

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Филиппова Григория Александровича
"Формирование Парето-оптимальных номинальных программ управления относительным
движением космического аппарата с конечной тягой на околокруговых орбитах",
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности
2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов**

Диссертационная работа Г.А. Филиппова относится к классу задач оптимального управления тягой космического аппарата (КА) для сближения с целью за ограниченное время на околокруговых орбитах. Предполагается, что ускорение, создаваемое двигательной установкой КА, является малым по сравнению с ускорением силы притяжения. Это означает, что продолжительность работы двигателя на каждом витке сравнима с периодом обращения спутника-цели вокруг Земли и применение импульсной теории маневрирования некорректно. В качестве цели может выступать как реальный пассивный спутник, с которым намечены операции стыковки или инспекции, так и условный спутник, представляющий собой точку на целевой орбите, в которой должен оказаться активный КА в указанный момент времени. Ускорение от тяги двигателя принимается постоянным, а угол отклонения вектора тяги от трансверсального направления является управляющим параметром. Критерием оптимальности выступает время работы двигателя КА. Задача решается для движения маневрирующего КА в отклонениях от орбиты цели в цилиндрической системе координат. Для получения строго оптимального решения в центральном гравитационном поле автор применяет принцип максимума Л.С. Понтрягина и показывает, что трансверсальная ориентация вектора тяги приводит к решению, уступающему оптимальному в среднем не более чем на 10% (3-5% при коррекции вековых изменений и 10-15% при коррекции периодических). Далее предлагается рассмотреть задачу двухпараметрической оптимизации, где оптимизируемыми величинами являются время перелёта и общая продолжительность работы двигателя, для получения набора не улучшаемых решений, образующих Парето-фронт. В случае трансверсальной ориентации вектора тяги автором предложена методика, приводящая к аналитическим выражениям, позволяющим получить хорошее приближение для расчёта начала и конца активных и пассивных участков траектории перелёта. Итерационное уточнение полученного решения при численном моделировании задачи приводит к незначительной коррекции (1-3%) этого приближённого решения. Автор разработал алгоритмы построения множества номинальных, оптимальных по Парето, программ управления продольным относительным движением КА в двухкритериальной постановке – по затратам времени перелёта и затратам продолжительности работы двигателя КА. Эти алгоритмы протестированы на различных начальных условиях, в том числе для перевода КА в заданную точку стояния на геостационарной орбите.

Актуальность работы.

Реализация современных космических программ во многом связана с задачами обеспечения требуемого относительного движения космических аппаратов: при сближении с объектом для последующей стыковки или при совместном полёте как в составе группы (Formation Flying), так и в составе спутниковой системы (Constellation). Приведение КА в окрестность пассивного объекта и удержание КА вблизи этого объекта с целью инспекции потребуются в перспективных миссиях по уводу крупного космического мусора. В настоящее время возрастает роль малых КА, которые всё чаще оснащаются двигателем малой тяги, что значительно улучшает спектр решаемых ими задач. Двигатели с малой тягой вследствие своей эффективности могут использоваться и для довыведения массивных КА на целевые орбиты. Появление в математических моделях движения непрерывного и длительного по времени возмущающего ускорения от двигателя приводит к необходимости отказа от импульсной постановки задачи коррекции орбиты.

Математический формализм, предлагаемый принципом максимума для поиска оптимального управления ориентацией вектора тяги, является эффективным, но недостаточно наглядным. Многими коллегами показано, что в случае маневрирования в окрестности круговой орбиты вклад трансверсального ускорения в изменение параметров орбиты a , e и ω является определяющим. Например, А.А. Барановым создана имеющая графическую интерпретацию теория маневрирования на околокруговых орбитах с использованием трансверсальных и боковых импульсов скорости, а некоторые её положения адаптированы для перелётов и с малой тягой. В данной диссертационной работе автор рассматривает только движение в плоскости орбиты цели и предлагает другой подход, основанный на управлении размерами участков постоянной трансверсальной тяги. Эти участки могут быть как активными (разгонными или тормозными), так и пассивными. На основе анализа линеаризованных уравнений относительного движения автором определено необходимое количество этих участков для конкретных граничных условий перелёта, а также получены аналитические формулы для определения размеров активных участков. Это обеспечивает получение хорошего начального приближения для решения задачи возмущённого движения, что приведёт к быстрой сходимости соответствующих итерационных процедур. Кроме того, предложенная методика позволяет заранее выявить структуру оптимальной схемы управления тягой двигателя КА и передать эти данные всем заинтересованным сторонам. Применение аналитических зависимостей повышает оперативность анализа возможных траекторий перелёта и обеспечивает понимание влияния входных данных модели на результат расчёта со стороны проектанта. Таким образом, результаты диссертационной работы могут обеспечить заметное сокращение рабочего времени при планировании и анализе динамических операций КА и потому являются актуальными.

Новизна проведённых исследований и полученных результатов.

Автор использует известную, встречающуюся в книге П.Е. Эльясберга 1965 г., линейризованную модель движения активного КА в отклонениях от околокруговой орбиты цели. Методом принципа максимума Л.С. Понтрягина автором получены серии решений задачи оптимального управления относительным движением КА, определены структуры оптимального управления и оценены предельные минимальные затраты времени работы двигателя КА при фиксированной продолжительности перелёта. Стоит отметить, что формализм, предлагаемый принципом максимума, является нетривиальным. Несмотря на 50 лет, прошедшие с момента разработки этого метода, его применение и сегодня вызывает трудности, связанные с поиском начального приближения для сопряжённых переменных, а также с учётом реальных ограничений на параметры траекторий ракет и КА.

Автором построена математическая модель относительного движения, инвариантная к параметрам опорной орбиты и величине ускорения от тяги маневрирующего КА. Это позволяет анализировать конкретный перелёт на сетке безразмерных начальных условий. Одним из направлений развития диссертационной работы может стать создание соответствующей библиотеки, которая методом интерполяции позволит быстро оценивать программу управления для любых начальных условий движения.

В качестве альтернативы принципу максимума автор для критериев «время перелёта – общая продолжительность работы двигателя» предлагает двухпараметрическую Парето-оптимизацию программ управления трансверсальной тягой. Им определены области граничных условий, допускающие применение полученных решений. В работе выполнен анализ поведения сопряжённых переменных для программ оптимального управления в зависимости от входных данных (доминирование коррекции векового, периодического движения или сопоставимое их изменение). Это позволило в рамках двухпараметрической оптимизации задать структуру квазиоптимального управления и получить аналитические соотношения для расчёта размеров активных участков траектории маневрирующего КА. Фактически для проектирования траекторий с малой тягой предложен новый действенный метод, основанный на использовании трансверсальной ориентации вектора тяги и в случае околокруговых орбит характеризующийся лишь незначительным проигрышем в сравнении с оптимальным управлением.

Разработанный автором алгоритм построения множества Парето-оптимальных программ управления относительным движением с двумя и тремя включениями трансверсальной тяги является наглядным, хорошо программируемым и оригинальным. Алгоритм характеризуется быстрой сходимостью и обеспечивает получение решений, не противоречащих основным положениям механики космического полёта. Предлагаемый автором подход к поиску программ управления вносит заметный вклад в теорию маневрирования с малой тягой на околокруговых орбитах и может быть расширен в ходе дальнейшей работы для решения некомпланарных задач.

Степень обоснованности и достоверности полученных положений, выводов и заключения.

Диссертационная работа написана с использованием строгого математического аппарата, характеризуется полнотой приводимых математических преобразований и адекватностью как самой модели движения, так и входных данных. Для приведения модели к формализму принципа максимума используются известные уравнения движения в отклонениях от круговой орбиты. Обозначения, применяемые автором в математических моделях, полностью соответствуют общепринятым в научных специальностях 2.5.16 и 1.1.7.

Малые отличия решений с трансверсальной тягой от оптимальных решений укладываются в основные положения теории маневрирования на околокруговых орбитах. Эффективность трансверсальных импульсов скорости по сравнению с радиальными для коррекции большой полуоси орбиты, её эксцентриситета и фазовой разницы по аргументу широты не вызывает сомнений. На траектории, близкой к окружности, трансверсальное направление с точностью до знака почти совпадает с касательным, поэтому создание тяги в этом направлении заметно влияет на изменение модуля скорости движения центра масс КА, а, следовательно, и на изменение параметров его движения в плоскости орбиты. Коррекция периодических составляющих относительного движения фактически означает коррекцию вектора эксцентриситета. Данные, приведённые, например, на рис. 2.7а, примерно соответствуют соотношению $\operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{tg}\varphi$, полученному А.А. Барановым для оптимального направления тяги при коррекции эксцентриситета (α – угол отклонения вектора тяги от трансверсального направления, φ – угол от середины активного участка до текущей точки на витке).

Автор отмечает, что для многовитковых перелётов при увеличении общего времени манёвра продолжительности активных участков уменьшаются, а пассивных – увеличиваются. Количество включений тяги на траектории также увеличивается. При этом, структура управления на витке остаётся неизменной. Это справедливо, так как решение стремится к импульсной постановке.

В диссертации приведено достаточное количество таблиц и поясняющих рисунков, на которых отображены результаты расчёта с применением разработанных алгоритмов двухкритериальной оптимизации. Эти данные отображают динамику приведения КА в нужную точку без разрывов и специфических особенностей, позволяют чётко идентифицировать участки разгона и торможения, а также не противоречат аккуратным решениям, полученным с применением принципа максимума. Алгоритмы тестируются не менее, чем на 6 наборах начальных условий, отличающихся по смысловой нагрузке корректируемых отклонений. Каждая из глав диссертации содержит выводы, корректно отражающие суть проведённых исследований. Используемые методы математического анализа и численные методы решения дифференциальных уравнений являются хорошо отработанными и не должны приводить к неадекватным результатам моделирования.

Значимость результатов для науки и практики. Практическая значимость

Для получения строго оптимального решения со свободной ориентацией вектора тяги автор предлагает разбить решение на два этапа. Сначала рассматривается управление отдельно вековыми и отдельно периодическими составляющими относительного движения. Это позволяет определить возможную структуру оптимального управления, а для случая трансверсальной ориентации вектора тяги – получить аналитические соотношения для определения энергетических характеристик перелёта. Полученные результаты используются как начальное приближение для поиска программ управления с целью коррекции всех элементов в плоскости орбиты.

Автором предложен более наглядный, по сравнению с принципом максимума, способ анализа и нахождения параметров программ управления малой тягой КА при маневрировании в окрестности круговой орбиты. С учётом того, что большинство околоземных орбит являются околосферическими, разработанные алгоритмы имеют потенциал применения в практической работе.

Рассчитываемое автором исчерпывающее множество Парето-оптимальных программ управления с трансверсальной тягой лишь незначительно отличается от результатов, получаемых с использованием принципа максимума, и позволяет определить области применения параметрических программ управления с различной структурой, выявить необходимое количество включений двигателя и знак проекции вектора тяги на трансверсальное направление.

Достоинства и недостатки по содержанию и оформлению, мнение о работе в целом.

Диссертационная работа Г.А. Филиппова является законченным научно-техническим исследованием. Она представляет интерес для специалистов, занимающихся оптимизацией программ управления КА с двигателем малой тяги. Замечания к тексту диссертации можно разбить на три типа: замечания по содержанию, замечания по оформлению и замечания общего характера.

Замечания по содержанию.

1. В тексте диссертации присутствует некоторая терминологическая путаница:

- создающие большую тягу химические двигатели, к которым можно отнести как жидкостные ракетные двигатели, так и твердотопливные ракетные двигатели, отождествляются с импульсными. Можно понять, что имеется в виду возможность этих двигателей создавать нужное приращение скорости за малое время работы, что приближает реальное исполнение манёвра к мгновенному (импульсному) изменению параметров орбиты. Однако употребление термина «импульсные», по мнению оппонента, является некорректным;

- двигатели, создающие малую тягу, названы двигателями конечной тяги, при том, что у реальных химических двигателей тяга тоже конечна (ограничена);
 - используется термин «моторное время», который мало распространён в литературе и может быть заменён более понятным «продолжительность работы двигательной установки (ДУ)» или просто «время активного участка траектории (АУТ)»;
 - полярный угол (аргумент широты) предлагается отсчитывать от некоторой начальной оси, хотя для задач конкретной предметной области его принято отсчитывать от направления на восходящий узел орбиты;
 - на стр. 12 вместо ограниченной тяги вводится термин «средняя» тяга, который в сочетании с конечной, большой, ограниченной и малой несколько утомляет читателя;
 - на странице 17 сказано, что под малыми космическими аппаратами, как правило, понимаются аппараты массой 20..100 кг, размещённые на круговых орбитах высотой до 1000 км. Не совсем понятно, при чём здесь отсылка к высоте орбиты?
 - на странице 19 боковая составляющая вектора скорости (проекция на ось z цилиндрической системы координат) названа нормальной скоростью, что недопустимо, так как нормальный орт встречается в естественном трёхграннике (трёхгранник Френе), а вектор скорости в нём полностью проецируется на касательное направление;
 - в тексте говорится об угловой скорости движения КА (точки) по орбите, но имеется в виду, видимо, угловая скорость его радиус-вектора;
 - в уравнениях 1.4 и далее по тексту средняя угловая скорость радиус-вектора КА обозначена как λ , но в соседней системе 1.7 этот параметр почему-то записан как ω ;
 - на странице 27 и далее говорится об отрицательном трансверсальном направлении, хотя, видимо, имеется в виду направление, противоположное трансверсальному, которое, в свою очередь, задаётся в привязке к радиус-вектору КА по правилу правой тройки;
2. Одной из задач работы указана разработка математической модели относительного движения центра масс КА. Было бы корректнее указать особенности желаемой модели движения: её безразмерность, а также выделение периодических и вековых составляющих.
 3. В последнем уравнении системы 1.1 содержится опечатка, а фундаментальная матрица 1.7 записана с ошибками (элементы $\Phi_{1,5}$ и $\Phi_{2,5}$). Эта матрица приведена в книгах П.Е. Эльясберга и А.А. Баранова, нетрудно её получить и самостоятельно, используя методы операционного исчисления.
 4. На стр. 31 и далее нет комментариев о корректности применения обратных тригонометрических функций с учётом ограничений на области возвращаемых ими значений.

5. Нет комментариев о том, может ли функция F в формуле 2.5 (и далее в аналогичных формулах 2.10, 2.15) оказаться равной нулю. В этом случае функция $\text{sign}(F)$ вернёт значение 0, создав непредусмотренный режим тяги $\delta = 1/2$.
6. В тексте работы не объясняется, чем на рис. 4.1 объясняется неровность Парето-фронта?
7. В четвёртой главе для траекторий в плоскости экватора вблизи геостационарной орбиты (ГСО) анализируются погрешности разработанных алгоритмов при их использовании в модели движения со второй зональной гармоникой. Во-первых, на экваторе слагаемое геопотенциала с J_2 формирует только радиальное ускорение, поэтому пример с ГСО не может показать все неточности алгоритма. Во-вторых, в окрестности ГСО возмущения от Луны почти равны возмущениям от J_2 , поэтому учитывать только фактор J_2 некорректно.
8. В четвёртой главе нет сравнения результатов с принципом максимума, их полезно было бы привести, хотя на рис. 3.9 и показано, что различия малы.
9. На стр. 110 сказано, что одна из точек полученного Парето-фронта близка к решению, приведённому в книге Р. Беллмана. Однако неплохо было бы привести и сам результат, полученный Р. Беллманом.

Замечания по оформлению.

В тексте огромное количество опечаток и речевых ошибок. И хотя во всех случаях интуитивно можно догадаться, что имел в виду автор, непонятно, почему они не были исправлены при подготовке финальной версии рукописи. Судя по всему, при наборе текста использовалась издательская система LaTeX. Прекрасно понимая её преимущества при подготовке книг, считаю, что для диссертации её применение не оправдано из-за плохой наглядности при редактировании материала. Уверен, что использование обычного текстового редактора типа MS Word позволило бы избежать большей части ошибок. Особенно они критичны в формулах:

- на стр. 30 в первых двух формулах системы 2.2. вместо β должно быть δ . То же – в формуле 2.15 и в подписях к рис. 2.3а и 2.7б. Эта опечатка вдвойне неудачна, так как под β у автора понимается угол отклонения КА от плоскости движения и этого параметра не может быть в компланарной задаче;
- на стр. 25 и стр. 26 записаны не те формулы для моторного времени;
- на стр. 25 введена функция F , на стр. 39 функция невязок тоже обозначена как F , а в формулах 2.5, 2.10 и 2.15 контрольные функции сопряжённых переменных также названы F . Далее на стр. 42 автор начинает анализировать поведение функции F , а читатель вынужден разбираться, какая из них имеется в виду;
- на рис. 2.7а некорректно нанесены подписи делений на оси абсцисс;
- на рис. 2.10в и 2.12в следовало бы выделить активные и пассивные участки, как это показано на 2.7а и 2.11в, 2.13в соответственно;

- подписи к рис. 3.2 и 3.3 совпадают, хотя, скорее всего, рис. 3.3 показывает пример множества Парето для граничных условий второй области;
- подпись к рис. 3.8 говорит о схеме с разгоном и двумя торможениями, хотя раздел и содержание рисунка посвящены схеме с двумя разгонами и одним торможением;

Замечания общего характера.

- на стр. 12 в качестве примера приводится выведение КА с малой тягой на геостационарную орбиту и говорится о слабом влиянии ввода пассивных участков траектории на затраты суммарной характеристической скорости. В этой частной задаче это действительно так, потому что для изменения большой полуоси оптимальным является случай с непрерывной работой двигателя на витке в касательной ориентации, а изменения эксцентриситета при этом почти не происходит. Однако при переходе между двумя близкими околокруговыми орбитами и, тем более, при решении задачи встречи, затраты на формирование вектора эксцентриситета и коррекцию разности фаз могут потребовать сравнимое приращение скорости и некоторый минимум витков, содержащих и пассивные участки тоже. Тогда становится непонятным, с какой целью в разделе с классификацией тяги приведён этот пример;
- на стр. 14 приведена классификация ЭРДУ (электротермические, электростатические, электромагнитные (плазменные) двигатели, импульсные плазменные двигатели). Следом приведено краткое описание некоторых типов ЭРДУ: ионный, стационарный плазменный, магнитоплазодинамический. Из текста не ясно как эти типы соответствуют введённой ранее классификации;
- в формулах 1.9 углы φ и φ_z введены без указания оси, от которой они отсчитываются и положительного направления отсчёта;
- на стр. 26 был введён символ, показывающий, что преобразования ведутся в безразмерных переменных. Возможно, его стоило оставить;
- в формуле 2.21 введены два скалярных параметра, которые обозначены полужирным текстом. Возможно, этого не стоило делать, поскольку так обычно обозначаются векторы и матрицы;
- на стр. 40 введены граничные условия, соответствующие доминированию требования коррекции периодического движения (вариант А), доминированию требования коррекции векового движения (варианта В) и их сопоставимому изменению (вариант Б). Не очень понятно, зачем нарушать алфавитный порядок при описании вариантов.

Указанные недостатки **не влияют** на общую положительную оценку работы.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы в 6 статьях, три из которых – в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, три – в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus.

Автореферат соответствует диссертации.

Считаю, что работа "*Формирование Парето-оптимальных номинальных программ управления относительным движением космического аппарата с конечной тягой на околокруговых орбитах*" удовлетворяет требованиям Положения ВАК (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, а её автор – Филиппов Григорий Александрович – заслуживает присуждения ему искомой степени.

Отзыв составил официальный оппонент

Гришко Дмитрий Александрович

кандидат физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика», доцент кафедры ФНЗ «Теоретическая механика» им. профессора Н.Е. Жуковского, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)**»

105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, <https://bmstu.ru/>

тел. (499)263-63-75 , E-mail: dim.gr@bmstu.ru

25 января 2023 г.



Д.А. Гришко

Подпись официального оппонента Д.А. Гришко удостоверяю

