

10.02.2020 №1103-9422/98

Ученому секретарю диссертационного  
совета Д212.125.12 Федерального  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский  
университет)» (МАИ)

к.т.н. А.В. Старкову

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,  
Волоколамское шоссе, д. 4, МАИ,  
отдел Ученого и диссертационных советов

Уважаемый Александр Владимирович!

Направляю Вам отзыв официального оппонента Ивашкина В. В.  
на диссертационную работу Старченко Александра Евгеньевича на тему  
«Траектории многовитковых перелетов космических аппаратов  
с минимальной радиационной нагрузкой», представленную на соискание  
ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 –  
«Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Приложение: отзыв на 6 л. в 2 экз.

Ученый секретарь  
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН,  
к.ф.-м.н.



А.И. Маслов

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

Вх. № 10 02 2020

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Старченко Александра Евгеньевича «Траектории многовитковых перелетов космических аппаратов с минимальной радиационной нагрузкой», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

Диссертация А.Е. Старченко посвящена задаче оптимизации траекторий многовитковых перелетов космических аппаратов (КА) с электроракетными двигательными установками (ЭРДУ) с целью снижения интегрального воздействия космической радиации на бортовые системы. Автором предложен и использован для решения данной задачи подход, основанный на принципе максимума Понтрягина Л.С. с функционалом, определяющим это воздействие радиации. Разработаны методика и алгоритмы решения задачи, они применены к задаче оптимизации выведения КА на геостационарную орбиту для случаев солнечной и ядерной ЭРДУ. В работе приведены характеристики полученных траекторий КА. Сделан анализ эффективности разработанного метода снижения радиационной нагрузки на бортовые системы КА, его солнечные батареи.

**Актуальность** работы определяется все увеличивающимся масштабом применения ЭРДУ для околоземных космических операций, с одной стороны, и заметным влиянием космической радиации на системы КА при длительном его прохождении через пояса радиации при использовании ЭРДУ с малой тягой, с другой стороны. Это приводит к необходимости учитывать данный фактор при проектировании траекторий КА, что было сделано, например, в проекте ESA "SMART-1" для полета к Луне. Исследование данной задачи с помощью оптимизации траектории с минимизацией суммарной радиационной нагрузки на КА позволяет

математически корректно решить данную проблему с поиском пределов возможности уменьшения этой нагрузки за счет баллистических резервов.

**Научная методология исследования.** Автор решает задачу методами математического моделирования. При этом оптимальная траектория, для которой минимальна суммарная радиационная нагрузка, получается непрямими методами. В качестве основы своего метода анализа автор использует принцип максимума Понтрягина Л.С. Автор выписывает систему дифференциальных уравнений управляемого движения КА с учетом возмущения от сжатия Земли при заданных начальной и конечной орбитах, затем добавляет к ним уравнение для определения радиационной нагрузки  $Q(t)$ , значение которой в конечный момент  $T$  есть суммарная характеристика радиации  $Q_T$ . Автор сначала анализирует два возможных подхода: минимизация нагрузки  $Q_T$  при заданном времени перелета  $T$  и минимизацию времени  $T$  при заданном значении нагрузки  $Q_T$ . Последний подход и принимается для основной части анализа. При этом для начальных данных без ограничения на  $Q_T$ , т.е. в задаче без учета радиационной нагрузки, имеем данные из более простой задачи на быстроедействие. Для решения краевой задачи в общем случае применяется метод продолжения по параметру, метод Левенберга-Марквардта, модифицированный метод Ньютона. Так как ввиду малости тяги КА совершает при перелете много витков, для улучшения устойчивости решения задачи применяется метод осреднения правых частей уравнений. На основе данного методического подхода автор разработал алгоритм решения задачи в довольно универсальной форме и сложный программно-вычислительный комплекс, который был применен к решению ряда актуальных задач.

**Основное содержание, результаты работы.** Диссертация состоит из Введения, трех Глав, Заключения, списка сокращений, обозначений и списка литературы. В I-ой главе диссертации А.Е. Старченко разработана кратко описанная выше универсальная методика решения задачи оптимизации

многовитковых перелетов КА с ЭРДУ на ГСО при минимизации радиационной нагрузки на бортовую аппаратуру КА. При этом используется принцип максимума Л.С. Понтрягина и метод осреднения движения. Отдельно рассмотрен случай околокругового движения КА во время перелета на ГСО. В этом случае радиальная составляющая тяги равна нулю, управление осуществляется только углом рыскания. Во II-ой главе изложена разработанная автором методика численного расчета радиационных функционалов и их производных для применения в оптимизации траекторий, осуществляемой по методике I главы. Для преодоления возникающих сложностей и повышения гладкости функций автор здесь также использует осреднение функционалов. В III-ей главе для двух задач изложены численные результаты оптимизации траекторий многовитковых перелетов с ЭРДУ на ГСО на основе методик первых двух глав, сделан анализ полученных численных результатов. В первой задаче сделана оптимизация траектории перелета многоразового электроракетного буксира с низкой круговой орбиты на ГСО с целью снижения дозы радиации чувствительным элементом на буксире. При этом предполагается, что необходимая для ЭРДУ энергия генерируется бортовой ядерной установкой. Рассмотрено семь вариантов начального наклона, от 5 до 78 градусов. Показана возможность уменьшения накопленной дозы радиации при некотором увеличении характеристической скорости перелета по сравнению с траекторией оптимального быстрого действия. Во второй задаче рассмотрена оптимизация траектории многовиткового перелета с высокоэллиптической промежуточной орбиты на ГСО. При этом предполагается, что необходимая энергия генерируется солнечными батареями. Здесь рассмотрено 15 вариантов начальной орбиты, отличающихся параметрами орбиты и массой КА. В результате решения задачи оптимизации также удалось получить некоторый выигрыш в конечной мощности солнечных батарей, т.е. уменьшить деградацию их мощности. После решения нескольких важных и сложных задач оптимизации автором сделан анализ полученных результатов.

Оценивая выполненную автором работу, можно сделать вывод, что автором получены следующие **новые результаты**:

1. Автор разработал общую методику оптимизации траекторий многовитковых перелетов КА с ЭРДУ на основе принципа максимума Понтрягина Л.С. и осреднения управляемого движения для снижения воздействия космической радиации на бортовые системы КА;
2. Автор разработал методику построения гладких аппроксимаций радиационных функционалов для применения в численной оптимизации траекторий перелетов КА с ЭРДУ;
3. Автор разработал программно-вычислительный комплекс для оптимизации траекторий перелетов КА с ЭРДУ, реализующий указанные методики;
4. Для задачи перелета КА с ядерной энергетической установкой и ЭРДУ с низкой круговой орбиты на ГСО автор получил траектории с меньшей поглощенной дозой радиации, чем на траектории оптимального быстрогодействия;
5. Для задачи перелета КА с солнечными батареями и ЭРДУ с эллиптической переходной орбиты на ГСО автор получил траектории с меньшей деградацией мощности, чем на траекториях оптимального быстрогодействия.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается аккуратной математической постановкой задач, использованием обоснованных подходов к решению задач оптимизации, сравнением ряда полученных результатов с результатами других авторов.

**Практическая значимость** полученных автором результатов заключается в разработке эффективной методики построения траекторий выведения КА с ЭРДУ на ГСО с меньшей радиационной нагрузкой, чем на траекториях оптимального быстрогодействия. При этом разработанная методика представляется универсальной и позволяет рассмотреть различные

типы радиационных нагрузок, различные типы источников энергии, разные варианты исходных орбит КА. Разработанный комплекс программ может быть применен при проектировании межорбитальных перелетов КА с ЭРДУ.

#### **Замечания к работе:**

1. Не достаточно обоснован вариант с постановкой задачи на быстроедействие, случай перелета без пассивных участков. При минимизации расхода топлива на оптимальной траектории могут быть участки пассивного полета.
2. Нет обоснования оптимальности получаемых решений задачи принципа максимума. Возможны, в принципе, случаи многоэкстремальности.
3. Не сделано сравнение с решением с помощью прямых методов оптимизации.
4. Разные рассмотренные случаи решенных задач зачастую соответствуют не одному варианту исходных данных, а разным, что затрудняет их сравнение.

Указанные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы. Судя по содержанию диссертационной работы и проведенному в диссертации анализу литературы, автор является квалифицированным специалистом по баллистике, управлению и динамике космического полёта и владеет современными методами этих разделов науки и техники.

Основные результаты по теме диссертации представлены в 5 работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК. Апробация работы сделана в докладах на ряде семинаров и конференций.

Автореферат соответствует диссертации.

Считаю, что диссертационная работа А.Е. Старченко «Траектории многовитковых перелетов космических аппаратов с минимальной радиационной нагрузкой» удовлетворяет требованиям Положения ВАК (в

текущей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов» и соответствует паспорту специальности, а её автор – Старченко Александр Евгеньевич – заслуживает присуждения ему искомой степени.

Отзыв составил официальный оппонент

**Ивашкин Вячеслав Васильевич**

доктор физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика, профессор, главный научный сотрудник отдела «Механика космического полета и управление движением» Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской Академии Наук»,

125047, Москва, Миусская пл., д. 4.

тел. 8(499)220-7233, E-mail: [Ivashkin@keldysh.ru](mailto:Ivashkin@keldysh.ru)

07 февраля 2020 г.  В.В. Ивашкин

Подпись официального оппонента В.В. Ивашкина удостоверяю

Ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,

к.ф.-м.н.



А.И. Маслов