



# ФЕДЕРАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»



Ленинградская ул., д. 24, г. Химки, Московская область, Российская Федерация, 141400  
тел. (495) 629-67-55, факс (495) 573-3595,  
e-mail: npol@laspace.ru, http://www.laspace.ru

03.06.2015 № 118/3584  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Ученому секретарю Ученого совета  
Московского авиационного института  
(национального исследовательского  
университета) МАИ  
к.т.н., доц.  
А. Н. Ульяшиной

г. Москва,  
Волоколамское шоссе, д. 4  
Факс: 8-499-158-29-77

УТВЕРЖДАЮ

И.о. генерального директора,  
д.т.н., профессор

В.В. Хартов



06 2015 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»

на диссертационную работу

**Нгуена Нгока Диена**

«Проектирование траекторий межпланетных перелётов КА с электроракетной двигательной установкой с учетом нештатного временного выключения двигателя», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

Повышение эффективности разрабатываемых транспортных космических систем является актуальной проблемой космической техники. Для транспортных космических систем, предназначенных для реализации межпланетных перелетов, повышение эффективности достигается двумя

путями: усложнением схемы полёта путём использования гравитационных маневров у промежуточных небесных тел и применением перспективных двигательных установок с высоким удельным импульсом. В диссертационной работе изучается одновременное использование обоих путей. При этом в качестве двигательной установки рассматривается электроракетная двигательная установка (ЭРДУ), удельный импульс которой более чем на порядок превышает удельный импульс традиционных «химических» двигательных установок. Однако, величина тяги ЭРД на несколько порядков ниже, что приводит к увеличению длительности активных участков до десятков и сотен суток.

Вследствие большой продолжительности манёвров при проектировании траекторий полёта КА с ЭРДУ необходимо учитывать возможное нештатное прекращение работы двигателя, которое может привести к невозможности доставки аппарата к заданной цели миссии. Работа посвящена исследованию влияния этого фактора на траекторию КА и возможность последующего парирования отклонений получаемой траектории от номинальной при условии возобновления работы двигателя.

Изучение проводится на примере схемы межпланетного перелета, при которой при старте КА от Земли ракета-носитель и разгонный блок совместно обеспечивают относительно небольшую величину асимптотической скорости отлета от Земли. Затем следует гелиоцентрический перелет Земля – Земля длительностью около полутора-двух лет, на котором работает ЭРДУ, увеличивая асимптотическую скорость подлета к планете до величин порядка 8 – 10 км/с. Затем осуществляется гравитационный маневр у Земли, формирующий дальнейшую траекторию КА к заданному небесному телу.

Такая схема интересна несколькими достоинствами:

- за счет работы ЭРДУ обеспечивается большая величина асимптотической скорости облёта Земли;
- широкие окна запуска и частая их повторяемость, обусловленные одной и той же планетой старта и проведения гравманёвра.
- возможность ограничения диапазона изменения расстояний от КА до Солнца, на которых используются солнечные батареи, обеспечивающие ЭРДУ электроэнергией, за счёт проведения активных участков только на этапе гелиоцентрического перелета Земля – Земля.

Всё перечисленное позволяет утверждать, что диссертационная работа выполнена на **актуальную** тему и направлена на повышение эффективности выполнения транспортных межпланетных перелётов.

Сформулированной автором целью работы является разработка методики проектирования траекторий межпланетных траекторий КА с ЭРДУ, включающей возможность парирования возмущений от возможного временного нештатного отключения временного выключения двигателя в ходе полёта.

Для достижения этой цели в работе решаются следующие задачи:

- анализируется баллистическая возможность парирования отклонений траектории КА вследствие временной невозможности штатного использования ЭРДУ на участках гелиоцентрического перелёта;
- формулируется задача проектирования траектории межпланетного полёта КА с ЭРДУ с учётом возможности нештатного прекращения работы двигателя в любой точке любого активного участка;
- разработка методики нахождения оптимальной траектории, реализация которой возможна при наибольшей допустимой продолжительности нештатного выключения двигателя.

Структура диссертации отражает состав решаемых задач. Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, включающего 66 наименований.

**К новым научным результатам** диссертационных исследований следует отнести следующие:

– предложена постановка задачи проектирования траектории межпланетного перелета КА с ЭРДУ, учитывающая возможность парирования траекторных возмущений, связанных с возможным временным нештатным выключением двигателя на траектории гелиоцентрического перелёта. Предполагается, что используется схема межпланетного перелета с гравитационными маневрами (прежде всего с гравитационным маневром у Земли).

– предложен подход к проектированию межпланетной траектории КА с ЭРДУ, учитывающий необходимость парирования возмущений, связанных с возможным временным нештатным выключением ЭРДУ. Он основан на введении дополнительных пассивных участков на траектории гелиоцентрического перелета и оптимизации характеристик этих участков.

– разработан новый метод оптимизации траектории межпланетного перелета КА с ЭРДУ с учетом необходимости парирования траекторных возмущений, связанных с возможным временным нештатным выключением двигателя в любой точке любого активного участка гелиоцентрической траектории. Критерием оптимизации рассматривается допустимая длительность нештатного выключения двигателя в любой точке любого активного участка. Эта длительность максимизируется.

– разработан метод проектирования межпланетной траектории КА с ЭРДУ и использованием гравитационного маневра у Земли, при реализации которой допускается достаточно большая продолжительность временного отсутствия работоспособности двигателя.

**Достоверность и обоснованность** полученных в диссертации результатов подтверждается и сравнительным анализом результатов оптимизации траектории с учетом нештатного временного выключения двигателя с

результатами оптимизации траектории без учета этого выключения. При этом если допустимое время нештатного выключения двигателя считать очень малым, то проектируемая оптимальная траектория окажется близка к традиционной оптимальной траектории, полученной без учета требований парирования траекторных возмущений, вызванных нештатным выключением двигателя.

Кроме этого, стоит заметить, что автор использует корректные математические модели, описывающие движение КА с электроракетной двигательной установкой, использует методы интегрирования высокого порядка, численно анализирует точность численного интегрирования и других вычислительных процедур. Автор развивает традиционный подход к оптимизации траекторий КА, используемый в МАИ, основанный на необходимых условиях принципа максимума. Научные положения и выводы диссертации обоснованы проведением расчётов и сравнением результатов с известными данными.

**Апробация работы** проведена на трёх российских и международных конференциях. Непосредственно относящиеся к представленным в работе результатам материалы опубликованы в 7 печатных работах, из которых 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах из списка ВАК.

Разработанная методика проектирования траекторий с учетом необходимости парирования возмущений, связанных с возможным нештатным выключением двигателя имеет большую **практическую ценность** и может найти широкое использование в практике проектирования межпланетных перелётов КА с ЭРДУ.

Введение дополнительных пассивных участков проектируемой траектории межпланетного перелета КА с ЭРДУ может рассматриваться как рекомендуемый прием, который может обеспечить возможность парирования траекторных возмущений, связанных с нештатным выключением двигателя большой длительности.

Разработанный метод нахождения номинальной траектории с обеспечением большой допустимой продолжительности нештатного выключения двигателя в любой точке любого активного участка может быть использован при анализе проектов транспортных маневров КА с ЭРДУ.

Имеют практическое значение полученные в работе некоторые качественные и количественные результаты анализа выведения КА на гелиоцентрическую орбиту для исследования Солнца с использованием гравитационного маневра у Земли и серии гравитационных маневров у Венеры.

Представляет практическое значение разработанный комплекс программно-математического обеспечения для оптимизации межпланетных траекторий КА, оснащенных электроракетными двигательными установками, при использовании гравитационного маневра у Земли.

Результаты диссертационного исследования могут быть полезны при проектировании траекторий КА для перспективных проектов «Интергелио-Зонд» и «Лаплас-П», разрабатываемых в НПО им. С.А. Лавочкина.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы к использованию в организациях, занимающихся проектированием межпланетных траекторий полёта КА с ЭРДУ: ЦНИИмаш, Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, ОАО «Спутниковые информационные системы» им. М.Ф. Решетнёва, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, РКК «Энергия» им. С.П. Королева.

По работе необходимо сделать следующие замечания:

1. Разработанный в диссертации подход к оптимизации траектории межпланетного перелета с учетом нештатного выключения двигателя предполагает фиксированность характеристик траектории КА после гравитационного маневра у Земли. В общем случае требования к необходимости парирования траекторных возмущений можно «смягчить», если допустить вариацию параметров движения КА после гравитационного маневра у Земли, или, например, добавить возможность коррекции траектории в ходе дальнейшего полёта.

2. Разработанная методика предполагает очень трудоемкое исследование, в ходе которого должно быть решено очень большое число краевых задач. Целесообразно довести такое исследование до инженерной методики, свободной от этой трудоемкой процедуры.

3. Рассмотренное в работе временное нештатное выключение двигателя является только одним из факторов, приводящих к отклонениям траектории. Также значительное влияние на траекторию оказывают отклонения в процессе полёта значений тяги ЭРДУ по модулю и направлению.

4. Не рассмотрен вопрос задания и отработки программы управления вектором тяги в бортовом комплексе управления КА и требования по точности к этой программе, а также не оценены допустимые отклонения формируемой траектории от номинальной.

Однако, эти замечания не снижают научной ценности проведенного исследования, и их следует рассматривать как рекомендации к дальнейшему развитию разработанной методики.

Тема и содержание диссертации соответствует специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов. Работа написана грамотно, аккуратно оформлена и снабжена наглядными графическими иллюстрациями. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации и отражает личный научный вклад автора.

Считаем, что по совокупности полученных результатов диссертационная работа «Проектирование траекторий межпланетных перелётов КА с электроракетной двигательной установкой с учетом нештатного временного выключения двигателя», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – Динамика,

баллистика, управление движением летательных аппаратов, соответствует критериям, изложенным в пунктах 9 – 14 Положения о присуждении учёных степеней, а её автор Нгуен Нгок Диен заслуживает присвоения учёной степени кандидата технических наук по названной специальности.

Отзыв обсужден и одобрен на секции №1 НТС, протокол № 4-15 от 14 мая 2015 года.

Заместитель генерального конструктора по науке,  
доктор технических наук, профессор

К.М. Пичхадзе

Заместитель начальника центра,  
доктор технических наук

А. Е. Назаров

Заместитель начальника отдела,  
кандидат технических наук

А. В. Симонов