформировала характеристики траектории перелета и точность удовлетворения транспортной задачи (точность удовлетворения конечных условия движения КА). Автор показал, что получающаяся неточность может быть устранена незначительной корректировкой параметров закона управления. При этом практически не меняются ни моторное время перелета, ни время перелета.

В заключении приводятся основные выводы по работе.

Новизна проведённых исследований заключается в следующем:

- 1) Определены структура оптимального управления относительным движением космического аппарата с двигательной установкой, обеспечивающей малое постоянное реактивное ускорение.

- 2) Разработана новая методика двухкритериальной оптимизации номинального управления относительным движением космического аппарата с двумя и тремя включениями тяги в трансверсальном направлении.
- 3) Как было отмечено выше, в диссертационной работе впервые получены аналитические соотношения, связывающие размеры активных участков траектории с граничными условиями для векового движения и размерами пассивных участков. Автором проведено аналитическое исследование, позволившее построить аналитические формулы для расчёта предельных (минимальных и максимальных) затрат моторного времени и общего времени для принятой структуры управления и определить границы множества Парето (по критериям: моторное время и общее время).
- 4) При анализе предложенных в диссертационной работе параметрических законов управления для рассматриваемого космического маневра проведено исследование влияния размера пассивного участка на возможность коррекции периодических составляющих движения, которое показало, что для рассматриваемых структур управления (с двумя и тремя включениями двигателя), существует предельное изменение малой полуоси эллипса, описывающее периодическое движение. Дана оценка этого предельного изменения.

Значимость результатов исследований для науки и практики

Теоретическая значимость работы заключается в разработке метода исследования структуры оптимального управления относительным движением. Метод базируется на использовании принципа максимума и предполагает выделение нескольких областей граничных условий. Для каждой из этих областей выявлена структура оптимального управления относительным движением КА. Проблему оптимизации автор рассматривает как двухкритериальную. Он анализирует два критерия: минимум моторного времени и минимум общего времени.

Практическая значимость работы заключается в разработке алгоритма построения множества не улучшаемых по Парето решений задачи выбора номинального управления с использованием параметрических программ управления с двумя и тремя включениями тяги в трансверсальном направлении. Автор получил и представил в диссертационной работе результаты численного анализа нескольких областей граничных условий, которые могут быть использованы при разработке схем обслуживания космических объектов.

При проектировании КА, которые должны сближаться с космическими объектами, находящимися на околокруговых орбитах, для оценки требуемых затрат

характеристической скорости при выполнении маневров сближения могут быть использованы:

- полученные автором аналитические соотношения, связывающие размеры активных участков с граничными условиями для векового движения и размерами пассивных участков;
- аналитические формулы для расчёта предельных (минимальных и максимальных) затрат моторного времени и общего времени для принятой структуры управления и определить границы множества Парето в критериях моторное и общее время;
- проведенный в диссертационной работе анализ влияния размера пассивного участка на возможность коррекции периодических составляющих движения при реализации траектории сближения КА с космическим объектом;
- полученные автором оценки предельного изменения малой полуоси эллипса, описывающее периодическое движение, при двух и трех активных участках с трансверсальным направлением тяги на траектории перелета.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведённых в диссертации:

1) Разработанное программно-математическое обеспечение может использоваться для формирования оптимальных схем управления относительным движением КА, например, для обслуживания КА, находящихся на околокруговой орбите.

2) Результаты численного анализа могут быть использованы для оценок рационального времени выполнения маневра сближения КА с космическим объектом, находящимся на околокруговой орбите, для оценки характеристической скорости.

Степень обоснованности и достоверности полученных в диссертации результатов

Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, получены с использованием известных математических моделей, использованием известных методов теории оптимального управления, известных методов вычислительной математики.

Достоверность результатов диссертации доказывается автором с использованием:

- сравнения полученных результатов с ранее опубликованными результатами (анализ сближение на геостационарной орбите).
- анализа рассматриваемой транспортной задачи с использованием математической модели более высокого уровня (более точной модели, не использующей линеаризацию уравнений движения). Кроме этого, автор усложняет модель, анализируя возмущенное движение КА. Сравнительный анализ результатов,

полученных с использованием этих математических моделей, доказывает корректность проведенного соискателем анализа, корректность предлагаемого им метода исследования относительного движения.

Материалы диссертации достаточно полно изложены в опубликованных автором семи статьях, три из которых в научных журналах из списка ВАК, четыре индексируются Scopus и WebOfScience. Диссертационные материалы докладывались автором на семи семинарах и конференциях, в том числе международных.

Замечания по диссертационной работе

Не ставя под сомнение новизну и важность полученных в диссертации результатов, следует отметить, что она имеет ряд смысловых и стилистических опечаток и ошибок:

1. Автор выделяет из общей пространственной задачи анализа относительного движения КА задачу анализа плоского движения и анализирует оптимальные законы управления относительным продольным движением КА. Формальным основанием такого подхода является то, что фазовые переменные x_z и y_z системы (1.12), описывающие боковое движение КА (уход КА из плоскости), не входят в уравнения, описывающие плоское движение КА. Но продольное и боковое движения связаны между собой в рассматриваемой задаче через вектор реактивного ускорения. Отдельно корректировать продольное движение и боковое движение включением двигателя КА, скорее всего, не целесообразно. Каждое (или почти каждое) включение двигателя должно одновременно корректировать и продольное и боковое движение.
2. Автор многократно использует арккотангенс (или арктангенс) для определения оптимального направления вектора тяги α , забывая о том, что уравнение $\text{ctg}(x)=a$ имеет в координатном круге два решения. Автор выбирает только одно, и оно может оказаться неправильным. Например, на странице 31 в системе равенств (2.5) соотношение для определения угла α корректно только в том случае, если сопряженная к приращению радиуса переменная $\Psi_{\Delta r}$ положительна. Если эта переменная меньше нуля, то правильное решение будет отличаться от решения, приведенного в работе, на 180 градусов.
3. Как правило, в работе при формулировке краевой задачи принципа максимума автор допускает неточность. Порядок краевой задачи соответствует числу краевых условий, которые нужно удовлетворить. При этом число неизвестных краевой задачи (число неизвестных значений сопряженных переменных в начальной точке траектории в постановке, рассматриваемой автором диссертации) должно быть

равно порядку краевой задачи. Как же формулирует краевую задачу автор? В первый раз формулировка краевой задачи встречается в работе на стр. 27. Из текста на этой странице следует, что неизвестных параметров краевой задачи три (это сопряженные переменные в начальной точке траектории), а краевых условий уравнений только два (нижняя строка равенств (2.3)). Не хватает еще одного условия для корректной формулировки краевой задачи принципа максимума. Отсутствие этого условия приводит к ещё одной неточности, которая будет сформулирована ниже. А здесь хочу отметить, что сформулированная в этом пункте неточность относится не только к разделу, включающему упомянутую страницу 27. Она повторяется много раз в последующих разделах. Например, на стр. 32, 33, 39.

4. Используемое выражение для определения оптимального релейного управления для варианта использования трансверсального направления тяги ошибочно (стр. 35). Дело в том, что сопряженная к моторному времени $\Psi_{\text{мотор}}$ переменная отрицательна. Как мне показалось, в приведенных в диссертации расчетах автор принимает эту сопряженную переменную равной -1. Это правильно, так можно поступить. Но посмотрите на равенство (2.10). Оно утверждает, что двигатель будет выключен при условии, которое никогда не выполняется. Если $\Psi_{\text{мотор}}$ меньше нуля, то не может быть выполнено $-\Psi_{\text{мотор}} < \Psi_{\text{мотор}}$. Корректно записанное равенство (2.10) имеет вид:

$$\delta_{\text{опт}} = \begin{cases} -1 & \Psi \Delta r_{\text{ср}} < \Psi_t \\ 0 & \Psi_t < \Psi \Delta r_{\text{ср}} < -\Psi_t \\ 1 & \Psi \Delta r_{\text{ср}} > -\Psi_t \end{cases}$$

Аналогичная ошибка присутствует и в равенстве (2.27) стр. 37, и в равенстве (2.33) стр. 39.

5. Стр. 36. Автор утверждает, что минимальные затраты моторного времени можно найти, используя равенство (2.24), которое соответствует пассивному участку траектории с продолжительностью, определяемому по равенствам (2.23). На мой взгляд, это правильно, но требует пояснения. При любом конечном времени длительность ни первого, ни второго активных участков не равна нулю. Равенство (2.23) справедливо только при бесконечно большом времени перелета. При увеличении времени перелета длительность одного активного участка асимптотически стремится к нулю, а другого активного участка асимптотически стремится к пределу, определяемому равенством (2.24).

6. Стр. 37. Автор утверждает, что «Анализ оптимального управления (2.27), показывая, оно определяется знаком сопряжённой переменной $\Psi_{l_x \dots}$ ». Это неправильно. Оптимальное управление в соответствие с (2.27) определяется соотношением значений Ψ_{l_x} , $\Psi_{l_{\text{мот}}}$ и $|\Psi_{l_{\text{мот}}}|$.
7. Стр. 42. Автор утверждает, что «...пассивный участок на траектории единственен и появляется в точки перегиба функции F ». Если точкой перегиба считать точку, в которой вторая производная равна нулю, то утверждение автора некорректно.
8. Стр. 65. Автор, если я правильно понял, анализирует изменение характеристик траектории (прежде всего, моторного времени) с увеличением времени перелета. Но ошибочно пишет: «При незначительном увеличении моторного времени (рис. 2.17)....». Ниже: «При ещё большем увеличении моторного времени (рис. 2.18)....». По-видимому, в этих фразах нужно заменить слова «моторное время» на «общее время перелета».
9. Стр. 68. Автор утверждает, что «оптимальный угол отклонения тяги от трансверсального направления определяется арккотангенсом линейной функцией времени, который может изменяться только от нуля до π ». Думаю, что это неправильно. Почему он не может оказаться минус 10° ?
10. Стр. 79. Фраза автора «Введём допущение о том, что $\delta \sin(\varphi_0 + t + \xi) = -1$ ». И никаких слов, поясняющих допущение. Как можно такое допущение понять, когда оно справедливо? Почему синус какой-то сложной суммы должен быть равен 1 или минус 1?
11. При анализе полученных характеристик траектории перелета (особенно для анализа относительного движения на геостационарной орбите и для сравнения результатов с результатами, известными из публикаций, например на стр. 108) было бы целесообразно дать размерные значения характеристик. Например, значения характеристической скорости маневра.
12. В работе есть опечатки не только в тексте, но и в приведенных формулах. Вот некоторые из них:
 - Стр. 20. Система уравнений (1.4). В последнем равенстве написано z . Должно быть Δz .
 - Стр. 30. Система уравнений (2.2). В первых двух равенствах используется β . Должно быть δ .
 - Стр. 31. Написано: $x_0 = \pm l_0$, $y_0 = 0$. Должно быть: $l_{x0} = \pm l_0$, $l_{y0} = 0$.
 - Стр. 33. Система равенств (2.15). Во втором равенстве β . Должно быть δ .

- Стр. 36. Система равенств (2.25). Во втором равенстве x . Должно быть l_x .
- Стр.38. Выражение для минимального времени выполнения рассматриваемого маневра явно ошибочно.
- Стр. 74. Система равенств (3.9). Во втором равенстве Δr_{cpo} . Должно быть ΔL_{cpo} . Та же ошибка на стр. 83 в равенстве (3.31)
- Стр. 74. Последнее равенство на странице. Написано минус t_0 . Должно быть плюс t_0 .
- Очень досадно, что автор вместо термина «истинная аномалия» использует неправильное сочетание слов «угол истинной аномалии». (стр. 111, стр. 112).

Перечисленные замечания не влияют на общую положительную оценку работы диссертанта.

Соответствие автореферата и диссертации паспорту специальности

Область исследования диссертации соответствует пункту 1 – Разработка и совершенствование математических моделей, используемых для описания движения и управления летательным аппаратом на различных режимах полета, пункту 8 – Синтез терминального управления движением ЛА, пункту 12 – Совершенствование методов навигации и управления движением летательных аппаратов, совершенствование баллистико-навигационного обеспечения полета летательных аппаратов. Разработка новых методов оптимизации состава навигационных измерений и методов планирования навигационных измерений. Разработка методов оптимальной обработки навигационной информации паспорта специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации.

Заключение

Диссертация Филиппова Григория Александровича представляет собой самостоятельно выполненную завершённую научно-исследовательскую квалификационную работу. В ней решена актуальная баллистическая задача, представляющая научную ценность и имеющая существенное значение для практической реализации эффективных способов управления относительным движением космического аппарата при его сближении с космическим объектом, находящимся на околокруговой орбите. Работа написана понятным научным языком с корректным использованием научной и технической терминологии.

По актуальности, новизне, научной и практической ценности проведённых исследований диссертационная работа «Формирование Парето-оптимальных номинальных программ управления относительным движением космического аппарата с конечной тягой на околосферических орбитах» отвечает требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней ВАК. Её автор Филиппов Григорий Александрович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Официальный оппонент

профессор кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение» МАИ,

д.т.н., профессор

М. С. Константинов

e-mail: mkonst@bk.ru

13.02.2023

Подпись Константинова Михаила Сергеевича заверяю

Зам начальника управления по работе с кадрами



Иванов М.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Адрес организации: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Сайт организации: <https://mai.ru>

e-mail: mai@mai.ru

Телефоны:

- справочное: 8-(499)-158-43-33, 158-58-70, 158-00-02;

- приёмная ректора: 8-(499)-158-13-73;

- канцелярия: 8-(499)-158-92-09.

Факс: 8-(499)-158-29-77.