



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»  
(АО «НПО Лавочкина»)



Ленинградская ул., д. 24, г. Химки,  
Московская область, 141402  
ОГРН 1175029009363, ИНН 5047196566

Тел. +7 (495) 573-56-75, факс +7 (495) 573-35-95  
e-mail: npol@laspace.ru  
www.laspace.ru

от 07 ИЮН 2018 № 517/12147  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Ученому секретарю  
диссертационного совета Д 212.125.12  
Московского авиационного института  
кандидату технических наук, доценту

А.В.Старкову

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,  
Волоколамское шоссе, д. 4, МАИ,  
Ученый совет МАИ

### ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Мина Тейна «Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

Диссертационная работа Мина Тейна «Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы» посвящена проблеме оптимизации траекторий при осуществлении сложных схем межпланетных и межорбитальных перелетов космических аппаратов (КА), оборудованных как традиционными химическими двигателями, так и электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ). В работе рассматриваются методы оптимизации траекторий межорбитального многовиткового перелета вокруг Земли и методы оптимизации траекторий межпланетного перелета, в том числе по схемам прямого перелета к некоторому небесному телу и сложными многомаршрутными траекториями с использованием гравитационных маневров.

При оптимизации траекторий межорбитального и межпланетного перелета, как правило, существует несколько экстремалей, но оптимальное решение соответствует глобальной экстремали. В настоящей работе предпринимается попытка совершенствования методов оптимизации в этом направлении и разработке алгоритмов, обеспечивающих надежную сходимость итерационных процедур, используемых при определении оптимальной траектории космического перелета. Реализация таких методов и алгоритмов в практике проведения транспортных операций с применением двигательных установок с малой тягой, но высоким удельным импульсом, позволит существенно повысить их эффективность, поэтому представляемая работа, безусловно, актуальна для развития ракетно-космической техники и освоения человечеством космического пространства.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. № \_\_\_\_\_  
"8" 06 2018 г.

В качестве основы совершенствования методов автором предложено применение нового численного метода безусловной оптимизации (СМАЕС), относящегося к группе метаэвристических методов и представляющего собой некоторую специфическую модификацию алгоритма эволюционной стратегии. Использование этого метода значительно повышает вероятность определения глобальной, а не локальной экстремали при траекторной оптимизации в механике космического полета.

Рассматриваемая диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованных источников. Диссертация содержит 265 страниц, 117 рисунков, 60 таблиц, 216 наименований использованных источников. Диссертация хорошо оформлена и снабжена достаточным количеством графических иллюстраций.

В структуре диссертационной работы можно выделить три взаимосвязанные части. В первой части дано описание не прямой методологии на основе совместного использования необходимых условий оптимальности и эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы. Она позволяет обходить трудности получения хорошего первого приближения в случае сведения задачи оптимального управления, решаемой итерационными методами, к краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Во второй части описаны прямое выведение КА с ЭРДУ на высокие рабочие орбиты, на рабочую гелиоцентрическую орбиту и прямые перелеты к небесному телу. Третья часть посвящена сложным схемам межпланетных перелетов КА с химическим разгонным блоком и с ЭРДУ.

Во **введении** изложена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, определены цели работы и решаемые в рамках рассматриваемой проблемы научно-технические задачи. Сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** описывается общая методология оптимизации, осуществляемая с одновременным использованием необходимых условий оптимальности и метода эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы (СМАЕС). Дано детальное описание метода СМАЕС, анализируется его эффективность по сравнению с другими методами решения краевой задачи принципа максимума, сформулированной в виде задачи минимизации суммы квадратов невязок краевых условий.

Во **второй главе** представлено решение задачи оптимизации траектории многовиткового перелета КА между некомпланарными орбитами. Критерием оптимизации выбирается или минимизируемое время выполнения космического маневра, или минимизируемое моторное время при фиксированном времени выведения. Подробно проанализирована типовая транспортная операция выведения КА на геостационарную орбиту с низкой околоземной орбиты высотой 200 км и наклоном  $51.6^\circ$ .

В **третьей главе** рассматривается задача оптимизации траекторий прямых гелиоцентрических перелетов КА с ЭРДУ. Представлены численные результаты трех ее вариантов – оптимизации перелета к Марсу, Юпитеру и на рабочую гелиоцентрическую орбиту с целью исследования Солнца.

В **четвертой главе** дан анализ сложных схем межпланетных перелетов КА с химическими двигательными установками к небесным телам Солнечной системы (Юпитеру, Сатурну, Плутону, астероиду TV135) с использованием нескольких гравитационных маневров у промежуточных планет (Венеры, Земли, Марса, Юпитера, Сатурна) и дополнительных импульсов скорости на гелиоцентрических участках перелета. Описаны разработанные алгоритмы анализа и оптимизации таких перелетов.

В **пятой главе** сформулирована задача оптимизации траектории межпланетных перелетов КА с ЭРДУ к планете назначения или на рабочую гелиоцентрическую орбиту с пассивными гравитационными маневрами. Сложность решения многоточечной краевой

задачи, к которой сводится упомянутая выше задача, преодолевается с помощью решения вспомогательной задачи импульсного перелета. Полученное решение автор называет квазиоптимальным из-за пренебрежения некоторыми условиями оптимальности. Представлены численные результаты оптимизации и основные характеристики траекторий перелета КА с ЭРДУ к Юпитеру и на систему гелиоцентрических орбит посредством транспортной системы «Союз» и «Фрегат» с целью исследования Солнца.

В **шестой главе** описывается подход к оптимизации межпланетных траекторий КА с ЭРДУ и гравитационными маневрами за счет использования полного набора условий оптимальности принципа максимума и СМАЕС. С использованием этого подхода проанализированы траектории перелета КА с ЭРДУ к Юпитеру с несколькими гравитационными маневрами у промежуточных планет.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Достоверность результатов подтверждается приведением автором большого количества результатов оптимизации траекторий межпланетных и межорбитальных перелетов для различных космических проектов и сравнением собственных решений с результатами, опубликованными другими авторами.

Эффективность методического подхода, разработанного автором подтверждается решением двух задач оптимизации межпланетного перелета к Марсу для КА с ЭРДУ, представляющими собой решения тестовых задач.

Приведенные результаты сложных схем межпланетного перелета к Юпитеру, выведения солнечного зонда, многовитковых межорбитальных перелетов интересны с точки зрения получаемых массовых и энергетических характеристик, оптимальных схем полета, оптимальных законов управления движением КА. Решения этих задачи служат доказательством корректности проведенного автором анализа и моделей, используемых им для описания оптимальной траектории перелета, а также подтверждением работоспособности предложенной им методики.

При проведении исследований использованы строгие математические формулировки и эффективные методы оптимизации траекторий.

К новым научным результатам диссертационных исследований можно отнести следующие:

1. Разработана новая методическая база, применимая для решения задачи оптимального управления движением КА с ЭРДУ и заключающаяся в совместном использовании условий оптимальности принципа максимума и численного метода оптимизации, совмещающего эволюционную стратегию с адаптацией ковариационной матрицы.
2. Разработан метод оптимизации многовитковых межорбитальных перелетов КА с ЭРДУ между некомпланарными орбитами, который обеспечивает хорошую сходимость. Метод основан на применении необходимых условий оптимальности принципа максимума и на эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы.
3. Разработан метод оптимизации сложных схем межпланетного перелета КА с ЭРДУ, в котором использован полный набор условий оптимальности принципа максимума и который заключается в решении вспомогательной задачи (она сформулирована как задача безусловной оптимизации межпланетного перелета с активными гравитационными маневрами и импульсами скорости на траекториях гелиоцентрического перелета).
4. Разработана методика, позволяющая проводить анализ и оптимизацию сложных схем межпланетного перелета КА, оборудованного традиционными двигательными

установками и осуществляющего гравитационные маневры у промежуточных планет, с использованием импульсов скорости на гелиоцентрических участках перелета. Методика основана на применении эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы.

5. Предложено при оптимизации траекторий КА с ЭРДУ сведение задачи оптимизации, сформулированной в виде краевой задачи принципа максимума, к задаче безусловного минимума некоторой функции, выражаемой суммой квадратов невязок краевой задачи принципа максимума и оптимизируемого критерия, взятого с весовым коэффициентом.

Практическая значимость диссертации заключается в получении следующих результатов:

- Разработанная методика и общий подход к решению задач оптимизации траекторий межпланетного и межорбитального перелета КА с ЭРДУ может применяться при решении различных задач баллистического проектирования транспортных космических систем, высокоорбитальных и межпланетных КА.
- Алгоритмы, разработанные на основе предложенной методики, могут использоваться при проектировании межпланетных и межорбитальных перелетов КА с двигателями малой тяги.
- Анализ решений большого количества транспортных космических задач, полученных автором, позволяет использовать свойства оптимальных траекторий перелета при проектировании перспективных транспортных космических систем.

Материалы полученных в диссертационной работе результатов опубликованы в 45-ти научных работах, в том числе в одной монографии, в 10-ти научных работах в журналах из Перечня ВАК Минобрнауки РФ и в 7-ми научных работах в журналах, которые входят в международные базы данных Scopus и Web of Science.

В качестве замечаний к работе можно отметить следующие:

1. Рассматриваемые задачи оптимизации перелетных траекторий исследуются в рамках математической модели, учитывающей только центральное (ньютоновское) гравитационное поле. Не проведена оценка влияния возможных возмущающих воздействий на движение центра масс КА на результаты решения оптимизационной задачи.
2. При описании прямого перелета КА с ЯЭРДУ к Юпитеру и прямого выведения КА на гелиоцентрическую рабочую орбиту не приведена информация о приемах, с помощью которых автор получил такое большое количество экстремалей. Осталось неясным, существуют ли какие-то другие экстремали.
3. Не проведен анализ степени влияния ошибок отработки программ управления ориентацией вектора тяги на точность требуемых параметров конечной орбиты.
4. В первой главе диссертации при описании проведения сравнительного анализа и таблиц, подтверждающих эффективность предлагаемого метода, имеют место излишние повторения.

Отмеченные недостатки не снижают качество исследований и не влияют на главные теоретические и практические результаты работы.

Название диссертационной работы отражает ее содержание, представленные в ней материалы и результаты достаточно полно отражены в научных публикациях соискателя.

Автореферат соответствует основным положениям диссертационной работы, правильно отражает её содержание и полученные результаты.

## Заключение

Диссертационная работа Мина Тейна «Оптимизация траекторий космических аппаратов с использованием эволюционной стратегии с адаптацией ковариационной матрицы» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема, имеющая важное значение для повышения эффективности космических транспортных систем с двигательными установками малой тяги при реализации межорбитальных и межпланетных перелетов. Научная новизна и практическая ценность работы соответствуют требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 N 842 (ред. от 28.08.2017 N 1024), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а её автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

## Официальный оппонент

доктор технических наук,  
заместитель начальника отдела

А. Е. Назаров

Подпись официального оппонента  
доктора технических наук Назарова Анатолия Егоровича заверяю

Заместитель генерального  
директора по персоналу



М.В. Данильченко

Полное название организации: Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» (АО "НПО Лавочкина")

Почтовый адрес: 141402, РФ, г. Химки, Московская область, Ленинградская ул., д. 24.

Телефон: +7 (495) 573-56-75

Официальный сайт: <http://www.laspace.ru/>

Электронная почта: [npol@laspace.ru](mailto:npol@laspace.ru)