



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»
(АО «НПО Лавочкина»)



Ленинградская ул., д. 24, г. Химки,
Московская область, 141402
ОГРН 1175029009363, ИНН 5047196566

Тел. +7 (495) 573-56-75, факс +7 (495) 573-35-95
e-mail: npol@laspace.ru
www.laspace.ru

от _____ № _____

на № _____ от _____

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук ведущего математика отдела баллистики Симонова Александра Владимировича на диссертацию Николичева Ильи Андреевича на тему: «Оптимизация многовиткового межорбитального перелета космического аппарата с электроракетной двигательной установкой с учетом действия возмущений», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

Диссертационная работа Николичева И.А. посвящена рассмотрению ряда методических вопросов, связанных с решением и качественным исследованием задач оптимизации межорбитального перелета космического аппарата (КА) с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) при учете влияния возмущений. Диссертантом предлагается методика, позволяющая на практике эффективно решать рассматриваемые задачи оптимизации многовитковых траекторий с помощью непрямого метода вариационной группы – принципа максимума Понтрягина. И удаётся избежать ряда его характерных недостатков, связанных, в первую очередь, с необходимостью записи условий оптимальности в явном аналитическом виде. Это значительно усложняет использование последнего при рассмотрении сложных математических моделей, описывающих управляемое движение центра масс КА с ЭРДУ. В основе предлагаемой методики лежит достаточно простая идея, непосредственно вытекающая из канонического формализма применяемого метода оптимизации. Так, вместо аналитической записи правых частей сопряженных уравнений в работе рассматривается возможность численно определять правые части системы дифференциальных уравнений оптимального управляемого движения КА с ЭРДУ. Для этой цели автором предлагается использовать метод численного дифференцирования, построенный на основе элементов теории



дуальных чисел, представляющих собой комплексные числа особого рода, а также их алгебраических расширений. Основное преимущество применения данного метода (по сравнению с прочими известными методами численного дифференцирования) состоит в том, что относительная точность вычисленных с его помощью производных функции *всегда* равна относительной точности вычисления самой функции. Это позволяет избежать трудностей с определением правых частей системы дифференциальных уравнений движения КА с ЭРДУ при решении задач оптимизации траекторий межорбитального перелета при помощи использования непрямого метода вариационной группы, значительно уменьшающей сложность математической модели, описывающей движение центра масс космического аппарата. В связи с этим рассматриваемую методику можно рекомендовать для решения задачи оптимизации траектории многовиткового межорбитального перелета КА с малой тягой.

Актуальность диссертационной работы продиктована как общим и повсеместным увеличением числа использования ЭРД в качестве штатных маршевых двигательных установок КА, так и комплексным развитием схем выведения аппаратов на высокоэнергетические орбиты, среди которых наибольший интерес для практического применения представляет геостационарная орбита. Так, в настоящее время становится уже практически стандартной т.н. комбинированная схема выведения КА, при которой транспортная операция по доставке аппарата на ГСО осуществляется за два этапа. Средство выведения, включающее ракету-носитель и «классический» «химический» разгонный блок, выводит КА на геопереходную орбиту с радиусом апогея, располагающимся в районе геостационарной орбиты. Далее КА с помощью собственной двигательной установки (в рассматриваемом случае – ЭРД), осуществляет переход на ГСО в район требуемой точки стояния. Второй этап часто называют «довыведением». Сегодня существуют две «стандартные» геопереходные орбиты, характеризующиеся скоростью довыведения 1500 и 1800 м/с, которые являются базой для проектирования геостационарных КА.

Вследствие специфики движения аппарата под действием малого реактивного ускорения, создаваемого ЭРД, построение траектории межорбитального перелета для такого КА на участке довыведения представляет собой достаточно сложную задачу баллистического проектирования. Её решение на практике требует рассмотрения весьма нетривиальных оптимизационных проблем, для решения которых необходимо использовать адекватный математический аппарат. Поэтому дальнейшее развитие и совершенствование соответствующих методов и подходов весьма актуально в настоящее время, т.к. это позволит увеличить эффективность космических транспортных систем при

практической реализации комбинированных схем выведения полезной нагрузки на высокоэнергетические орбиты.

Основные научные результаты, впервые полученные в диссертации, напрямую связаны с предлагаемой автором универсальной методикой решения задач оптимизации межорбитального перелета с применением аппарата дуальных чисел. В работе даётся полное и подробное её обоснование, а также приводятся результаты практического применения на примере некомпланарных межорбитальных перелетов с начальной круговой или эллиптической орбиты на ГСО. Предложенная методика позволяет без особых сложностей учитывать различные возмущающие факторы, действующие на КА. Строго говоря, это справедливо только при выполнении ряда требований, которым должна удовлетворять используемая модель возмущений. Однако, они всегда выполняются при рассмотрении эллиптического движения КА и для наиболее часто используемых моделей возмущений.

На основе полученных результатов автор делает качественные и количественные выводы о степени влияния возмущений на оптимизацию траектории межорбитального перелета на ГСО КА с ЭРДУ. Так, в работе показано, что для рассматриваемого типа межорбитального перелета, учёт влияния возмущений не приводит к существенной разности в итоговых значениях критерия оптимальности – относительная разница, как правило, не превышает одного процента. Однако, учёт возмущающих ускорений заметно меняет структуру оптимальных программ изменения углов тангажа и рыскания, а также функции переключения тяги ЭРД.

Автором сформулирован общий подход к решению задач оптимизации многовитковых межорбитальных перелетов КА с ЭРДУ с учетом действия различных возмущающих ускорений. В работе предложена базовая схема решения, построенная на получении последовательных приближений, элементами которой служат решения рассматриваемой задачи, отвечающие различным по сложности моделям, описывающим управляемое движение центра масс аппарата. Элементы цепочки выстраиваются сообразно увеличению сложности моделей движения КА и состава учитываемых возмущений. В качестве первоначального приближения предлагается использовать решение осредненного варианта рассматриваемой задачи без учёта влияния возмущений.

Среди основных научных результатов работы, также впервые полученных лично автором, необходимо отметить методическую идею совместного использования дуальных чисел и метода продолжения при решении краевых задач для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, к которым редуцируются рассматриваемые в работе оптимизационные проблемы. Данная методика позволяет повысить эффективность

использования данного численного алгоритма применительно к задачам траекторной оптимизации межорбитального перелета КА с ЭРДУ при рассмотрении достаточно простых моделей управляемого движения центра масс аппарата, а также даёт возможность практической реализации различных схем продолжения для полученного «базового» решения, что позволяет упростить процедуру качественного исследования задачи.

В диссертационной работе также рассмотрена отдельная задача оптимизации многовиткового межорбитального перелета – задача оптимизации встречи, связанная с актуальной в настоящее время проблематикой увода нефункционирующих более аппаратов (или их крупных фрагментов) из близкой окрестности ГСО с помощью специального сервисного КА-буксира. Проведена полная и подробная формализация задачи, получены необходимые условия оптимальности. Предложена схема решения задачи встречи в зависимости от рассматриваемого вида целевого критерия качества. На основе полученных решений проведён качественный и количественный анализ рассматриваемой задачи, выявлены её основные характерные свойства и особенности. Так, например, дана оценка влияния действия возмущений на целевые критерии качества и структуру оптимального управления по сравнению с соответствующим невозмущенной моделью движения КА. Выявлены некоторые характерные особенности рассматриваемой задачи. Например, слабая зависимость значения целевого функционала, выражающего безразмерную конечную массу аппарата, от длительности перелета и др.

Диссертационная работа содержит обширное Приложение, в котором подробно описываются основные свойства алгебры дуальных чисел и их многомерных расширений, а также элементы теории функции дуального переменного. Приложение носит преимущественно обзорный характер, но содержит ряд новых теоретических результатов, полученных лично автором. К которым можно отнести, например, полученное выражение для структуры аналитической функции многомерного дуального переменного.

В основе представленных в работе методик, теоретических подходов и результатов, лежат оригинальные идеи, предложенные лично автором работы. Таким образом, **научная новизна основных результатов диссертационной работы** заключается:

- в создании автором универсальной методики решения и исследования задач оптимизации межорбитального перелета КА с ЭРДУ с учетом действия возмущений, построенной на использовании математического аппарата дуальных чисел и элементов теории функции дуального переменного, и напрямую вытекающей из канонического формализма принципа максимума;
- в проведении автором работы качественного анализа полученных с помощью данной методики решений возмущенных задач оптимизации для конкретного

рассматриваемого в работе типа межорбитального перелета – с начальной круговой или эллиптической орбиты – на ГСО, в результате которого выявлена малая степень влияния действия возмущений на величину целевого функционала задачи, и при этом, возможность значительного изменения в структуре оптимальных программ управления аппаратом, что целесообразно учитывать при баллистическом проектировании номинальной траектории межорбитального перелета;

- автором рассмотрен ряд новых постановок задачи оптимизации межорбитального перелета КА с ЭРДУ, возникающих при исследовании проблемы оптимального маневрирования аппарата в окрестности ГСО, предназначенного для буксировки на орбиты захоронения нефункционирующих КА (объектов космического мусора (КМ)); выявлены некоторые важные качественные свойства решений данной задачи, такие как слабая зависимость величины целевого функционала от продолжительности времени перелета (при рассмотрении задачи в постановке минимизации затрат рабочего тела); также отмечена существенная многоэкстремальность рассматриваемых задач;
- в практической реализации предлагаемой автором работы общей методики решения возмущенных задач оптимизации межорбитального перелета посредством написания специального программного обеспечения на языке Fortran, с помощью которого производились все необходимые вычисления с дуальными числами.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

- разработана и полностью теоретически обоснована методика и общий базовый подход к решению специального класса задач оптимизации траекторий КА с ЭРДУ;
- разработанная методика обладает широким спектром применений и может быть использована при решении различных задач баллистического проектирования, для которых характерно применение сложных математических моделей, описывающих движение центра масс КА;
- предложена методика совместного применения математического аппарата дуальных чисел и численного метода продолжения, позволяющая существенно повысить эффективность его использования, что, обеспечивает возможность организации различных схем продолжения для качественного исследования свойств и особенностей решений задач оптимизации многовитковых траекторий КА с ЭРДУ при использовании простых моделей движения центра масс аппарата;

- разработано программно-математическое обеспечение, реализующее описанную методику и которое может быть использовано при проектировании и оптимизации траекторий КА с двигателями малой тяги.

Достоверность полученных результатов подтверждается строгостью и обоснованностью используемых в работе математических моделей, а также непосредственным сравнением ряда полученных результатов с существующими аналогичными результатами других авторов. Как это сделано, например, в разделе 3.2.2, где сравниваются полученные автором характеристики траектории геоцентрического участка перелета КА SMART-1 с соответствующими характеристиками реальной траектории аппарата.

Полученные научные результаты, представленные в диссертационной работе, с достаточной полнотой опубликованы в шести работах (научных статьях и сборниках тезисов докладов конференций), три из которых входят в перечень ВАК Минобрнауки РФ.

Оформление диссертационной работы отвечает требованиям ВАК. Изложение основного материала в работе дается логично, последовательно и обоснованно. Текст работы написан грамотным научно-техническим языком.

Текст автореферата полностью соответствует основному содержанию работы. В автореферате с достаточной для понимания степенью полноты изложены основные идеи, выводы и результаты диссертационной работы.

В качестве **недостатков** диссертационной работы следует отметить следующие:

- принятая в рамках работы модель возмущений не содержит влияния аэродинамических сил и сил светового давления, что имеет большое значение для КА с большими площадями солнечных батарей;
- при расчётах не учитываются теневые интервалы, на которых из-за недостатка мощности, получаемой от солнечных батарей, невозможно проводить активные участки на ЭРДУ;
- в главе 4 рассмотрена только задача встречи КА-буксировщика с объектом – космическим мусором, находящимся в окрестности ГСО, но совсем не изучен вопрос его увода на орбиту вне защищаемой области по ГОСТ Р 52925-2008 с наклоном более 15° и высотой выше или ниже ГСО на 200 км.

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

Выводы. Диссертация Николичева И.А. «Оптимизация многовиткового межорбитального перелета космического аппарата с электроракетной двигательной установкой с учетом действия возмущений» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую решение актуальной научно-технической проблемы, связанной с увеличением эффективности космических транспортных систем, использующих комбинированную схему выведения полезной нагрузки на высокоэнергетические орбиты. Содержание работы полностью соответствует паспорту специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов и соответствует критериям, изложенным в пунктах 9 – 14 Положения о присуждении учёных степеней, а её автор Николичев Илья Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по названной специальности.

Ведущий математик отдела баллистики
АО «НПО Лавочкина»,
кандидат технических наук



А.В. Симонов

Подпись официального оппонента к.т.н. А.В. Симонова удостоверяю.

Заместитель генерального конструктора
по общему проектированию
АО «НПО Лавочкина»



05.12.14

И.В. Москати́ньев

07.12.2017 