

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

«УТВЕРЖДАЮ»

Руководитель научно-учебного  
комплекса

«Специальное машиностроение»

МГТУ им. Н.Э. Баумана,

д.т.н., профессор Калусин В.И.

« 13 »

2023

### ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Юн Сон Ук

на тему: «Оптимизация траекторий космического аппарата с электроракетной  
двигательной установкой при наличии возмущающих ускорений»,  
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности 2.5.16 – «Динамика, баллистика, управление движением  
летательных аппаратов»

Диссертационная работа посвящена разработке методики оптимизации возмущённых траекторий управляемого движения космических аппаратов (КА) с электроракетными двигательными установками (ЭРДУ) и её применению к численному решению ряда задач: оптимизации многовитковых межорбитальных перелётов КА между околоземными орбитами различных типов, перелётов между околоземной и окололунной орбитами, перелётов между точками либрации  $L_2$  системы Земля-Солнце и  $L_1$  системы планета назначения-Солнце.

**Актуальность темы** исследования обусловлена перспективностью применения ЭРДУ, обладающих высоким удельным импульсом, для реализации различных транспортных операций в космическом пространстве, требующих значительных энергетических затрат. Большая продолжительность манёвров, осуществляемых с помощью ЭРДУ, приводит к необходимости учёта влияния возмущающих факторов при оптимизации

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«13» 11 2023



соответствующих траекторий движения КА. В связи с чем методики решения задач оптимизации траекторий перелётов КА с ЭРДУ, позволяющие учитывать высокоточные модели возмущающих ускорений, представляют большой интерес для проектно-баллистического анализа перспективных КА.

Для решения задач оптимизации возмущённых траекторий КА с ЭРДУ в работе предлагается методика, основанная на применении принципа максимума Л.С. Понтрягина и метода продолжения. Применение принципа максимума к рассматриваемым в работе задачам приводит к ряду существенных вычислительных сложностей, одной из которых является точное вычисление производных возмущающих ускорений по фазовым координатам при расчёте правых частей дифференциальных уравнений для сопряженных переменных. Применение метода продолжения также требует точного численного дифференцирования – для определения первых производных от вектора невязок краевой задачи принципа максимума по её неизвестным параметрам. Кроме того, известную сложность в применении принципа максимума представляет выбор начального приближения для решения его краевой задачи. В работе автором предлагаются методы, позволяющие разрешить обозначенные проблемы для рассматриваемых задач оптимизации траекторий КА.

**Научная новизна** работы, исходя из текста автореферата, заключается в следующем:

- разработана методика оптимизации возмущенных траекторий движения КА на основе использования автоматического дифференцирования с применением комплексных дуальных чисел;
- рассмотрена новая постановка задачи оптимизации многовитковых траекторий КА с ЭРДУ с использованием вспомогательной долготы в качестве независимой переменной;
- предложен подход к автоматизации вычисления оптимальной траектории КА с двигателем с заданными величинами тяги и удельного импульса, основанный на предварительном решении задачи оптимизации траектории КА с идеально-регулируемым двигателем и применении к полученному решению метода продолжения;
- разработана методика решения задачи сквозной оптимизации траекторий перелета КА к Луне со стыковкой геоцентрического и



селеноцентрического участков на основе использования канонического преобразования;

– предложен подход к оптимизации возмущённых межпланетных траекторий перелётов КА с ЭРДУ со стыковкой планетоцентрических и гелиоцентрического участков траектории в точках либрации соответствующих систем небесных тел.

**Практическая значимость** работы состоит в возможности использования разработанной методики и подходов к задачам проектно-баллистического анализа траекторий перелётов КА с ЭРДУ в рамках задач их выведения на высокие околоземные орбиты, в рамках лунной программы и перспективных межпланетных миссий.

**Достоверность** представленных автором результатов подтверждается сравнением решений, полученных с применением разработанных в диссертации методов, с известными результатами других авторов. Обоснованность результатов обеспечивается применением строгих математических методов и известных фундаментальных подходов к решению задач оптимизации.

Работа прошла достаточную апробацию в рамках докладов на российских и международных конференциях. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, а также в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных.

В качестве замечаний к тексту автореферата следует отметить:

1. Согласно данным, представленным в таблице 3, для рассматриваемых расчётных случаев ОТ-задачи затраты характеристической скорости на перелёты между точками либрации меньше затрат на гелиоцентрический участок перелёта, соответствующий решению с использованием метода ТСД, на величины от 7,2% до 14,2%. В абзаце, предшествующем таблице 3, указывается различие «8-22%». Для полноценной оценки эффективности предложенной автором схемы межпланетных перелётов необходимо провести её сравнение по суммарным затратам характеристической скорости с результатами, полученными с применением метода ТСД, определив затраты на участки перелёта с начальной околоземной орбиты в точку либрации ESL2 и из точки либрации ESL2 в точку либрации L1 системы планета назначения – Солнце.



2. В тексте автореферата не раскрыты в полной мере преимущества рассматриваемой постановки задачи с фиксированной угловой дальностью и свободным временем перелёта. Они упоминаются только в третьем дефисе в Заключении, из текста которого не ясно, что подразумевается автором под «однотипными семействами траекторий».


3. Отсутствуют пояснения к условным обозначениям  $r_1^*$ ,  $p_r$ ,  $p_v$  (формулы (16) и (17) соответственно).

4. К тексту имеется ряд редакционных замечаний, например: «... между различными системами координатами» (с. 5), « $\delta = 1$  при включенной ЭРДУ и  $\delta = 0$  при включенной ЭРДУ» (пояснение к формуле (1), с. 7).

Указанные замечания не снижают высокую оценку выполненной соискателем работы, её научную и практическую ценность.

**Вывод:** Судя по материалам автореферата, диссертация Юн Сон Ук является завершённой научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и содержащей решение актуальной научной задачи, имеющей большую практическую значимость для реализации перспективных космических миссий с использованием ЭРДУ. Работа соответствует требованиям п. 9-11 Положения о присуждении учёных степеней, а её автор – Юн Сон Ук заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Доцент кафедры «Динамика и управление полётом ракет и космических аппаратов», кандидат технических наук



08.11.2023

Кириллук  
Елена  
Владимировна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Почтовый адрес: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, дом 5, строение 1  
Тел.: +7 (499) 263-65-12

Адрес электронной почты: bauman@bmstu.ru

