



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,
ИНН 6316000632, КПП 631601001

17 ОКТ 2023

№ 104-5346

На № _____ от _____

Председателю
диссертационного совета 24.2.327.03,
созданного на базе
Московского авиационного института
(национального исследовательского
университета)

д.т.н., проф. В.В. Малышеву

Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993

Уважаемый Вениамин Васильевич!

Высылаю отзыв ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на диссертационную работу Юн Сон Ук «Оптимизация траекторий космического аппарата с электроракетной двигательной установкой при наличии возмущающих ускорений», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки).

Приложение: отзыв в 2-х экз., на 6 листах каждый.

Первый проректор – проректор
по научно-исследовательской работе

Прокофьев А. Б.

Исп. Старинова О. Л.
+7 (846) 267-45-04

Отдел документационного
обеспечения МАИ

Вх № _____
« 24 » 10 2023



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,
ИНН 6316000632, КПП 631601001

УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор –
проректор по научно-
исследовательской работе
доктор технических наук, доцент


А. Б. Прокофьев

17 ОКТ 2023

№ 104-5376

На № _____ от _____



«17» октября 2023 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ,
федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»,
на диссертационную работу Юн Сон Ук
«Оптимизация траекторий космического аппарата с электроракетной
двигательной установкой при наличии возмущающих ускорений»,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических
наук по научной специальности 2.5.16. Динамика, баллистика,
управление движением летательных аппаратов (технические науки)**

Применение электроракетных двигательных установок (ЭРДУ), благодаря их высокому удельному импульсу тяги, позволяет существенно повысить эффективность космических транспортных операций. ЭРДУ уже широко используются для реализации многих прикладных и научных космических проектов, а в обозримой перспективе область применения ЭРДУ будет расширяться. Однако, практическое использование ЭРДУ сопряжено с рядом проблем, основным источником которых является малое значение тяги, достижимое при современном уровне научно-технического развития. Тяга ЭРДУ ограничена, в основном, величиной электрической мощности, доступной на борту космического аппарата (КА). На современных и перспективных КА характерная величина реактивного ускорения, обеспечиваемого ЭРДУ, составляет доли мм/с². Из-за малой величины реактивного ускорения, для обеспечения требуемого приращения характеристической скорости требуется длительная работа ЭРДУ, что приводит к существенному усложнению задачи проектирования траекторий

Удел документационного
обеспечения МАИ

«24» 10 2023

КА с ЭРДУ. Более того, величина реактивного ускорения при использовании ЭРДУ часто оказывается сравнимой или даже меньшей, чем величины типичных возмущающих ускорений, действующих на КА в процессе полёта. Например, на низких околоземных орбитах возмущающее ускорение от второй зональной гармоники геопотенциала в типичных случаях на 2-3 порядка величины превышает управляющее реактивное ускорение ЭРДУ. На длительных временах перелёта, характерных для использования ЭРДУ, существенное влияние на траекторию могут оказывать возмущающие ускорения от притяжения удалённых небесных тел, светового давления и аэродинамических сил.

Задача оптимизации траекторий КА с ЭРДУ является необходимым элементом проектно-баллистического анализа по двум, по крайней мере, причинам.

Во-первых, оптимизация траекторий позволяет достичь максимальной эффективности проектируемой космической миссии в смысле обеспечения, например, минимальной длительности перелёта или минимальных затрат топлива на перелёт.

Во-вторых, для корректного сравнения влияния вариации основных проектных параметров КА на показатели эффективности космической миссии, это сравнение необходимо делать в одинаковых условиях, что возможно обеспечить только в том случае, если для каждого рассматриваемого набора проектных параметров КА рассматриваются оптимальные траектории перелёта.

В настоящее время существует достаточно развитая теория оптимальных перелётов КА с малой тягой, известны и используются на практике различные методы оптимизации траекторий КА с малой тягой. Однако проблемы обеспечения вычислительной устойчивости, сходимости, выбора начального приближения, обеспечения требуемой точности и вычислительной производительности, в большей или меньшей степени, остаются актуальными практически для всех известных методов. Учёт влияния возмущающих ускорений при оптимизации траекторий КА с ЭРДУ остаётся очень сложной задачей, особенно при использовании сложных алгоритмов вычисления этих возмущающих ускорений, необходимых для достижения высокой точности математического моделирования траектории.

Все перечисленное выше позволяет утверждать, что тема диссертации Юн Сон Ук является **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и приложения общим объёмом 195 страниц.

Основной целью диссертационной работы Юн Сон Ук является повышение эффективности космических транспортных операций. Для её достижения в работе решены задачи разработки новых подходов к оптимизации возмущённых траекторий КА с фиксированной угловой дальностью и свободным временем перелёта и автоматизации процесса вычисления оптимальной траектории КА с двигателем ограниченной тяги; методик диагностики существования решения в задаче минимизации затрат топлива, оптимизации возмущённых многовитковых траекторий межорбитальных перелётов КА с использованием алгебры комплексных дуальных чисел, вычисления оптимальных траекторий перелёта к Луне с малой тягой с учётом притяжения Земли, Луны и Солнца на всех участках траектории, оптимизации гелиоцентрических траектории с малой тягой, между коллинеарными точками либрации планет отправления и прибытия.

Научная новизна диссертационной работы Юн Сон Ук заключается в следующем:

1) Разработан новый метод оптимизации возмущённых траекторий с малой тягой на основе использования комплексных дуальных чисел для автоматического вычисления производных при использовании высокоточных моделей возмущающих ускорений. Комплексные дуальные числа были применены для автоматического вычисления смешанных вторых производных от возмущающих ускорений по фазовому вектору и начальным значениям сопряжённых переменных и позволили радикально сократить трудоёмкость подготовки математической модели, необходимой для оптимизации возмущённой траектории с использованием принципа максимума Понтрягина, метода продолжения и сложных алгоритмов вычисления возмущающих ускорений.

2) Рассмотрен новый подход к оптимизации многовитковых траекторий КА с ЭРДУ с использованием угловой переменной – вспомогательной долготы – в качестве новой независимой переменной вместо времени, который позволил улучшить сходимость и вычислительную устойчивость процесса оптимизации траектории.

3) Предложен процесс автоматизации вычисления оптимальной траектории с двигателем с заданной тягой и удельным импульсом, не требующий задания начальных приближений для неизвестных параметров краевой задачи. Разработана методика последовательного решения задач

перелёта с идеально-регулируемым двигателем ограниченной мощности, с минимальной и заданной ограниченной тягой с использованием пассивного движения КА в качестве начального приближения при расчёте оптимальной траектории.

4) Предложен подход к решению задачи сквозной оптимизации траекторий перелёта КА с малой тягой между околоземной и окололунной орбитами на основе использования канонического преобразования, с учётом притяжения Земли, Луны и Солнца на всех участках траектории.

5) Предложен новый подход к оптимизации межпланетных траекторий с малой тягой с использованием коллинеарных точек либрации для стыковки планетоцентрических и гелиоцентрических участков траектории.

6) С помощью разработанной методики решения возмущённых задач оптимизации, рассчитаны типовые оптимальные траектории и проведён качественный анализ полученных численных результатов.

Полученные в работе результаты (подходы, методики, численные результаты) могут применяться на предприятиях, разрабатывающих и эксплуатирующих космическую технику, для проектно-баллистического анализа и оперативного планирования перспективных космических транспортных операций, включая перелёты между околоземными орбитами, к Луне и межпланетные перелёты КА с ЭРДУ, что определяет **практическую значимость** диссертации.

Достоверность и обоснованность результатов работы определяется использованием строгих математических методов и известных теоретических подходов к решению рассматриваемых задач (таких как принцип максимума, метод продолжения) и сравнением результатов, полученных по разработанным автором методикам, с известными результатами других исследователей.

Результаты диссертационной работы представлены последовательно и логично. Однако, к содержанию диссертации имеется ряд следующих **замечаний**:

1. В разделах 4.1-4.2 автор рассматривает в качестве возмущающих ускорения от гармоник геопотенциала до 4-го порядка и 4-ой степени, притяжения Луны и Солнца. Возмущающие ускорения за счёт приливных сил от Луны и Солнца в работе не рассматриваются, хотя их величина сравнима с учтёнными возмущающими ускорениями, особенно для перелётов между низкими околоземными орбитами (раздел 4.2.3).

2. В разделах 5.1-5.3 автор рассмотрел задачу оптимизации траектории перелёта космического аппарата с малой тягой к Луне со стыковкой геоцентрического и селеноцентрического участков в точке либрации L_1 системы Земля-Луна. Ряд современных исследований траекторий перелёта к Луне с малой тягой показывает, что энергетические характеристики лунных траекторий могут быть улучшены при включении в траекторию участков движения по инвариантным многообразиям точек либрации или периодических орбит вокруг них. В диссертации не рассмотрена задача оптимизации траекторий с участками движения по инвариантным многообразиям, за исключением численных примеров, приведённых в разделе 5.1 при проведении сравнения траекторий с минимальной тягой и квазиоптимальным управлением.

3. В разделе 6 диссертации автором проводится сравнение оптимальных гелиоцентрических траекторий между точками либрации с учётом притяжения Солнца и планет с оптимальными гелиоцентрическими траекториями, полученными с применением метода точечных сфер действия. Проведённый анализ был бы более полным, если бы были рассмотрены межпланетные траектории, включающие кроме гелиоцентрического участка планетоцентрические участки перелёта. В первом случае – это манёвры достижения соответствующих точек либрации и перехода на целевую планетоцентрическую орбиту, во втором случае - участки выхода из сферы действия Земли и формирования заданной целевой орбиты от момента входа в сферу действия планеты назначения.

4. В разделе 6.2 не приведены результаты расчёта гелиоцентрических траекторий к точкам либрации Юпитера и Сатурна с оптимальной датой отлёта, хотя ссылки на эти расчёты имеются.

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и могут рассматриваться как рекомендации по проведению дальнейших исследований.

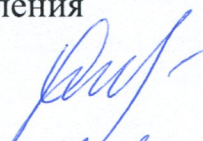
Результаты рассмотрения диссертационной работы Юн Сон Ук позволяют сделать следующие **выводы**: содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки). В диссертации приведены решения поставленных актуальных научно-технических задач, имеющие научную новизну и практическую значимость. Диссертационная работа Юн Сон Ук является самостоятельным и законченным исследованием.

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 статьях, 4 из которых – в изданиях, входящих в список ВАК Минобрнауки России или входящих в международные реферативные базы данных (МРБД) и 3 – в иностранных рецензируемых изданиях, входящих в системы цитирования Web of Science и Scopus. Полученные в диссертационной работе результаты обсуждались на 9 российских и международных конференциях, а также на научных семинарах механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и кафедры «Космические системы и ракетостроение» МАИ. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертация «Оптимизация траекторий космического аппарата с электроракетной двигательной установкой при наличии возмущающих ускорений» отвечает критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук (пп. 9–11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней), соответствует научной специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки), а её автор – Юн Сон Ук заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Отзыв на диссертацию заслушан и утверждён на заседании кафедры динамики полёта и систем управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», протокол № 3 от «12» октября 2023 года.

Заведующий кафедрой
динамики полёта и систем управления
Самарского университета,
д.т.н., доцент



Старинова Ольга Леонардовна

12.10.2023

Полное наименование:
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»
Сокращенное наименование:
Самарский университет
443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34.
тел.: + 7 (846) 335-18-26,
ssau@ssau.ru.

С отзывом ознакомлен

24.10.2023

 Юн Сон Ук