



Государственная корпорация  
по космической деятельности "Роскосмос"



Акционерное общество  
"Центральный научно-исследовательский институт  
машиностроения" (АО "ЦНИИмаш")

ул. Пионерская, д. 4, корп. 22  
г.о. Королёв,  
Московская область, 141070

Тел.: +7 (495) 513 5951  
Факс: +7 (495) 512 2100

e-mail: corp@tsniimash.ru  
http://www.tsniimash.ru

ОГРН 1195081054310  
ИНН/КПП 5018200994/501801001

23.09.2024 исх. № 09001-21806

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Экз. № 1

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Щербакова Михаила Сергеевича "Выбор орбит и алгоритмов управления инспекционным движением малоразмерного космического аппарата", представленную в диссертационный совет № Д 24.2.379.03 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева" (Самарский университет) на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

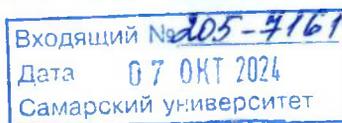
Диссертационная работа Щербакова Михаила Сергеевича посвящена оптимизации по критерию совокупных энергетических затрат:

- выбора номинальной инспекционной траектории малоразмерного космического аппарата (МКА) относительно объекта инспекции (ОИ);
- управления инспекционным движением МКА относительно номинальной траектории.

Инспекция космического объекта (ОИ) на орбите может проводиться для определения его технического состояния, оценки возможности некооперируемого сближения с ним для проведения технического обслуживания, ремонтно-восстановительных работ, для захвата и увода в плотные слои атмосферы, а также для вывода из строя в случае начала боевых действий в космосе.

Как правило, МКА-инспектор обслуживает сразу несколько ОИ, поэтому эффективность операции инспекции определяется энергетическими затратами на проведение одной инспекции: чем меньше затраты ракетного топлива на одну инспекцию, тем эффективнее операция инспекции.

Щербаков М.С. решает задачу выбора орбит и управления инспекционным движением малоразмерного космического аппарата, исходя из минимума энергетических затрат, в связи с чем актуальность его работы не вызывает сомнений.



Сформулированная соискателем **цель исследований** состоит в разработке "...баллистического обеспечения инспекционного движения на протяжении миссии полёта путём совместного решения задач выбора параметров орбит, обеспечивающих длительное пассивное инспекционное движение, и формирования подходов к коррекции инспекционной траектории МКА, учитывающих выявленные особенности пассивной инспекции...".

В диссертационной работе Щербакова М.С. в комплексе рассматриваются:

- выбор начальных параметров орбитального движения МКА-инспектора для обеспечения пассивного движения на траектории облёта ОИ на возможно большем интервале времени;
- поддержание длительной инспекции ОИ при помощи одноимпульсной коррекции орбитального движения МКА-инспектора.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

**Во введении** показана актуальность выбранной темы исследования, приведён обзор работ по математическому моделированию инспекционного движения, дан обзор степени ее разработанности, выбран объект и предмет исследований, сформулирована цель диссертационной работы, перечислены задачи, решаемые для достижения поставленной цели, отмечены новизна и практическое значение работы, даны сведения о публикациях и апробации работы, определены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлены математические модели относительного движения МКА и некооперируемого ОИ с учетом воздействия возмущающих факторов. Инспекционное движение МКА рассматривается в орбитальной системе координат. В качестве возмущающих факторов учитываются нецентральность гравитационного поля Земли, атмосферное торможение и притяжение Луны (для высокоэллиптических орбит).

Применительно к рассматриваемой задаче формализованы условия допустимого смещения инспекционной траектории и оценки времени их нарушения (времени сохранения технической устойчивости). Сформулированы задачи поддержания инспекционного движения.

**Вторая глава** содержит результаты анализа пассивного возмущённого инспекционного движения. Соискателем разработан алгоритм совместного выбора вектора начальной скорости относительного движения МКА (исходя из условия равенства орбитальных энергий ОИ и МКА) и начального положения ОИ на своей орбите, которые обеспечивают максимальную продолжительность времени сохранения технической устойчивости (продолжительность пассивной инспекции) в зависимости от начального положения МКА с учётом возмущающего воздействия от нецентральности гравитационного поля Земли.

Проведены оценка влияния погрешностей в определении начальных траекторных параметров движения МКА и начального положения ОИ на продолжительность пассивной инспекции, а также сравнительный анализ деформации инспекционных траекторий под действием каждого из трёх

суток, после чего наноспутник переходит на нерасчётную траекторию относительного движения.

**В четвёртой главе**, на основе метода динамического программирования Беллмана, с использованием SDRE-и LQR-технологий (нелинейной модели относительного движения), разработаны оптимальные законы управления инспекционным движением МКА по двум каналам.

Проведено сравнение оптимальных законов управления, полученных с помощью SDRE- и LQR-технологий, и сформированы рекомендации по применению электроракетных двигательных установок (ЭРДУ) МКА, из числа существующих на рынке, для реализации инспекционных миссий.

Выявлено, что на низких околоземных орбитах, при имеющейся разности баллистических коэффициентов ОИ и МКА, доминирующим возмущающим фактором при реализации инспекционного движения становится атмосферное торможение. Для этого случая был сделан вывод о целесообразности использования для реализации инспекционного движения МКА непрерывного закона управления.

В качестве примера, иллюстрирующего возможности разработанной методической базы, проведено исследование (компьютерный эксперимент) по поддержанию инспекционного движения с помощью различных ЭРДУ, которые могут быть установлены на наноспутнике SamSat-M. Рассматривалось плоское движение наноспутника относительно МКС как ОИ на протяжении одного орбитального периода при заданных начальных траекторных параметрах относительного движения наноспутника и МКС. В результате было установлено, что закон управления на базе SDRE-технологии обеспечивает заметное уменьшение отклонений возмущённой инспекционной траектории от номинальной (что выражается разностью орбитальных энергий ОИ и МКА в конечный момент времени управляемого движения) при существенном снижении энергетических затрат на формирование управляющего воздействия. Это происходит вследствие учёта нелинейности математической модели относительного движения.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Выявлена высокая чувствительность продолжительности пассивного инспекционного движения к выбору начального значения аргумента широты ОИ. Установлено, в частности, что продолжительность пассивного движения более 70 суток достигается при формировании инспекционной траектории в момент нахождения объекта инспекции в тех точках орбиты, где отсутствует слагаемое проекции гравитационного ускорения (отвечающее за нецентральность гравитационного поля) в радиальном направлении.

2. Разработаны алгоритмы выбора начальных траекторных параметров относительного движения МКА и начального аргумента широты ОИ, позволяющий реализовывать длительное пассивное инспектирование на круговых орбитах и орбитах малой эллиптичности при учёте второй зональной гармоники потенциала поля притяжения, а также на высокоэллиптических орбитах (орбиты типа Молния, геопереходная орбита) с учётом возмущающего воздействия со стороны Луны.

возмущающих факторов: нецентральности гравитационного поля Земли, атмосферного торможения и притяжения Луны.

Установлено, что при движении ОИ по круговым орбитам и орбитам малой эллиптичности, номинальная инспекционная траектория имеет форму, близкую к эллипсу Хилла. При движении ОИ по высокоэллиптической орбите инспекционная траектория имеет сложную форму.

Соискателем сделан вывод о том, что погрешности в начальных траекторных параметрах движения МКА оказывают большее влияние на продолжительность времени сохранения технической устойчивости по сравнению с влиянием рассмотренных возмущающих факторов. Причем, инспекционные траектории, реализуемые на круговых орбитах, в большей степени подвержены негативному влиянию погрешностей траекторных параметров МКА по сравнению с инспекционными траекториями на высокоэллиптических орбитах.

В **третьей главе** представлен алгоритм одноимпульсной коррекции на основе понятия оскулирующей траектории относительного движения и методика обеспечения пребывания МКА в допустимой области пространства относительно ОИ на протяжении всей инспекционной миссии. Под оскулирующей траекторией относительного движения понимается замкнутая инспекционная траектория, которая была бы возможна, если бы с текущего момента времени МКА и ОИ совершали движение в центральном поле притяжения и начальные условия относительного движения МКА удовлетворяли условию равенства их орбитальных энергий. Для каждого момента времени (координат возмущённого инспекционного движения) существует своя оскулирующая траектория относительного движения. При этом учитывалось влияние возмущающих факторов, обусловленных нецентральностью гравитационного поля Земли и притяжением Луны (для высокоэллиптических орбит).

Выявлены закономерности изменения размеров инспекционной траектории после приложения корректирующих импульсов, которые обеспечивают переход МКА на обновлённую инспекционную траекторию, представляемую в виде оскулирующих траекторий относительного движения.

Разработана методика поддержания возмущённой инспекционной траектории в заданной области относительно ОИ в нецентральном поле притяжения Земли на протяжении длительного интервала времени при условии выполнении ограничений на величину и направление приложения корректирующего импульса.

В качестве иллюстрации разработанной методической базы проведено исследование продолжительности поддержания инспекционного движения наноспутника SamSat-M формфактора CubeSat 3U (разработка Самарского университета), оснащённого электротермической двигательной установкой на водно-спиртовой смеси в качестве рабочего тела, способной формировать единичные дискретные корректирующие импульсы величиной от 0,2 до 0,4 м/с на витке, с общим запасом суммарной характеристической скорости 50 м/с.

Показано, что при использовании дискретных импульсов величиной 0,4 м/с инспекционное движение эффективно поддерживается на протяжении более чем 14

3. Разработан алгоритм выбора одноимпульсной коррекции на основе понятия оскулирующей траектории относительного движения, позволяющий поддерживать инспекционное движение с учётом особенностей МКА.

4. Предложена методика обеспечения пребывания МКА в допустимой области пространства относительно ОИ в нецентральной области притяжения Земли на протяжении длительного интервала времени.

5. Разработана методика поддержания инспекционного движения на основе алгоритма выбора оптимального непрерывного закона управления с использованием SDRE-технологии в условиях влияния атмосферного торможения.

**Практическая значимость** работы заключается в возможности использования полученных результатов при баллистическом проектировании миссий, в которых используется инспекционное движение КА.

Полученные результаты диссертационной работы использованы в НИР, выполненной в рамках проекта, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России. Результаты исследований используются в учебном процессе Самарского университета.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается во вкладе в методологию выбора начальных орбитальных структур, сохраняющих стабильность в нецентральной области притяжения в заданной окрестности номинального периодического относительного движения, а также в обосновании способов и алгоритмов поддержания выбранного относительного движения в зависимости от типа учитываемых возмущений.

Проведенные исследования являются **новыми**, а результаты, выносимые автором на защиту, получены впервые и **новизна** их также не вызывает сомнений. В частности

1. Выявлено влияние аргумента широты ОИ на продолжительность нахождения траектории пассивного облёта в допустимой области отклонений от номинальной траектории при формировании пассивного инспекционного движения в нецентральной области притяжения Земли.

2. Предложен подход к выбору параметров пассивного инспекционного движения в нецентральной области притяжения на круговых орбитах и орбитах малой эллиптичности, на которых атмосферным торможением можно пренебречь.

3. Предложенный подход выбора параметров пассивного инспекционного движения распространён на ОИ, двигающиеся по высокоэллиптическим орбитам в нецентральной области притяжения Земли с учётом возмущающего воздействия со стороны Луны.

4. Введено понятие оскулирующей траектории относительного движения, на основе которого предложен алгоритм выбора параметров одноимпульсной коррекции, отличающийся от существующих формированием новой номинальной инспекционной траектории, исходя из выполнения условия равенства орбитальных энергий ОИ и МКА в текущий момент времени.

5. Предложена методика, основанная на применении развитого алгоритма выбора параметров одноимпульсной коррекции и выявленных закономерностях пассивного инспекционного движения, позволяющая поддерживать процесс инспектирования на длительном интервале времени.

6. Для орбит, на которых атмосферное торможение оказывает основное влияние, на основе SDRE-технологии выбора оптимального непрерывного закона управления, разработана методика поддержания номинальной инспекционной траектории.

**Достоверность** полученных автором положений, выводов и заключений, обеспечивается обоснованностью принятых допущений в математических моделях. Полученные результаты в области формирования начальных параметров движения и полученные законы управления согласуются с результатами других авторов.

**Научный уровень** полученных в диссертации результатов выбора орбит и алгоритмов управления инспекционным движением МКА достаточно высокий.

В целом диссертация оставляет хорошее впечатление. По теме диссертации опубликовано 17 статей, из них 6 статей опубликованы в изданиях, индексируемых базами данных Scopus, 2 статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Вместе с тем, на мой взгляд, представленная диссертационная работа имеет **ряд недостатков**:

1. Говорить о «движения в нецентральной поле притяжения Земли на круговых орбитах» (см, например, с. 13-14, 59 диссертации и с. 5 автореферата) некорректно, так как круговые орбиты (в строгом их понимании) существуют только в центральном гравитационном поле Земли. Исключение могут составлять экваториальные орбиты. В данном случае целесообразно использовать устоявшийся термин «околокруговые» орбиты.

2. Одним из критериев, которому должна отвечать диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук является то, что она должна быть «...научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, либо изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013г. №842). К сожалению, в четкой формулировке научная задача не приведена ни в диссертации, ни в автореферате. Речь в них идет лишь об некоей актуальной задаче без указания значения для развития соответствующей отрасли знаний.

3. Для описания движения МКА автор использует абсолютную геоцентрическую систему координат (АГСК) (с. 18 диссертации), но при этом не указывает для какой эпохи она построена, что затрудняет практическое использование результатов, полученных в работе.

4. Цель диссертационной работы соискатель сформулировал как разработку баллистического обеспечения инспекционного движения на протяжении миссии полёта. Однако понятие баллистического обеспечения полета космических аппаратов является более емким: помимо выбора орбит и разработки алгоритмов управления движением в

состав баллистического обеспечения входят планирование и результаты решения навигационных задач, данные по выявлению влияния неучитываемых возмущающих факторов, наличия многочисленных ограничений, установочных параметров для бортовой аппаратуры и т.д.

5. Имеются опечатки (с. 41: вместо «при движении МКА по инспекционной траектории с большой полуосью 1 км», очевидно нужно писать ... с большой полуосью 1 км и т.п.).

6. На с. 41 диссертации указывается, что начальные параметры движения Луны относительно Земли соответствует её положению в полночь 30 января 2023 года, при этом о том, как моделируется ее движение автор умалчивает, что затрудняет получение оценки корректности результатов диссертации.

Однако указанные замечания не снижают ценности и научной новизны работы.

Диссертация выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Все основные результаты опубликованы. Текст диссертации представляет собой законченную работу. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Следует отметить не только научную, но и высокую практическую значимость диссертации, так как полученные результаты позволяют снизить совокупные энергетические затраты на инспекцию космических объектов.

Полученные результаты соответствуют передовым позициям научных исследований в области баллистического проектирования инспекционных миссий МКА.

Диссертация Щербакова Михаила Сергеевича соответствует паспорту специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов и требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013г., а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Официальный оппонент

Главный ученый секретарь АО «ЦНИИмаш»,  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
(e-mail: klyushnikovvy@tsniimash.ru)



В.Ю.Клюшников

Подпись Клюшникова Валерия Юрьевича заверяю

Первый заместитель

генерального директора АО «ЦНИИмаш» по науке,  
доктор технических наук



А.А.Романов