

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЦЕНТР «САРАТОВСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» (ФИЦ СНЦ РАН)

ул. Рабочая, 24, г. Саратов, 410028

Тел./факс (845-2) 23-45-10, 27-14-36. E-mail: snrcransar@san.ru, www.snцран.рф

13.02.2023 № 14800f-25

На № _____ от _____



Отзыв ведущей организации

федерального государственного бюджетного учреждения науки федеральный
исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ
СНЦ РАН)

на диссертационную работу 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 Филиппова Г. А. посвящена оптимизации программ
номинального управления относительным движением маневрирующего космического
аппарата, снабжённого двигательной установкой конечной тяги, в окрестности пассивного
космического аппарата, движущегося на околокруговой орбите.

Задача управления движением одного космического аппарата (КА) относительно
другого решалась на ранних этапах освоения околоземного космического пространства,
когда возникла необходимость организации группового полёта, сближения и стыковки КА.

В качестве исполнительных органов для управления движением используются как традиционные импульсные двигатели, так и перспективные при длительных сроках существования электроракетные двигатели и другие типы двигательных установок конечной тяги. Решение задач управления относительным движением для таких двигателей потребовало разработки соответствующих моделей и методов выбора номинального управления, отличных от таковых для импульсных двигателей.

В качестве критериев выбора номинального управления относительным движением выступают или общая продолжительность манёвра (задача быстрогодействия) или суммарные затраты характеристической скорости манёвра при фиксированной продолжительности. Требования минимальной характеристической скорости и быстрогодействия противоречивы. Традиционно, задаются граничные условия перелёта и общая его продолжительность, а затраты характеристической скорости минимизируются.

Диссертационная работа Филиппова Г. А. посвящена сравнительно новой задаче – многокритериальной оптимизации программ относительного движения, в которой и продолжительность манёвра и затраты характеристической скорости рассматриваются как два независимых критерия. Таким образом, проблема, цель и задачи диссертационной работы являются актуальными.

Диссертация Филиппова Г. А. состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 60 названий. Общий объём диссертации 131 страница. Работа содержит 34 рисунка и 23 таблицы.

Во введении сформулирована цель исследования, обоснована её актуальность. Поставлены задачи исследования и обозначены положения, по которым автор претендует на научную новизну. Приведены сведения об апробации основных результатов работы на научных конференциях и сведения о публикациях, из которых три в изданиях, входящих в перечень ВАК, и четыре в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science.

В первой главе рассмотрены различные методы решения задач оптимизации программ управления относительного движения космического аппарата. В явном виде указана необходимость решения этой задачи в многокритериальной постановке. Приведён краткий обзор современных и перспективных двигательных установок конечной тяги, используемых в качестве маршевых двигателей космического аппарата, в том числе и перспективных малых космических аппаратов, по мнению автора имеющих массу 20 .. 100 кг и расположенных на круговых орбитах высотой до 1000 км. Автором введены в рассмотрение два космических аппарата, названные маневрирующим и пассивным. Приводится математическая модель управляемого относительного движения

маневрирующего космического аппарата, основанная на линеаризации уравнений движения в орбитальной цилиндрической системе координат относительно пассивного космического аппарата. В относительном движении автором введены вековые и периодические составляющие относительного движения, уравнения для которых приведены к безразмерному виду. Приведена формальная постановка задачи двухкритериальной оптимизации программ управления относительным движением.

Вторая глава посвящена исследованию программ оптимального управления относительным движением. С применением формализма принципа максимума Понтрягина автором решена задача выбора номинального управления продольным относительным движением как для варианта отсутствия ограничений на ориентацию вектора тяги, так и для практически важного случая – ориентации вектора тяги в положительном или отрицательном трансверсальном направлении с пассивным участком.

Автором рассмотрены как задачи совместного управления, когда происходит одновременная коррекция и векового и периодического движения, так и задачи поэтапного управления, в которых на первом этапе решена задача коррекции векового движения, а на втором периодического. Решение последних задач, по мнению автора, позволило получить начальное приближение к решению задачи совместного управления.

Автором проанализированы структуры поэтапного управления. Для задачи управления вековыми составляющими движения с трансверсальной ориентацией тяги программа управления имеет два включения тяги, которые разделены пассивным участком. Знак тяги на активных участках определяется линейной функцией времени. В задаче управления периодическими составляющими движения с трансверсальной ориентацией вектора тяги в пределах программа управления имеет два включения тяги, центры которых расположены в апсидальных точках, а знак тяги и её включение/выключение определяется гармонической функцией времени. По мнению автора, такие структуры управления единственны.

Для анализа структур управления относительным движением, автором введена в рассмотрение область граничных условий, в которую включены варианты доминирования требования коррекции векового или периодического движения, а также их сопоставимое изменение. Автором показано, что оптимальная программа управления имеет сложную структуру.

При доминировании требования коррекции векового движения, программа содержит три области. В первой и третьей структура управления стремится к структуре оптимального управления вековым движением, во второй – периодическим.

При доминировании требования коррекции периодического движения и сопоставимом изменении векового и периодического движения, программа содержит две области. В первой структура оптимального управления стремится к структуре управления периодическим движением, во второй – вековым.

Автором получены аналитические соотношения для определения минимальных затрат моторного времени в задачах поэтапного управления и, на основании численного расчёта, оценены минимальные затраты моторного времени в задаче управления относительным движением.

В третьей главе рассмотрена двухкритериальная оптимизация параметрических программ управления относительным движением с двумя и тремя включениями тяги в трансверсальном направлении. В параметрических программах управления знак тяги на активных участках может быть одинаковым и разным.

Автором определены области, в которых знак тяги на первом активном участке положительный и отрицательный, на последующих участках он изменяется в соответствии со структурой программы. Выделены области, допускающие применение программ с одинаковым знаком тяги.

Автором проведено глубокое исследование программы управления с двумя включениями тяги разного знака. Автором получены аналитические соотношения для размеров активных участков как функций граничных условия для векового движения и размеров пассивных участков. Аналитически определены границы множества Парето оптимальных решений задачи. Проведён глубокий анализ возможности коррекции составляющих периодического движения, который показал, что максимальное его изменение составляет четыре безразмерных единицы, которое достигается при размере пассивного участка, кратном половине орбитального периода. Автором разработан алгоритм расчёта размеров активных и пассивных участков, предусматривающий выделение оптимальных по Парето решений задачи из множества возможных.

Рассмотрена структура управления с двумя и тремя включениями тяги одинакового знака. Автором строго математически показано, что она обеспечивает минимально возможные затраты моторного времени.

Автором проанализированы структуры управления с тремя включениями тяги разного знака. Для этих структур получены аналитические соотношения, связывающие размеры активных участков (двух из трёх) с граничными условиями для вековых составляющих движения и с размерами пассивных участков. Приведено большое количество аналитических исследований, связанных с определением рациональных размеров пассивных участков, обеспечивающих предельное изменение периодических

составляющих. Показано, что для различных структур с тремя включениями тяги оно составляет шесть безразмерных единиц, которое достигается при различных сочетаниях размеров пассивных участков.

Для программ управления с тремя включениями тяги разработаны алгоритмы расчёта размеров активных участков, предусматривающие выбор оптимальных по Парето решений задачи из множества получаемых.

Приведено сравнение результатов параметрической оптимизации с оптимальными решениями, полученными во второй главе. Автором отмечается, что полученные параметрические решения задачи хуже оптимальных на 3 – 5 %, что с технической точки зрения не является принципиальным.

Четвёртая глава посвящена прикладным задачам управления относительным движением. С применением авторских параметрических программ управления решена задача приведения космического аппарата в точку стояния геостационарной орбиты с граничными условиями, заимствованными в других источниках. Автором отмечено, что получено решение, близкое к ранее опубликованному, что рассматривается автором как подтверждение правильности разработанной методики расчёта программ управления с двумя и тремя включениями тяги.

Дополнительно автором решена задачи приведения космического аппарата в точку стояния геостационарной орбиты для граничных условий «малое» и «большое» отклонение, различающиеся размером начальных отклонений параметров движения маневрирующего космического аппарата от требуемых. Автором выполнен расчёт Парето-оптимальных параметрических программ управления для введённых граничных условий и выполнено моделирование относительного движения на исходной модели с учётом возмущений, которое показало близость возмущённых траекторий к номинальным.

В заключении кратко перечислены основные результаты работы.

Новизна работы, а также полученных в диссертации Филиппова Г. А результатов, заключается в:

1. построена математическая модель относительного движения космического аппарата, инвариантная к параметрам опорной орбиты и величине ускорения от тяги маневрирующего космического аппарата;
2. методом принципа максимума Понтрягина получены серии решений задачи оптимального управления относительным движением космического аппарата, определены структуры оптимального управления и оценены предельные минимальные затраты моторного времени;

3. определены структуры параметрических программ управления относительным движением с двумя и тремя включениями тяги в трансверсальном направлении;
4. получены аналитические соотношения для расчёта размеров активных участков параметрических программ управления, определены области граничных условий, допускающие их применение, получены аналитические соотношения для расчёта предельных затрат моторного и общего времени;
5. разработан алгоритм построения множества оптимальных по Парето номинальных программ управления относительным движением с двумя и тремя включениями тяги в трансверсальном направлении по критериям минимум моторного времени и минимум общего времени.

Теоретическая значимость работы заключается в определении оптимального управления относительным движением с пассивным участком методом принципа максимума Понтрягина.

Практическая значимость работы заключается в получении аналитических соотношений для размеров активных участков и предельных значений критериев параметрических программ управления с двумя и тремя включениями тяги в трансверсальном направлении по критериям минимум моторного времени и минимум общего времени и получение исчерпывающего множества оптимальных по Парето программ управления.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением известных численных методов решения краевых задач оптимального управления, известных методов численного интегрирования уравнений движения, сравнением результатов, полученных в диссертации, с результатами, полученными другими авторами.

Замечания по диссертационной работе:

1. В диссертационной работе построена безразмерная математическая модель относительного движения, которая, как показано самим же автором, инвариантна к параметрам опорной орбиты и проектным характеристикам космического аппарата. Однако автором приводятся численные расчёты только для геостационарной орбиты.
2. Автором практически никак не раскрыты важные вопросы, связанные с методом решения краевых задач оптимального управления во второй главе и решения уравнений периодического движения в третьей. Автором упоминается использование градиентного метода для минимизации функции невязок по граничным условиям с весовыми коэффициентами во второй главе и вообще не

указан численный метод, который был использован для решения задач в третьей главе.

3. Автором рассмотрена задача выбора оптимальных по Парето решений задачи выбора параметрических программ управления из множества найденных, однако, не рассмотрена задача сужения этого множества с применением методов теории принятия решений.

Данные замечания не снижают общей положительной оценки теоретической и практической значимости представленной диссертации. Они носят частный характер и могут рассматриваться как рекомендации на дальнейшее развитие работы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, представленных в диссертационной работе

Полученные в диссертационной работе Филиппова Г. А. результаты и выводы могут быть рекомендованы к использованию на предприятиях космической отрасли для предварительной оценки затрат рабочего тела и времени на довыведение и поддержание орбиты перспективных проектируемых телекоммуникационных космических аппаратов, расположенных на геостационарной орбите, и, в силу универсальности модели движения, других космических аппаратов, расположенных на круговых околоземных орбитах.

Оценка работы в целом

Диссертация написана ясным научным языком, содержание её глав логически взаимосвязано и в полном объёме раскрывает постановку, методы и алгоритмы решения поставленных задач. Основные результаты исследований опубликованы в 14 работах, в том числе три статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, четыре статьи в изданиях, индексируемых международными базами Scopus и Web of Science.

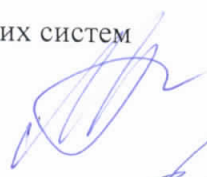
Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Заключение

Рассмотренная диссертация является законченной научно-квалификационной работой. Работа выполнена на высоком научной уровне и удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а её автор – Филиппов Григорий Александрович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Отзыв обсужден и одобрен после его рассмотрения на заседании лаборатории «Анализ и синтез динамических систем в прецизионной механике», протокол № 1 от «3» февраля 2023 г.

Заведующая лабораторией
«Анализ и синтез динамических систем
в прецизионной механике»
д.ф.-м.н., г.н.с.


Барулина Марина Александровна

К.ф.-м.н., доцент, с.н.с.


Панкратова Елена Владимировна

Подписи Барулиной М.А., Панкратовой Е.В. заверяю.






Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук»**

Адрес: 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, 24

Тел. (845-2)27-14-36; (845-2)23-45-10

E-mail: sncransar@san.ru; sncransar@yandex.ru

Сайт: <http://СНЦРАН.рф>