

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук, математика 2 категории отдела баллистики и навигации Акционерного общества «Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина, Гордиенко Евгения Сергеевича на диссертацию Самохина Александра Сергеевича "Методика построения экстремалей Понtryгина в задачах сквозной траекторной оптимизации межпланетных перелётов с учётом планетоцентрических участков", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

Диссертационная работа Самохина Александра Сергеевича посвящена разработке и тестированию новой методики решения задач оптимального управления межпланетными перелётами космических аппаратов (КА) с большим числом переменных. В работе разрабатывается методика построения «лестницы задач», а также описание её применения на примере оптимизации экспедиции к Фобосу в различных постановках, приводятся соответствующие численные и графические результаты. Задачи решаются с применением комбинированной тяги, приводятся числовые характеристики построенных экстремалей Понtryгина.

Актуальность

Автор рассматривает экономически выгодную схему межпланетных перелётов КА с комбинированным управлением двигателями большой и малой тяги, которая позволяет доставить значительную полезную массу за определенное, сравнительно небольшое для данного класса задач, время.

При анализе актуальности решаемых в диссертации проблем хочу отметить, что диссертант своим исследованием вносит существенный вклад в анализ и оптимизацию схем выведения КА при его полете к объектам дальнего космоса, а также при осуществлении миссий по доставке грунта на Землю.

Разработанная в диссертации методика была применена к миссии перелёта к спутнику Марса Фобосу, на котором по мнению многих учёных могло сохраниться реликтовое вещество. Фобос представляет собой большой интерес, советские аппараты летали к нему ещё в 1980-е, а на 2020-е годы запланированы независимо Российской Федерацией и Японией и новые миссии. Учитывая написанное выше, разработка методики построения экстремалей Понtryгина в задачах сквозной траекторной оптимизации межпланетных перелетов с учетом планетоцентрических участков является весьма актуальной научной задачей.

Диссертант предлагает методику оптимизации перелёта КА, предусматривающую совместный учет множества различных факторов, что, безусловно, представляет математический интерес.

Целью диссертационной работы является разработка методики для построения экстремалей Понtryгина в задачах оптимизации межпланетных траекторий КА с учетом притяжения планет и без использования грависфер нулевой протяженности.

Основными результатами, полученными в рамках данной диссертационной работы, являются следующие:

- поставлена трёхмерная космодинамическая задача сквозной оптимизации траектории межпланетного перелёта КА с единым функционалом, подробным рассмотрением планетоцентрических участков без использования грависфер нулевой протяжённости, с комбинированной тягой и фазировкой;
- предложена методика решения многоэкстремальных задач оптимизации траекторий межпланетных перелётов с возвратом к Земле, с учётом эфемерид, с жёсткой фазировкой, ограниченной комбинированной большой и малой кусочно-непрерывной тягой, включающая решение серии вспомогательных задач в упрощённой постановке и продолжение решения по параметру;
- разработаны численные методы решения краевых задач принципа максимума, возникающих при управлении совокупностью динамических систем, с учётом эффекта потери точности и перестройки структуры траектории при изменении количества активных участков во время продолжения решения по параметру;
- разработана методика, включающая в себя последовательное решение цепочки задач, автор называет ее „лестницей задач“, основанная на поэтапном переходе от задач, решение которых не представляет вычислительных трудностей, таких как оптимизация комбинаций задач Ламберта прямыми методами, к задаче оптимального управления совокупностью динамических систем с кусочно-непрерывным управлением;
- на основе анализа построенных экстремалей Понтрягина оценен выигрыш от использования малой тяги при доставке образцов грунта с Фобоса, позволяющий судить о целесообразности оснащения КА таким двигателем, произведено сравнение различных схем экспедиции.

Научная новизна работы состоит в следующих положениях:

- разработана теоретическая схема построения экстремалей Понтрягина в задачах траекторной оптимизации с возвращением к Земле, жёсткой фазировкой, единым функционалом и сквозной оптимизацией по нему, при этом учитывается эффект потери точности, эфемерид, анализ движения рассматривается при учете планетоцентрических участков, а также комбинированной ограниченной кусочно-непрерывной тяги;
- предложена методика „лестница задач“, основанная на решении задач в упрощённой постановке и методе продолжения решения по параметру, позволяющая построить необходимое начальное приближение.
- разработаны и реализованы на ЭВМ вычислительные методы построения экстремалей Понтрягина на основе предлагаемой методики.

Все перечисленные в отзыве научные результаты представляются **достоверными**. Их достоверность подтверждается использованием математических моделей, описывающих движение КА на межпланетном и планетоцентрическом участках траектории. Некоторые результаты я проверил с использованием располагаемого программного обеспечения. Результаты проверки оказались корректными.

Практическая значимость:

- разработан и реализован программный комплекс для расчёта и оптимизации межпланетных траекторий космических аппаратов, оснащённых ДУ

комбинированной тяги. На его основе могут быть решены задачи оптимизации траекторий перелёта к различным телам Солнечной системы;

- построены конкретные экстремали в задаче перелёта к Фобосу. Решены задачи в различной постановке, в том числе с трёхимпульсным и многовитковым подлётом к Марсу, пертурбационным манёвром у Луны;
- проведена оценка выигрыша от использования ДУ МТ, трёхимпульсного подлёта к Фобосу, пертурбационного манёвра у Луны.

Основные результаты работы опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России и входящих в МБД Scopus и Web of Science, и прошли апробацию на научно-технических конференциях и тематических семинарах.

Диссертация оформлена в полном соответствии с требованиями ВАК Минобрнауки России. Текст написан грамотным научно-техническим языком.

Замечания:

- При моделировании межпланетных траекторий полета КА отсутствует алгоритм «привязки к старту», когда проектируется старт с конкретного космодрома (к. Байконур, к. Восточный), определяются конкретные времена старта РН с космодрома, находящиеся на опорной орбите, которые в данной работе отсутствуют. Это может несколько повлиять на найденные в работе энергетические характеристики. В работе не проводилось сравнение выводения с различных космодромов, что также могло бы улучшить решение поставленной автором задачи оптимизации.
- В тексте автореферата слишком подробно расписаны на 1.5 страницах (с. 7 – 8) семинары, конференции и прочие выступления автора, которые затем повторяются в конце автореферата. Их следовало бы сократить, а освободившийся объем использовать для более подробного описания разрабатываемой в работе методики, для уточнения ряда моментов непонятных из текста автореферата. В частности, в нем отсутствуют характеристики ДУ БТ разгонного блока типа «Фрегат», ДУ СПД-230, ДУ Большой Тяги (БТ) перелетного модуля, ДУ БТ возвращаемого аппарата, которые в полном объеме приведены в тексте диссертации. Также в тексте автореферата представлено мало числовых характеристик проведенного анализа задачи, которые в изобилии присутствуют в тексте диссертации. Считаю, что было бы правильнее уделить внимание выше написанным моментам.
- В главе 4 при анализе траекторий не учитывается влияние возмущений, которые могут существенно изменить геометрию межпланетной траектории полета КА к Фобосу и возвращения его к Земле. Так в работе не рассмотрено влияние притяжения планет-гигантов, таких как Юпитер и Сатурн. Не приведен облик возможного КА (площадь солнечных батарей), из-за чего невозможно оценить влияние давления солнечного света на приведенные характеристики. Также отсутствует учет гармоник гравитационного поля Земли.
- Отдельно хочется остановиться, на схеме трехимпульсного подлета КА к Фобосу: в точке (3) автор меняет текущее наклонение. Такой прием возможен, точка (3) является наиболее удаленной от центра масс Марса, что позволяет корректировать наклонение с наименьшими затратами по величине характеристической скорости. Однако, считаю, что более правильным было бы рассматривать указанные выше возмущения (хотя бы от гравитационного поля Юпитера), а также ввести в параметры управления на этапе трехимпульсного подлета

КА к Фобосу величину подлетного наклонения или в точке входа в сферу Хилла (1), или в перицентре траектории подлета КА к Марсу (2). А затем уже подбором подлетного наклонения в этих точках добиваться заданной величины наклонения в точке (4), примерно равной наклонению орбиты Фобоса относительно экватора Марса. Понимаю, что межпланетный перелет происходит или в плоскости эклиптики, или в области близкой к ней, тем не менее, мне представляется возможным изменение подлетного наклонения в точках (1) и (2) в диапазоне $\pm 5^\circ$. Таким образом, изменением подлетного наклонения в точках (1) и (2), а также в точке (3) (если понадобится еще большее изменение наклонения орбиты перелета к Фобосу), можно добиться еще большей оптимизации рассматриваемой задачи.

- На стр. 109 текста диссертации сказано, что высота орбиты в перицентре орбиты подлета к Марсу в точке (2) составляет 50 км, что составляет достаточно малую величину. Высота условной границы атмосферы Марса в расчетах специалистов НПО Лавочкина принимается равной 120 км. Поэтому, в качестве минимальной реализуемой высоты в перицентре следовало бы рассматривать высоту в 200 км, в противном случае необходимо рассматривать участок полета КА в атмосфере Марса.
- Хотелось бы обратить внимание на представление числовой информации, на большое, избыточное, количество знаков после запятой, в представлении массы КА на разных этапах полета, длительности выведения, длительностей работы ДУ. Обычно «хорошим тоном» является представление чисел вплоть до 3 значащей цифры после запятой.
- Автор рассмотрел только полет к Фобосу, вместе с тем интересно было бы посмотреть, как поведет себя методика, изменяются характеристики при полете к Сатурну, Юпитеру, Урану и их спутникам.
- Несмотря на приведение в диссертации числовых характеристик полученных экстремалей, в диссертации отсутствуют графики полученных углов управления в системе координат, связанной с осями КА.
- При моделировании межпланетной траектории возвращения КА к Земле не учитывается её притяжение, также не рассмотрена задача входа возвращаемого аппарата в атмосферу Земли с допустимыми скоростью и углом входа.
- В тексте автореферата и диссертации присутствуют ряд несущественных опечаток и описок.

Указанные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы. Большая часть замечаний носит рекомендательный характер и отражает пожелания, которые можно учесть в будущих исследованиях при анализе межпланетных траекторий с учетом планетоцентрических участков.

Диссертационная работа хорошо оформлена. Качественно оформлен графический материал.

Содержание работы, представленные в ней решения анализируемой актуальной проблемы показывают, что автор является квалифицированным специалистом в области механики космического полета.

Объем текста диссертации, степень проработанности вопроса, а также число публикаций автора (7 статей в изданиях, рецензируемых ВАК Минобрнауки России, входящих в базы Scopus и Web of Science) указывают на фундаментальный подход автора к решению поставленной задачи разработки методики построения

экстремалей Понtryгина в задачах сквозной траекторной оптимизации межпланетных перелетов с учетом планетоцентрических участков.

Автореферат содержит основные научные результаты диссертации и соответствует ее содержанию.

Заключение

Считаю, что диссертационная работа "Методика построения экстремалей Понtryгина в задачах сквозной траекторной оптимизации межпланетных перелетов с учётом планетоцентрических участков" является самостоятельной завершенной работой, выполненной на высоком научном уровне с применением современных методов научных исследований, по своему содержанию полностью соответствует паспорту специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

Она удовлетворяет требованиям Положения ВАК Минобрнауки России о порядке присуждения ученых степеней (п. 9 – 14), утвержденным Правительством Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а ее автор, Самохин Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

Отзыв составил официальный оппонент

Гордиенко Евгений Сергеевич,

кандидат технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»,
математик 2 категории Акционерного общества

«Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»,

адрес: 141400, г. Химки, Московская область, ул. Ленинградская, д. 24,

телефон: 8 (495) 573-56-75, 575-55-11,

e-mail: gordienko.evgenyy@gmail.com,

сайт: <https://www.laspace.ru/>

19 апреля 2021 года

Е. С. Гордиенко

Подпись официального оппонента

Е.С. Гордиенко удостоверяю

Заместитель генерального директора

по персоналу и общим вопросам

19 апреля 2021 года



И.В. Шолохова