

ОТЗЫВ

официального оппонента А.А. Сеницына на диссертацию Нгуена Нгока Диена «Проектирование траекторий межпланетных перелетов КА с электроракетной двигательной установкой с учетом нештатного временного выключения двигателя», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

Диссертационная работа Нгуена Нгока Диена связана с перспективным направлением развития ракетно-космической техники - применением электроракетных двигателей (ЭРД) в межпланетных перелетах. Рассматриваемая схема перелета состояла из следующих этапов (отличаются используемыми математическими моделями для определения характеристик траектории): 1) формирование ракетой носителем и разгонным блоком отлетной от Земли траектории с необходимым гиперболическим избытком скорости; 2) перелет с использованием ЭРД в течение одного-двух витков от Земли и подлет к Земле с гиперболическим избытком скорости; 3) гравитационный маневр у Земли; 4) пассивный перелет от Земли к планете назначения.

Актуальность темы.

Перспективность применения ЭРД как основных для маршевых двигательных установок (ДУ) автоматических межпланетных станций (АМС) обусловлена возможностью существенного увеличения массы полезной нагрузки, по сравнению с вариантом использования только жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). При этом разница в продолжительности межпланетного перелета в вариантах использования ЖРД и ЭРД, как правило, не настолько значительна, как в околоземных перелетах, то есть отсутствует основной фактор, препятствующий использованию ЭРД в составе маршевых ДУ для транспортных операций в околоземном пространстве. Успехи в применении маршевых ЭРДУ в составе АМС за рубежом на космических аппаратах (КА) DeepSpace, Dawn, Hayabusa демонстрируют хорошие перспективы развития этого направления ракетно-космической техники.

Вместе с тем, зарубежный опыт показывает практическую неизбежность отказов в процессе перелетов. Это могут быть как однократная перезагрузка бортовой вычислительной машины из-за воздействия корпускулярной радиации, так и выход из строя одной из важных систем КА

(например, двигателя-маховика). В любом случае, отказ любой из обеспечивающей полет системы приводит к неизбежному переводу КА в защищенный режим и выключению ДУ. Появление дополнительных пассивных участков на траектории перелета, не согласованных с номинальной программой перелета, приводит либо к изменению программы полета с увеличением потребного запаса рабочего тела, либо к невозможности осуществления полетного задания. Результаты исследований приведенной выше ситуации (в том числе к рассматриваемой в диссертационной работе схеме полета) не представлены в научно-технической литературе в достаточной мере. В связи с вышесказанным, тему диссертационной работы следует считать **актуальной**.

Работа написана на 122 листах и состоит из введения, шести глав и заключения.

Введение содержит описание основных характеристик работы: формулировка целей исследования, обоснование актуальности, научной новизны и практической значимости, положения, выносимые на защиту.

В первой главе дано описание математических моделей, примененных в исследовании. Приведено описание составляющих схему полета этапов и методических подходов к моделированию траектории перелета. Основным объемом изложения занимает участок работы ЭРДУ, ввиду его математической сложности и потребности численных итерационных расчетов. Приведены уравнения движения и им сопряженные, а также законы управления, полученные из принципа максимума Понтрягина.

В содержание второй главы включены описания применяемых для поиска оптимальных траекторий межпланетного перелета численных методов. В частности, приводятся сведения о методе Рунге-Кутты-Вернера высоких порядков (используются разложения восьмого и девятого порядка), а также о методе продолжения по параметру для решения системы трансцендентных уравнений с редукцией решаемой задачи поиска нулей вектор-функции (в качестве вектор-функции выступает вектор невязок краевой задачи и, таким образом, вектор-функция задается неявно, через интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений) к задаче Коши.

Третья глава посвящена постановке оптимизационной задачи определения траектории межпланетного перелета. Оптимизационные расчеты траектории межпланетного перелета сводятся к рассмотрению только участка от отлета от Земли до гравитационного маневра у Земли. Приводится перечисление неизвестных краевой задачи, а также краевые

условия. Так как перелет и на левом и на правом концах траектории ограничивается многообразиями, недостающие краевые условия следуют из условий трансверсальности.

Постановка задачи расчета траектории КА с учетом возможности нештатного выключения ЭРДУ рассматривается в главе четыре. При этом представленные исследования баллистических возможностей парирования рассматриваемой нештатной ситуации можно разделить на три составляющих. В первой ставится краевая задача поиска траектории перелета с заданными началом и окончанием нештатного выключения ЭРДУ. При этом начало траектории соответствует номинальной (выбранной из условия максимизации конечной массы КА), пассивный участок траектории интегрируется до момента включения ЭРДУ для получения начальных условий краевой задачи на левом конце (краевые условия на правом конце аналогичны краевым условиям для номинальной траектории). Решение поставленной краевой задачи (если оно существует) позволяет сопоставить положение и продолжительность нештатного выключения ЭРДУ на траектории массе дополнительных затрат рабочего тела на парирование нештатной ситуации. Варьирование положения и продолжительности нештатного выключения ЭРДУ, а также аппроксимация полученных результатов обеспечивают построение функции затрат рабочего тела от положения и продолжительности вынужденного пассивного участка. Это позволяет решать оптимизационную задачу по поиску положения на траектории наихудшей (самой короткой) продолжительности нештатного выключения ЭРДУ, при ограничении на величину массы рабочего тела, и является второй составляющей исследования. Третьей составляющей исследования является постановка задачи с введением дополнительных пассивных участков для увеличения продолжительности нештатного выключения в наихудшем случае при ограничении на требуемую массу топлива. Определяемыми параметрами в этой постановке являются длительность и расположение на траектории дополнительных пассивных участков.

Содержание пятой главы составляет использование разработанного автором программно-методического аппарата на примере перелета Земля-Земля-Венера. Следует отметить, что прототипом исследуемой траектории является траектория перспективного проектируемого КА «Интергелио-Зонд». Приводятся результаты расчета номинальной (с максимальной доставляемой на целевую орбиту массой) траектории перелета и соответствующие этой траектории результаты расчета возможных

нештатных выключений ЭРДУ. Проанализированы варианты коррекции номинальной траектории с учетом возможных штатных отключений ЭРДУ (рассмотрены варианты с введением пассивных участков в конце траектории, а также одного или двух дополнительных). Результаты исследований показывают, что в рассмотренном примере межпланетного перелета имеется возможность выбора существенно более устойчивой к штатному отключению ЭРДУ траектории перелета. В частности, при отключении ЭРДУ в наихудший момент допустимая длительность такого отключения больше чем у номинальной траектории вплоть до 21 раза. При этом на ликвидацию последствий такого штатного отключения потребуется на 4,75% больше (по сравнению с номинальной траекторией) массы рабочего тела.

В главе шесть аналогично представленным исследованиям в главе пять, проведены исследования траектории перелета Земля-Земля-Юпитер. Показано, что при принятых исходных данных рассматриваемый перелет оказывается более чувствительным к штатному отключению ЭРДУ (по сравнению с перелетом Земля-Земля-Венера). Баллистические возможности по парированию штатного отключения ЭРДУ оказываются меньшими. В частности, изменение траектории перелета позволяет при штатном отключении ЭРДУ в наихудший (с точки зрения возможности парирования траекторных возмущений) момент увеличить допустимую продолжительность отключения ДУ до 2,8 суток (на номинальной траектории штатное отключение ЭРДУ на последнем активном участке приводит к невыполнению программы полета). При этом необходимая масса рабочего тела (для компенсации штатного выключения ЭРДУ предельно допустимой продолжительности в наихудший момент) возрастает на 11%.

Оценка новизны.

Научной новизной обладают следующие приведенные в диссертационной работе результаты:

1. Постановка задачи расчета траектории межпланетного перелета с малой тягой с учетом штатного выключения маршевой ЭРДУ.
2. Методический подход к построению траекторий межпланетного перелета по схеме Земля-Земля-планета назначения при заданном расположении и продолжительности пассивного участка.
3. Методика определения момента на траектории гелиоцентрического участка перелета с минимальной продолжительностью штатного выключения ЭРДУ (наиболее неблагоприятный случай), при котором

реализация программы полета еще возможна для фиксированного запаса рабочего тела ЭРДУ.

4. Методический подход к построению траекторий межпланетного перелета, обеспечивающий увеличение допустимой длительности нештатного выключения ЭРДУ в наихудший (с точки зрения траекторных возмущений) момент полета за счет введения дополнительных пассивных участков, оптимизации их характеристик, оптимизации даты старта от Земли и гиперболического избытка скорости химического разгонного блока.

Достоверность.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается использованием известных математических методов при оптимизации траекторий межпланетного перелета, проверенных численных методов интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений и продолжения по параметру, строгих математических постановок с использованием всех необходимых условий оптимальности принципа максимума Понтрягина.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Выводы, сделанные в диссертационной работе, основаны на глубоком анализе рассматриваемых вопросов и подкреплены значительным объемом проведенных численных расчетов.

Материалы, приводимые в диссертационной работе, опубликованы в четырех научно-технических изданиях из списка ВАК, а также докладывались на двух отраслевых и международной конференции.

Содержание автореферата отражает основные положения диссертационной работы.

Недостатки диссертационной работы:

1. В диссертационной работе отсутствует обзор научно технической литературы по направлению исследований.
2. Постановка задачи поиска траектории межпланетного перелета по схеме Земля-Земля-планета назначения с учетом возможного нештатного отключения ЭРДУ не включает возможности оптимизации даты проведения гравитационного маневра у Земли и работы ЭРДУ после этого гравитационного маневра.
3. Недостаточно точно описаны принципиальные характеристики систем КА – ЭРДУ и источника питания. Приводятся количество и марка двигателя, однако, из работы неясны режимы работы ЭРДУ.

4. В описании краевых условий выражения для концевых многообразий, составляющих изначальную постановку краевой задачи до применения принципа максимума, не приводятся. Вместо этого представлены конечные выражения, полученные с использованием условий трансверсальности принципа максимума Понтрягина. Учитывая различные возможности записи условий трансверсальности, вывод используемых краевых условий заслуживает большего внимания в изложении положений диссертационной работы.
5. В диссертационной работе встречаются опечатки и остатки от черновика (смотри, например, в перечне литературы [36, 37]). Имеется список сокращений и обозначений, что очень удобно, однако, он неполный.

Указанные недостатки не снижают значимость решенной в диссертационной работе задачи исследования баллистических возможностей парирования последствия нештатного выключения ЭРДУ на траектории межпланетного перелета.

Диссертация Д.Н. Нгуена является самостоятельно выполненной автором законченной научно-квалификационной работой, в которой автор продемонстрировал глубокие знания в проектной баллистике межпланетных перелетов и высокую математическую квалификацию при численном решении краевых задач.

Представленная диссертационная работа соответствует требованиям Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842"О порядке присуждения ученых степеней", предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Нгуен Нгок Диен – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Ведущий научный сотрудник
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»
кандидат технических наук

А.А. Сеницын

Подпись официального оппонента
А.А. Сеницына удостоверяю
Ученый секретарь
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»
кандидат военных наук



Ю.Л. Смирнов