

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Овчинникова Михаила Юрьевича 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 методических и прикладных вопросов, связанных с решением и качественным исследованием задач оптимизации межорбитального перелета космического аппарата (КА) с электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) при учете влияния возмущений. Соискателем предложена методика, позволяющая на практике эффективно решать рассматриваемые задачи траекторной оптимизации с помощью непрямого метода вариационной группы – принципа максимума Понтрягина. Ему удалось избежать характерных для него недостатков, связанных, в первую очередь, с необходимостью записи надлежащих условий оптимальности в явном аналитическом виде, значительно осложняющих использование принципа максимума при рассмотрении сложных математических моделей, описывающих управляемое движение центра масс КА с ЭРДУ. В основе предложенной методики лежит достаточно простая идея, непосредственно вытекающая из канонического формализма применяемого метода оптимизации. Вместо аналитической записи правых частей сопряженных уравнений в работе предложено численно определять правые части системы дифференциальных уравнений оптимального управляемого движения КА с ЭРДУ. С этой целью автор ввел метод численного дифференцирования, построенный на основе элементов теории дуальных чисел (комплексных чисел особого рода) и их алгебраических расширений. Основное преимущество предложенного метода по сравнению с известными методами численного дифференцирования заключается в том, что относительная точность вычисленных с его помощью производных функции *всегда* равна относительной точности вычисления самой функции. Последнее и позволяет избежать трудностей с определением правых частей системы дифференциальных уравнений оптимального управляемого движения КА с ЭРДУ, возникающих при решении возмущенных задач траекторной оптимизации межорбитального перелета с помощью непрямого метода вариационной группы. Тем самым снимаются ограничения на сложность математической модели, описывающей движение центра масс КА.

Использование методики позволяет ответить на вопрос о целесообразности рассмотрения столь сложных математических моделей движения при баллистическом проектировании номинальной траектории межорбитального перелета.

Актуальность диссертационной работы продиктована увеличением частоты использования ЭРД в качестве штатных корректирующих или маршевых двигательных установок КА и комплексным развитием сложных схем выведения аппаратов на высокие рабочие орбиты, включая выведение на геостационарную орбиту (ГСО). В настоящее время широкое развитие получила так называемая комбинированная схема выведения КА, при которой транспортная операция по доставке аппарата на ГСО осуществляется с использованием двух ступеней – «химической», в роли которой, как правило, выступает разгонный блок, и ступени, маршевой двигательной установкой которой является ЭРД. В подавляющем большинстве случаев, в качестве второй ступени рассматриваемой транспортной системы непосредственно выступает сам КА. Этап схемы комбинированного выведения, на котором в качестве маршевой двигательной установки используется ЭРДУ, обычно называют довыведением. Вследствие специфики движения аппарата под действием малого реактивного ускорения, построение траектории межорбитального перелета на участке довыведения представляет собой сложную задачу баллистического проектирования, решение которой на практике требует рассмотрения весьма нетривиальных оптимизационных проблем. Поэтому дальнейшее развитие и совершенствование соответствующих математических методов и методологических подходов актуально в настоящее время. Это позволит увеличить эффективность космических транспортных систем при практической реализации сложных схем выведения полезной нагрузки на высокие орбиты.

Основные результаты, полученные в диссертации, напрямую связаны с предлагаемой автором универсальной методикой решения возмущённых задач оптимизации межорбитального перелета с применением аппарата дуальных чисел. В работе даётся полное и подробное ее обоснование, а также приводятся результаты её практического применения на примере рассмотрения некомпланарных межорбитальных перелетов с начальной круговой или эллиптической орбиты на ГСО. Предложенная методика позволяет с завидной легкостью учитывать различные возмущающие факторы, действующие на КА, 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 решения траекторных задач оптимизации межорбитального перелета КА с ЭРДУ на ГСО. Так, в работе показано, что для

рассматриваемого (по сути, частного) типа межорбитального перелета на ГСО, учёт влияния возмущений не приводит к существенной разности в значениях критерия качества на возмущенном и невозмущенном решениях (относительная разница, как правило, не превышает одного процента), но может оказывать ощутимое влияние на структуру полученного в результате решения управления, описывающего оптимальные программы изменения углов тангажа и рыскания аппарата, а также функции переключения тяги ЭРД.

Автором сформулирован достаточно общий подход к решению задач оптимизации многовитковых межорбитальных перелетов КА с ЭРДУ с учетом действия возмущений. В диссертации предложена базовая схема решения, построенная на простой идеи организации цепочки 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 последних. В качестве первоначального элемента цепочки всегда предлагается использовать решение осредненного варианта рассматриваемой задачи, не учитывая при этом влияние возмущений.

Необходимо отметить предложенную автором 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. Методика позволяет повысить эффективность использования предложенного численного алгоритма применительно к задачам траекторной оптимизации межорбитального перелета КА с ЭРДУ при рассмотрении простых моделей управляемого движения центра масс аппарата, 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 проблематикой увода нефункционирующих более аппаратов из близкой окрестности ГСО с помощью специального сервисного КА-буксира. Решение и анализ данной задачи проводится в рамках базовой методики решения возмущённых задач предложенной автором работы. Проведена полная и подробная формализация задачи, получены необходимые условия оптимальности. Автором 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. В частности, дана оценка влияния действия возмущений на целевые критерии качества и структуру оптимального управления (по сравнению с соответствующим невозмущенным решением). 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 теоретических результатов полученных лично автором.

В основе представленных в работе методик и результатов лежат оригинальные идеи, предложенные автором работы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

- разработана универсальная методика 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; проведен анализ полученных с помощью разработанной методики решений возмущенных задач оптимизации для конкретного рассматриваемого в работе типа межорбитального перелета – с начальной круговой или эллиптической орбиты на ГСО;
- рассмотрен ряд новых постановок задачи оптимизации межорбитального перелета КА с ЭРДУ, возникающих при исследовании проблемы оптимального маневрирования аппарата (на отдельных этапах его полета) в окрестности ГСО, предназначенного для буксировки на орбиты захоронения более нефункционирующих КА (объектов космического мусора (КМ));
- создано специальное программное обеспечение на языке FORTRAN, с помощью которого производились необходимые вычисления над пространством дуальных чисел.

Достоверность полученных автором результатов подтверждается строгостью и обоснованностью используемых в работе математических моделей, а также непосредственным сравнением полученных результатов с аналогичными результатами других авторов (например, в разделе 3.2.2 сравниваются полученные характеристики траектории геоцентрического участка перелета КА SMART-1).

Практическая значимость настоящей работы состоит в следующем:

- разработана и обоснована методика и общий базовый подход к решению специального класса задач траекторной оптимизации межорбитального перелета КА с ЭРДУ. Методика весьма универсальна и может быть широко использована при решении задач баллистического проектирования;
- разработаны алгоритмы и создан пакет программ, реализующих предложенную в работе методику, которые могут быть использованы при проектировании межорбитальных перелетов КА с двигателями малой тяги.

Основные результаты опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, прошли апробацию на научно-технических конференциях. Оформление диссертации отвечает требованиям ВАК РФ. Материал написан грамотным техническим и русским языком. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Замечания:

- «универсальность» методики выполняется только при выполнении ряда предположений, которые, правда, могут быть значительно ослаблены (фактически, сведены на нет) в случае рассмотрения только эллиптического движения;
- принятая в рамках работы модель возмущений не содержит влияния аэродинамических сил и сил светового давления (однако, это не указывает на невозможность их учета в рамках предлагаемой в работе методики!);
- в работе рассматривались только простые массовые модели космического аппарата;
- в разделе 3.1 при построении продолжения полученного опорного решения ОТ-задачи по угловой дальности не описано каким образом получено точное глобально-оптимальное значение целевого функционала задачи;
- при рассмотрении задачи в постановке на минимум тяги в разделе 3.2 не учитывалось влияние притяжения Солнца и Луны, а учитывался лишь геопотенциал;
- при сравнении эффективности использования различных методов численного дифференцирования в третьей главе диссертационной работы не приведены соответствующие результаты, отвечающие конкретным рассмотренным задачам оптимизации межорбитального перелета;
- во всех полученных в третьей главе примерах межорбитального перелета КА с ЭРДУ с начальной круговой или высокоэллиптической орбиты (ВЭО) на ГСО

всегда полагалось, что линия апсид начальной орбиты лежит в плоскости экватора; последнее, без сомнения, уменьшает общность рассмотрения задачи.

Указанные недостатки не влияют на общую оценку качества выполненной диссертационной работы и не снижают высокой оценки выполненных научных исследований и полученных результатов.

Диссертация Николичева И.А. на тему: «Оптимизация многовиткового межорбитального перелета космического аппарата с электроракетной двигательной установкой с учетом действия возмущений» представляет собой законченную квалификационную работу, содержащую решение актуальной научно-технической задачи, выполнена на высоком научном уровне в соответствии с паспортом специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов» и соответствует требованиям ВАК Минобрнауки РФ, а ее автор - Николичев Илья Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Официальный оппонент

Овчинников Михаил Юрьевич,

доктор физико-математических наук по специальности 01.02.01 «Теоретическая механика», профессор по кафедре теоретической механики,

Заведующий сектором «Системы ориентации и управление движением» Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук" (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)

Москва, 125047 Миусская пл., д. 4. Тел. 499-220-78-13, E-mail: ovchinni@keldysh.ru

Подпись профессора М.Ю. Овчинникова заверяю.

Ученый секретарь ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

кандидат физико-математических наук

01 декабря 2017 г.

М.П.



А.И. Маслов
г. Москва

07.12.2017 *А.И. Маслов*