

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук

Константинова Михаила Сергеевича

на диссертационную работу Ду Чунжуй

«Оптимизация перелётов космических аппаратов с электроракетной двигательной установкой между периодическими орбитами относительно точек либрации L1 и L2 в системе Земля-Луна», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16 - Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

Актуальность темы диссертационного исследования

Работа Ду Чунжуй посвящена исследованию динамики полёта космических аппаратов (КА) с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) в круговой ограниченной задаче трёх тел системы Земля-Луна. Управление движением КА под действием гравитации Земли и Луны является актуальной проблемой на современном этапе развития космонавтики, особенно в связи с бурным ростом интереса к исследованию и освоению Луны. Актуальность темы диссертационного исследования определяется недостаточной изученностью проблемы поиска оптимальных законов управления КА с ЭРДУ для перелётов между периодическими орбитами в системе Земля-Луна.

Результаты работы могут быть использованы при определении оптимального номинального управления для окололунных миссий, включающих перелёты КА с ЭРДУ между периодическими орбитами относительно точек либрации L1 и L2 в системе Земля-Луна с учётом действующих возмущений. Сформулированы выводы и практические рекомендации по использованию разработанных методик управления движением КА при перелётах с ЭРДУ в окололунном пространстве.

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из четырёх глав.

В первой главе проводится аналитический обзор известных работ по данной проблеме. Представлены основные теоретические положения ограниченной задачи трёх

Входящий № 206 - 173
Дата 15 ФЕВ 2023
Самарский университет

тел и их приложение к исследованию управляемого движения КА с ЭРДУ. Анализируются существующие подходы к проектированию траекторий КА с ЭРДУ и нахождению оптимального программного управления перелётами в рамках ограниченной задачи трёх тел. Описана общая формулировка задач об оптимальных по времени или расходу рабочего тела межорбитальных перелётах в системе Земля - Луна. Приведена используемая в диссертации математическая модель движения КА во вращающейся системе координат Земля - Луна.

Во второй главе приведена математическая модель пассивного движения КА в системе Земля - Луна в координатной безразмерной форме без и с учётом возмущений; приведены основные теоретические положения ограниченной задачи трёх тел, используемые в диссертации, описана общепринятая классификация периодических орбит.

В третьей главе сформулированы используемые в диссертации постановки задач о нахождении оптимального управления по критериям быстродействия, минимального энергопотребления и минимального расхода рабочего тела при перелётах КА с ЭРДУ между периодическими орбитами относительно точек либрации L1 и L2 системы Земля - Луна. Используются безразмерные уравнения управляемого движения КА с ЭРДУ в системе Земля - Луна в векторной форме с учётом расхода рабочего тела и возможности регулирования двигателя.

В четвертой главе описываются разработанные методики решения задач оптимизации и результаты их применения для проектирования перелетных траекторий и нахождения оптимальных законов программного управления и моделирования перелётов в окололунном пространстве. Автором проанализированы следующие транспортные задачи: перелёты между орбитами Ляпунова относительно L2; между гало-орбитами относительно L2; от орбиты Ляпунова к вертикальной орбите относительно L2; между орбитами Ляпунова относительно точек либрации L2 и L1; между гало-орбитами относительно точек либрации L2 и L1.

Новизна проведённых исследований заключается в следующем:

- 1) Разработана и проанализирована математическая модель движения КА с ЭРДУ в

околосолнечном пространстве с учётом возмущений от гравитации небесных тел Солнечной системы, нецентральности гравитационных полей Луны и Земли, особенностей движения Луны, светового давления. В рамках этой модели введена концепция инвариантных многообразий, допускающая использование теории динамических систем в оптимизации траекторий механики космического полёта с учётом гравитации Земли и Луны.

2) Разработана методика и программно-математическое обеспечение для расчёта оптимального номинального управления и соответствующих траекторий перелётов КА с ЭРДУ между периодическими орбитами относительно точек либрации L1 и L2 системы Земля – Луна. Особенность методики в том, что она не предполагает поиск начального приближения параметров, характеризующих схему перелёта, от значения которых, как правило, зависит сходимость используемых итерационных процессов.

Значимость результатов исследований для науки и практики

В ходе выполнения диссертации Ду Чунжуй получил следующие научные результаты:

1) Автор разработал метод анализа характеристик искусственных периодических орбит с определенными свойствами в окрестности точек либрации системы Земля – Луна для КА с ЭРДУ.

2) Автор разработал метод оптимизации траектории перелёта КА с ЭРДУ между периодическими орбитами в окрестности точек либрации ограниченной задачи трех тел. Метод основан на нескольких достаточно новых в механике космического полёта идеях. К ним я бы отнес следующие три идеи, или три метода:

- Метод гладкого продолжения по параметру. Этот метод автор использует очень широко, пожалуй, как ни один исследователь траекторий перелётов КА. Он продолжает полученное решение по тяге, по времени, по краевым условиям рассматриваемой транспортной задачи, продолжает решения задачи быстрого действия в решение задачи по минимуму энергии и минимуму требуемого топлива.
- Метод коллокаций. Этот метод автор довольно удачно использует при

анализе траекторий перелета между периодическими орбитами в окрестности точек либрации ограниченной задачи трех (в либрационной механике). Основная идея метода коллокаций заключается в дискретизации состояний и элементов управления непрерывной траектории. Этот метод позволяет свести задачу оптимального управления к задаче нелинейного программирования с конечным числом переменных и ограничений. Метод может иметь некоторые преимущества перед традиционными методами при решении краевых задач механики космического полета с небольшой угловой дальностью. Замечу, что метод используется в либрационной механике иностранными авторами, Но, если я не ошибаюсь, практически не используется российскими баллистиками.

- Метод инвариантных стабильных и нестабильных многообразий. Этот метод разработан в теории динамических систем. Он основан на анализе свойств возмущенных решений систем дифференциальных уравнений. Заслуга автора состоит в том, что он разобрался в этой теории и смог использовать её элементы для оптимизации траекторий перелета в либрационной механике. Отмечу, что этот метод не является традиционным для отечественных исследований.

Считаю, что подход автора к оптимизации траекторий в либрационной механике, может стимулировать более широкое внедрение идей используемого им метода в практику баллистических исследований.

3) Автор показал, что для перелётов КА с ЭРДУ между периодическими орбитами в окрестности точек либрации L1 и L2 системы Земля – Луна могут оказаться эффективными траектории, которые получены продолжением из траекторий, найденных на основе анализа инвариантных стабильных и нестабильных многообразий динамической системы, описывающей траектории перелета.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведённых в диссертации:

- 1) Разработанное программно-математическое обеспечение может использоваться

для формирования оптимальных схем перелета КА с ЭРДУ при перелётах между периодическими орбитами в системе Земля-Луна.

2) Полученные автором результаты при проектировании траекторий перелётов между периодическими орбитами в системе Земля-Луна могут применяться для баллистического проектирования реальных миссий:

- между орбитами Ляпунова относительно L_2 ;
- между гало-орбитами относительно L_2 ; от орбиты Ляпунова к вертикальной орбите относительно L_2 ;
- между орбитами Ляпунова относительно точек либрации L_2 и L_1 ;
- между гало-орбитами относительно точек либрации L_2 и L_1 .

Степень обоснованности и достоверности полученных в диссертации результатов

Достоверность полученных в диссертации результатов, выводов и заключений в определенной степени доказывается автором при переходе к более сложным математическим моделям, учитывающим возмущенное движение КА. Можно считать, что применение автором известных методов теории динамических систем, методов теории управления, методов механики космического полета (в частности, методов анализа ограниченной задачи трех тел), а также использование адекватных методов моделирования движения обуславливают достоверность полученных в диссертации результатов. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается и совпадением отдельных полученных соискателем результатов с известными результатами других авторов.

Результаты исследований Ду Чунжуй достаточно полно опубликованы в 7 статьях, с том числе в 3-х статьях в журналах, входящих в список ВАК, и 5-и статьях, входящих в базы Scopus и Web of Science. Результаты работы апробированы на 3-х международных научных конференциях.

Замечания по диссертационной работе

Рецензируемое диссертационное исследование включает анализ и решение очень большого числа проблем. Автор попытался описать сжато эти проблемы и методы их

решений, описать большое число найденных им траекторий перелета. При этом осталось много вопросов, которые вызвали большое число моих замечаний.

- 1) Я не согласен с определением прямых методов оптимизации, данных на странице 19 диссертации. Прямой метод необязательно «дискретизирует функции», как написано в диссертации. Например, в функциональном пространстве могут находиться вариации закона управления, и строится итерационный процесс в этом функциональном пространстве. Мне не нравится термин «косвенный метод». В выводах по главе 1 (стр. 22) утверждается, что в ней проведена классификация методов оптимизации. Классификация является очень непростой задачей. Я не могу согласиться, что она выполнена в этой главе.
- 2) На стр. 24 опечатка. Пропущен знак минус в предложении «Земля расположена в точке $(-\mu, 0, 0)$ ».
- 3) На стр. 36 на рисунке 2.8 приведены инвариантные многообразия в системе Земля-Луна и в окололунном пространстве. Было бы уместно дать пояснения, для каких орбит они построены. Дать соответствующую ссылку.
- 4) Стр. 52. Автор утверждает, что использует принцип *максимума*. Но находит оптимальное управление (направление вектора тяги и функцию тяги) из *минимума* гамильтониана. При этом оптимальное направление тяги оказывается противоположным базис-вектору (вектору, сопряженному вектору скорости). Другое название этого вектора – вектор Лоудена. Ошибки диссертант при этом не делает, так как выбирает соответствующий множитель у слагаемого, связанного с минимизируемой функцией в гамильтониане. Таким алгоритмом действительно пользуются некоторые иностранные исследователи, называя метод принципом *минимума*. Я не видел ни одной работы, где отечественные ученые направляли тягу против базис-вектора. Еще раз замечу. Что при этом автор работы не делает ошибки. Но на месте руководителя диссертанта я бы попросил аспиранта пользоваться принципом максимума Понтрягина.
- 5) Работу трудно читать из-за большого числа введенных аббревиатур. Я не понимаю, зачем использовать сокращение «ВП» вместо «время перелета». Или

«ТП» вместо «траектория перелета». Очень сомнительно, что это приводит к экономии бумаги, но то, что это затрудняет чтение и без того сложной работы это точно.

- 6) Уравнение (4.1), стр. 70. В равенстве справа написан один лишний минус. Равенство было бы правильным, если аспирант использовал принцип максимума, а не принцип минимума. Та же, как я полагаю, ошибка присутствует в равенстве (4.2) стр. 83.
- 7) Стр. 71. Рисунок 4.3. В тексте написано, что на рисунке «показана полученная оптимальная программа номинального управления». По-видимому, оптимальная программа это изменение направления тяги вдоль траектории перелета. Но её на рисунке нет.
- 8) На том же рисунке 4.3 на плоскости τ_1 - τ_2 показаны изолинии времени перелета. На ней красной линией показана граница допустимой области. В тексте отсутствует объяснение этой границы.
- 9) Страница 72. После нахождения оптимальных точки старта с начальной орбиты и точки выхода на конечную орбиту, использование которых позволило значительно (как я посчитал, на 17 процентов) уменьшить минимизируемое время перелета, автор делает неожиданный шаг. Он заявляет, что не будет оптимизировать при дальнейшем анализе положение этих точек, ссылаясь на то, что «точка старта может определяться не из условий оптимальности перелёта, а из конкретных технических требований к миссии». Объяснение странное. Конечно, требования существуют, и они ограничат возможный выбор характерных точек орбиты. Но тогда нужно анализировать проблему оптимизации с учетом этих ограничений. И разрабатываемый алгоритм должен позволить учесть ограничения. В рамках разработанного автором метода это вполне возможно.
- 10) В разделе 4.1.1 автор анализирует оптимальные по быстродействию многовитковые траектории. При этом переход на многовитковые перелеты увеличивает в рассматриваемой постановке время перелета, уменьшая требуемую тягу двигателя. При анализе представленного материала возникают

такие вопросы:

- Почему увеличение числа витков до 5 не привело к уменьшению требуемой тяги. Она увеличилась с 0.08 Н (при 2-х витковом перелете) до 0.09 Н. Какая-то ошибка?
 - Мне кажется, что увеличение числа витков траектории лучше анализировать при рассмотрении задачи с минимальным расходом топлива, а не в задаче быстрогодействия.
 - При переходе от одновитковой траектории к двух витковой, как я попытался оценить (было непросто, так как при анализе траектории, обозначенной ТП1, не приведено время перелета, стр. 70) масса требуемого топлива изменилась несильно (менее, чем на 1 кг). Для траекторий, оптимизируемых по минимуму топлива, выигрыш был очень значительным. Это объяснило бы целесообразность многовитковых перелетов, несмотря на увеличение времени перелета.
- 11) При анализе массы КА, доставляемого на конечную орбиту, автор пользуется безразмерной конечной массой. И демонстрирует нуль с несколькими девятками после запятой (стр. 75, 76). Анализировать такие числа сложно. Было более ясно, если автор оперировал или безразмерной массой топлива, или абсолютными значениями этой массы. Показывал, что требуемая масса за счет такого-то фактора уменьшилась во столько-то раз, или она уменьшилась с 23.7 кг до 9.3 кг.
- 12) Остается не понятным, почему при переходе между орбитами, анализируемым в разделе 4.2.1, не используются инвариантные многообразия? В тексте диссертации нет никаких пояснений. Диссертант попытался описать очень большое число исследованных им задач. Сделать это коротко и понятно читателю было бы сложно даже соискателю с родным русским языком. При чтении работы остаются вопросы, связанные не только с реализованным методом, но и отсутствием объяснения представленных зависимостей.
- 13) Анализ влияния на траекторию перелета возмущающих факторов автор уложил всего в две страницы. Автор рассмотрел только гравитационные солнечные возмущения при перелете с орбиты Ляпунову на гало-орбиту при фиксированной

тяге двигателя. Автору удалось показать, что учет солнечных возмущений приводит к изменению времени перелета на 0.2 суток (на 0.34%). Но после этого отмечать в выводах по главе (стр. 102), что: *«Влияние возмущений на траектории перелётов изменяется в зависимости от характеристик возмущающих факторов. Основное влияние учёт возмущений оказывает на увеличение длительности перелёта»* по-моему, неправильно. Первая фраза вообще ни о чем. Вторая вызывает сомнение. При этом в выводах по всей работе встречаем фразу (стр. 104): *«Возмущающими факторами нельзя пренебрегать при изучении динамики полёта КА в окололунном пространстве»*. Возникает вопрос: это из-за того время перелета изменяется на 0.34%?

На мой взгляд, анализ возмущений в «либрационной» механики это отдельная тема большой и непростой работы. Начинать его целесообразно с анализа эллиптической ограниченной задачи трех тел, Затем анализировать возмущающие факторы в этой задаче. Но это другое исследование, которое следует проводить в других диссертационных работах.

Проведенное диссертантом исследование дает возможность автору заявить, что для такой-то транспортной задачи, при таких-то характеристиках КА минимальное время перелета изменяется на 0.17%. И более ничего не добавлять в общих выводах.

Перечисленные замечания не влияют на общую положительную оценку большой, интересной и сложной работы диссертанта.

Соответствие автореферата и диссертации паспорту специальности

Область исследования диссертации соответствует п. 1 «Расчёт траекторий движения ЛА и орбит космических аппаратов (КА) по заранее известным данным», п. 2 «Баллистическое проектирование летательных аппаратов различного назначения» и п. 3 «Динамическое проектирование управляемых летательных аппаратов и исследование динамики их движения» паспорта специальности 2.5.16 - Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации, верно отражает

основные положения и выводы диссертационной работы. Однако следует отметить, что некоторые положения и результаты диссертации описаны в автореферате излишне кратко.

Заключение


Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему и выполнена автором на высоком научном уровне. Проведённые научные исследования можно характеризовать как научно обоснованные технические разработки, обеспечивающие оптимизации траекторий перелёта космических аппаратов с электроракетной двигательной установкой между периодическими орбитами в системе Земля-Луна.

Считаю, что рецензируемое диссертационное исследование отличается очень большим объемом (числом проанализированных проблем), использованием новых, не широко известных, нетрадиционных для механики космического полета идей, использованных и развитых в работе. Это позволяет утверждать, что автор работы имеет очень высокую квалификацию в механике космического полета, хорошо знаком с мировой литературой по анализируемой проблеме.

По актуальности, новизне, объёму, научной и практической ценности проведённых исследований диссертация отвечает требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней ВАК, а её автор Ду Чунжуй 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
e-mail: mkonst@bk.ru


13.02.2023

М. С. Константинов

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.