

О Т З Ы В

официального оппонента, д.т.н., доцента, профессора кафедры космического машиностроения имени генерального конструктора Д.И. Козлова Самарского национального исследовательского университета Стариновой Ольги Леонардовны на диссертационную работу Мина Тейна на тему: «Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук в диссертационный совет Д 212.125.12 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

1. Актуальность темы диссертации

Проблема разработки методов оптимизации траекторий межорбитальных переходов космических аппаратов (КА) с электроракетными и традиционными химическими двигательными установками (ЭРДУ и ХДУ) является актуальной с точки зрения повышения эффективности космических транспортных операций и исследовательских миссий. Особенно актуальна проблема оптимизации сложных многомаршрутных траекторий перелёта. Например, траектории межпланетного перелёта с последовательностью гравитационных манёвров или траектории геоцентрического движения с посещением нескольких рабочих орбит. Последний класс траекторий будет особенно востребован при решении задач инспектирования космических объектов, сборки крупногабаритных конструкций в космосе, уборки космического мусора.

Методическая база, разработанная диссертантом для оптимизации движения КА с ЭРДУ и ХДУ, обоснованно формируется в рамках последовательности задач двух тел, с учетом гравитационного влияния на КА одного притягивающего центра (Земли на геоцентрических участках движения и Солнца на гелиоцентрических) с учетом реального положения планет на заданную дату, возмущений от нецентральности гравитационного поля и атмосферы Земли. Как известно, данная проблема является сложной

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ 1
Вх. № 2
"7" 06 2018 г.

многоэкстремальной задачей, объединяющей выбор оптимальных программ управления, соответствующих им траекторий движения, параметров баллистической схемы перелёта (даты старта и завершения динамических манёвров, даты пролёта промежуточных небесных тел для совершения гравитационных манёвров) и проектных параметров космического аппарата и двигательной установки. Задачи оптимизации в такой постановке решалась ранее, однако, существующие методы позволяли находить только локальный минимум выбранного критерия, в то время как разрабатываемый автором диссертации подход направлен на получение глобальных экстремалей.

Кроме того, в работе совершенствуются численные методы оптимизации космических перелётов, в том числе разработаны алгоритмы, обеспечивающие сходимость итерационных процедур решения многоэкстремальных задач поиска оптимальной траектории. Автором диссертации показано, что разработанный численный метод эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы обладает хорошей сходимостью для широкого класса задач, что обеспечивает возможности анализа множества проектных и баллистических параметров космических транспортных и исследовательских аппаратов.

Этот факт подтверждает актуальность разработки методической базы, основанной на математических моделях управляемого движения, сформированных подходах к решению задачи оптимизации и вычислительных алгоритмах позволяющих с достаточной точностью рассчитать характеристики заданного перелёта.

2. Структура работы

Структура работы в целом замечаний не вызывает. В ней в логической последовательности раскрыты все основные вопросы темы. Рукопись диссертации включает в себя введение, шесть глав, объединяющих 33 параграфа, заключение и список литературы.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается непротиворечивой методологической платформой и взаимосвязанностью выводов. Структура диссертации соответствует заявленной теме, цели и задачам исследования, раскрывает его основные проблемы и выводы. Каждая из частей диссертации составляет органическое единство с другими частями. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые автором для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Предложенные автором решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

Во введении диссертации (с. 6-10) изложено обоснование актуальности и научной новизны темы исследования, приведены данные о степени ее научной разработанности. Определены объект и предмет, цели и задачи, а также методология исследования. Сформулированы научная новизна и положения, выносимые на защиту, приведены данные об апробации полученных научных результатов.

Первая глава диссертации (с. 11-79) посвящена общей характеристике проблем управления КА с ЭРДУ. В ней автором последовательно и системно приводятся методологические основы формирования программ оптимального управления и построения соответствующих им оптимальных траекторий движения многовитковых некомпланарных гео- и гелиоцентрических перелётов. Венцом данного раздела диссертации является разработанный автором на базе проведенных исследований метод эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы. На основе сравнительного анализа использования этого метода при решении краевых задач принципа максимума Понтрягина проанализирована эффективность

его использования в задаче оптимизации межпланетных перелётов КА с ЭРДУ.

Вторая глава диссертации (с. 80-106) представляет результаты исследования автором проблемы многовитковых межорбитальных перелётов КА с ЭРДУ при использовании метода эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы. В частности описывается математическая модель, описывающая движение КА с ЭРДУ на траектории некомпланарного межорбитального геоцентрического перелёта, методология формирования оптимального управления и численные методы гарантирующие получение решений. Приведены результаты численного решения задач перелёта между некомпланарными эллиптическими орбитами, в том числе с разворотом линии апсид, за минимальное время и при фиксированном времени перелёта.

В третьей главе диссертации (с. 107 – 140) рассматривается проблема оптимизации траекторий прямых гелиоцентрических перелётов космического аппарата с малой тягой при помощи метода эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы. В частности описана общая идея развития подхода к оптимизации траекторий КА, сформирована математическая модель для анализа и оптимизации траектории гелиоцентрического перелёта КА с ЭРДУ и приведены результаты оптимизации и анализа траекторий полётов Земля – Марс, Земля – Юпитер, прямого перелёта на гелиоцентрическую орбиту с низким перигелием и большим наклоном.

Четвертая глава диссертации (с. 141 - 194) посвящена оптимизации сложных схем межпланетных перелётов транспортных систем с химическими разгонными блоками при использовании метода эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы. Представлена постановка задачи оптимизации сложной схемы межпланетного перелёта как задачи поиска безусловного экстремума и, на

основе анализа единичного гелиоцентрического перелёта «планета – планета», разработана метод ее решения. С использованием данного метода проведен анализ сложных схем полета к астероиду TV135, Юпитеру, Сатурну и Плутону с гравитационными манёврами у Земли, Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна для КА с химическими ракетными двигателями. В частности, проведен сравнительный проектно-баллистический анализ маршрутов:

- Земля – Земля – астероид TV135,
- Земля – Земля – Юпитер,
- Земля - Марс - Земля – Юпитер,
- Земля – Венера – Земля - Марс - Земля – Юпитер,
- Земля – Венера – Земля - Земля – Юпитер,
- Земля – Юпитер – Сатурн, Земля – Земля – Юпитер – Сатурн,
- Земля – Венера – Венера – Земля – Юпитер – Сатурн,
- Земля – Венера – Венера – Земля – Юпитер – Сатурн – Плутон.

Пятая глава диссертации (с. 195-224) представляет результаты квазиоптимизации траекторий межпланетных перелётов КА с использованием малой тяги и пассивных гравитационных манёвров, не предусматривающих включения маршевого двигателя, к планете назначения или на рабочую гелиоцентрическую орбиту. Предложенная методика позволяет свести данную задачу к многоточечной краевой задаче принципа максимума Понтрягина. В этой главе приведены результаты численной оптимизации перелётов КА с ЭРДУ по маршрутом:

- Земля – Земля – Венера – Земля – Земля – Юпитер,
- Земля – Земля – Венера – первая рабочая орбита,
- Земля – Земля – Венера – Земля – Венера – первая рабочая орбита.

В шестой главе диссертации (с. 225 - 240) описывает методику решения проблемы и результаты поэтапной оптимизации межпланетных траекторий КА с малой тягой, химическим разгонным блоком и

гравитационными манёврами при использовании метода эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы. Автором предлагаются следующие этапы решения оптимизационной задачи:

- Первый этап. Вспомогательная задача. Оптимизация маршрута импульсного перелёта с цепочкой гравитационных манёвров.

- Второй этап. Оптимизация перелёта КА с ЭРДУ по выбранному из решения вспомогательной задачи маршруту с характерными датами, полученными при решении вспомогательной задачи.

- Третий этап. Сквозная оптимизация траектории перелёта КА с ЭРДУ по выбранному маршруту с оптимизацией характерных дат маршрута.

В заключении диссертации (с. 241-245) излагаются данные об основных результатах исследования и следующие из них выводы и предложения. Содержание работы свидетельствует, что диссертационное исследование выполнено Мин Тейном на высоком научном и практическом уровне, работа содержит ряд концептуально новых научных выводов.

3. Новизна проведенных исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна полученных в работе результатов заключается в следующем:

- Сформирована методическая база для решения задачи оптимального управления движением КА с ЭРДУ с помощью совместного использования необходимых условий оптимальности принципа максимума Понтрягина и численного метода оптимизации решения краевых задач, представляющего собой эволюционную стратегию с адаптацией ковариационной матрицы.

- Разработан устойчивый и регулярный с вычислительной точки зрения метод оптимизации многовитковых межорбитальных перелётов КА с ЭРДУ между некомпланарными орбитами не только при рассмотрении задачи оптимального быстрогодействия, но и для задачи минимизации затрат топлива при фиксированном времени перелёта, основанный на совместном

использовании условий оптимальности непрямого метода и эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы.

- Разработан устойчивый и регулярный метод решения задач траекторной оптимизации при рассмотрении прямых гелиоцентрических перелётов КА с идеально-регулируемой ЭРДУ и для КА с нерегулируемым двигателем на основе совместного использования необходимых условий оптимальности принципа максимума Понтрягина, и численного алгоритма эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы.

- Предложен подход к оптимизации траекторий КА с ЭРДУ, идея которого состоит в том, чтобы свести задачу оптимизации (в том числе краевую задачу принципа максимума Понтрягина) к задаче безусловного минимума вспомогательной функции, состоящей из суммы квадратов невязок краевой задачи принципа максимума Понтрягина и оптимизируемого критерия, взятого с весовым коэффициентом для получения глобального оптимума.

- Разработаны и описаны алгоритмы анализа и оптимизации сложных схем межпланетного перелёта КА к небесным телам Солнечной системы с использованием гравитационных манёвров у промежуточных планет и дополнительных импульсов скорости на гелиоцентрических участках перелёта с использованием метода эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы.

- Разработан трехступенчатый метод решения сквозной задачи оптимизации для сложных траекторий перелёта КА с ЭРДУ с совместным использованием полного набора условий оптимальности принципа максимума Понтрягина и метода эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы.

4. Значимость для науки и производства результатов, полученных автором диссертации

Значимость полученных автором результатов для науки вообще и прикладной научной дисциплины «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов», в частности, заключается в формировании методической базы для решения задачи оптимального управления движением КА с ЭРДУ с помощью совместного использования необходимых условий оптимальности принципа максимума Понтрягина и численного метода оптимизации, представляющего собой эволюционную стратегию с адаптацией ковариационной матрицы.

Использование этой методической базы позволило разработать эффективный метод оптимизации многовитковых некомпланарных межорбитальных перелётов КА с ЭРДУ не только при использовании в качестве критерия минимального времени перелёта, но и для задачи минимизации затрат топлива при фиксированном времени. В том числе данный метод показал свою применимость для решения задач траекторной оптимизации сложных схем межпланетных перелётов КА к небесным телам Солнечной системы с использованием гравитационных манёвров у промежуточных планет и дополнительных импульсов скорости на гелиоцентрических участках перелёта с использованием метода эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы.

Практическая ценность полученных результатов заключается в разработке методов и алгоритмов, позволяющих использовать в качестве методического обоснования программного обеспечения баллистического проектирования межпланетных перелётов, в том числе позволяющих разработчикам выбрать обоснованные параметры энергодвигательных установок, принимая во внимание многочисленные ограничения, возникающие на начальном этапе проектирования.

Апробация и внедрение результатов исследования осуществлялись на международных и российских научных и научно-практических конференциях, круглых столах, семинарах и симпозиумах. Основные научные результаты диссертационного исследования отражены в научных трудах автора. Публикации автора известны широкой научной общественности.

5. Соответствие паспорту специальности

Указанная область исследования соответствует паспорту специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, а именно пунктам: 1. Расчёт траекторий движения ЛА и орбит космических аппаратов (КА) по заранее известным данным, включая: моделирование движения аппаратов, систем управления полётом и действующих возмущающих факторов; разработку математического обеспечения вычислительных систем и комплексов для баллистического проектирования, оперативного управления полётом и баллистического обеспечения стрельб; 2. Баллистическое проектирование летательных аппаратов различного назначения, в том числе: исследование влияния физических условий внешней среды и технических характеристик носителей на баллистические характеристики КА космических систем, головных частей баллистических ракет, управляемых и неуправляемых ракет и снарядов ствольной артиллерии; разработка оптимальных алгоритмов баллистического проектирования и формулировка необходимых условий оптимизации.

6. Общие замечания по содержанию и оформлению диссертации

Диссертация является законченным научным трудом, выполненным самостоятельно и на высоком научном и методическом уровне. Изложение построено логично, грамотно и понятно. Однако следует отметить, что в диссертации и автореферате имеются опечатки в отдельных словах и

синтаксические ошибки, некоторые рисунки имеют низкое разрешение или качество, имеются мелкие символы (особенно в автореферате), некоторые предложения не согласованы.

Кроме того, необходимо отметить следующее:

1. Хотя в работе утверждается, что разработанные методы и алгоритмы поиска оптимального программного управления и соответствующих им траекторий движения являются регулярными и устойчивыми, строгое доказательство сходимости и устойчивости методов и алгоритмов отсутствует. В частности не определены области сходимости и устойчивости. Имеется только множество примеров решения отдельных задач и сравнение разработанных методов с известными, которое подтверждает эффективность и регулярность разработанных автором методов в частных случаях.

2. Разработанный диссертантом методический подход показал свою эффективность в решении сложных многоэтапных, многовитковых манёвров, рассматриваемых в рамках ограниченной задачи двух тел, однако представляется возможным использование данных методов и алгоритмов для перелётов с геоцентрических на селеноцентрические орбиты, а также в точки либрации системы Земля-Луна и на гало орбиты в окрестностях этих точек. В диссертации проверка работоспособности алгоритмов для оптимизации геоцентрических перелётов в рамках ограниченной задачи трех тел не проведена, что не позволяет оценить полноту и общность полученных решений в этом случае.

Отмеченные замечания не снижают научной и практической значимости работы и высокой положительной оценки диссертационного исследования. Оба замечания сформулированы в развитие темы и свидетельствуют не об ошибках автора, а о профессиональном интересе к его работе, комплексном и многогранном характере исследованных вопросов, перспективах научных изысканий, основу которых сформировал

диссертант, что делает диссертацию чрезвычайно ценной в научном и практическом отношении.

7. Заключение

Диссертация **Мина Тейна** представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой, на основании выполненных автором исследований, разработана совокупность аналитических и численных методов, позволяющих решить актуальную научную проблему, имеющую важное политическое и социальное значение, а именно проблему разработки методов оптимизации многомаршрутных траекторий межорбитальных, и, в частности, межпланетных перелётов с перспективными электроракетными двигательными установками.

Данная работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, что свидетельствует о личном вкладе автора в науку, в ней содержатся достаточные рекомендации по использованию научных выводов и полученных результатов, предложенные автором решения аргументированы и оценены по сравнению с известными решениями.

Диссертация оформлена в соответствии с Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (ред. от 28.08.2017), а также соответствует требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденного Приказом Минобрнауки России от 10.11.2017 № 1093 к оформлению диссертаций.

Материалы диссертации полно представлены в публикациях автора и известны широкой научной общественности и достаточно апробированы. Основное содержание, результаты, выводы и рекомендации диссертации отражены в 45 опубликованных работах автора, в том числе в одной монографии, опубликованной по теме диссертации, в десяти статьях опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях,

включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ и семи в иностранных рецензируемых изданиях.

В автореферате диссертации изложены основные идеи и выводы диссертационного исследования, показан вклад соискателя в разработку избранной темы, степень новизны и значимости результатов исследований, а также обоснована структура диссертации.

Работа соответствует специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, удовлетворяет требованиям ВАК, а ее автор, **Мин Тейн**, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры космического машиностроения
имени генерального конструктора Д.И. Козлова
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
"Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева"
(Самарский университет)

Старинова Ольга Леонардовна

Служебный адрес:

443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева" (Самарский университет)

e-mail: ssau@ssau.ru , сайт организации www.ssau.ru,

телефон: (846) 335-18-26

