

ОТЗЫВ

официального оппонента, доцента, к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», Иванова Данила Сергеевича на диссертационную работу Щербакова Михаила Сергеевича «Выбор орбит и алгоритмов управления инспекционным движением малоразмерного космического аппарата», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16 Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

В результате бурного развития космических систем в последнее десятилетие во многом благодаря миниатюризации космических аппаратов и увеличению доступности пусковых услуг, появилась возможность реализации сервисных задач с помощью специальных малоразмерных космических аппаратов. Сервисные задачи заключаются во взаимодействии с активными и неактивными космическими аппаратами для внешней оценки их состояния, для сближения и стыковки с целью заправки топливных резервуаров, замены или починки вышедших из строя элементов аппарата, а также с целью увода с орбиты в случае объекта космического мусора. Для решения этих задач система управления сервисного космического аппарата должна обеспечить движение относительно объекта интереса во время серии этапов. Самым первым этапом во время любой из сервисных задач является этап продолжительного наблюдения за космическим объектом с близкого расстояния для сбора информации об угловом движении, для оценки геометрических и масс-инерционных характеристик, построения модели объекта или для мониторинга его состояния. Этот этап также можно называть инспекционным. Ключевой особенностью этого движения является требование движения в заданном диапазоне относительных расстояний для обеспечения работы оптических систем наблюдения и для обеспечения безопасного движения, исключая столкновения с объектом.

Таким образом, **актуальность темы и решаемых задач диссертации** Щербакова М.С. «Выбор орбит и алгоритмов управления инспекционным движением малоразмерного космического аппарата» не вызывают сомнений.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и **структура диссертации** соответствует заявленной теме, целям и задачам исследования, соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается непротиворечивой методологической основой и взаимосвязанностью выводов. Каждая из частей диссертации составляет органическое единство с другими частями.

Рукопись работы состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 60 наименований. Общий объём диссертации составляет 124 страницы.

Тематика и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 2.5.16 Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов. По теме диссертации автором опубликовано 17 научных статей, из них 6 статей опубликованы в изданиях, индексируемых базами данных Scopus/WOS, 2 статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Анализ структуры диссертации, точности математических формулировок, логической последовательности изложения материала показал достаточно высокую степень обоснованности полученных в работе научных положений, выводов и рекомендаций.

Предложенные автором решения аргументированы и принятые допущения в математических моделях управления и определения обоснованы. **Достоверность полученных в диссертации результатов** подтверждается результатами математического моделирования пассивного инспекционного движения с учётом ряда возмущений и моделирования работы алгоритмов импульсного и непрерывного управления на околокруговых и высокоэллиптических орбитах.

Основным **новым научным результатом**, полученным в диссертации Щербакова М.С., является методика обеспечения длительного инспекционного движения с помощью алгоритма выбора параметров пассивной относительной траектории, алгоритма выбора параметров приложения импульсного управления для поддержания требуемого движения, а также алгоритмов непрерывного управления в случае использования бортовой электродвигательной установки. Оригинальность методики заключается в том, что она является единой для разного класса орбит – околокруговых и высокоэллиптических. С помощью разработанной методики для конкретных примеров орбит из этих классов были получены оценки времени пассивного инспекционного движения в зависимости от ряда параметров и с учётом влияния действующих возмущений, проведены расчеты затрат характеристической скорости для одноимпульсной коррекции в различных точках относительной траектории в стохастической постановке задачи с учётом навигационных ошибок и ошибок исполнения. Для двух непрерывных законов управления для поддержания заданной инспекционной траектории было проведено параметрическое исследование характеристик управляемого движения в условиях ограничения управляющего воздействия, проведен сравнительный анализ результатов применения линейного и нелинейного среднеквадратичного регуляторов.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы при создании перспективных систем управления движением инспекционного малоразмерного космического аппарата с различными типами бортовых двигательных установок с учётом ограничений на направление и величину приложения управляющего воздействия. Предложенная методика, в частности, продемонстрирована на примере параметров наноспутника Самарского университета SamSat-M формата CubeSat 3U с импульсной двигательной установкой с учётом особенности углового движения аппарата, продольная ось которого пассивно стабилизирована вдоль местной вертикали.

Теоретическая значимость результатов диссертации Щербакова М.С. заключается не только в разработке вышеупомянутой методики обеспечения длительного инспекционного движения, но и в разработке алгоритмов одноимпульсной коррекции с использованием введённого понятия оскулирующих инспекционных траекторий, а также

в полученных математических законах управления для нелинейной системы уравнений относительного движения на высокоэллиптических орбитах.

Наряду с общей положительной оценкой выполненной диссертационной работы, следует отметить **ряд замечаний**:

1. Диссертантом были получены условия обеспечения замкнутой инспекционной траектории исходя из равенства орбитальных энергий сервисного космического аппарата и объекта инспекции. Однако первое из условий на начальную относительную скорость вдоль оси x орбитальной системы координат были определены из уравнений Хилла. Отсутствие в тексте диссертации самих уравнений Хилла (которые являются частным случаем уравнений движения (1.1)) и их решения для обоснования вышеупомянутого условия замкнутости траектории представляется методологическим пробелом в логике работы. Кроме того, это решение уравнений Хилла необходимо для математического описания инспекционной траектории в виде эллипса Хилла, который много раз упоминается в тексте.

2. В ряде мест в тексте диссертации нет обоснования выбора значений важных параметров. Например, во всей работе значение относительной предельно-допустимой деформации траектории принято за 0.05, хотя именно от этого значения будет зависеть и время технической устойчивости во время пассивного движения и частота корректирующих импульсов при управляемом движении. С практической точки зрения были бы полезны результаты исследования при различных значениях этого параметра, когда большие значения допустимых относительных деформаций могли бы привести к меньшим затратам характеристической скорости. В главе 2.3 приводятся только значения разницы баллистических коэффициентов, но не приведены значения масс космического аппарата и объекта инспекции, а также нет описания используемой в расчетах модели плотности атмосферы. В третьей главе исследуются характеристики управляемого движения при одноимпульсном управлении, при этом рассматриваются четыре конкретные точки аргумента широты для приложения импульса. Из текста непонятно, почему были выбраны именно эти четыре значения точек.

3. При задании параметров орбиты объекта инспекции в главах 2 и 3 диссертант в нескольких местах опустил значение одного из них: аргумента перицентра или долготы восходящего узла. В главе 1 аргумент перицентра объекта инспекции также должен был входить как параметр при расчете смещения возмущенной траектории.

4. В диссертации имеются отдельные опечатки и неточные формулировки, не влияющие на содержание работы.

Выявленные недостатки не снижают общей высокой оценки проведенных научных исследований и могут рассматриваться в качестве направлений по проведению дальнейших исследований. Автореферат полностью соответствует диссертационной

работе, в полном объеме отражает идеи, результаты и выводы диссертации. Результаты диссертационного исследования опубликованы и прошли апробацию на конференциях.

Диссертация Щербакова Михаила Сергеевича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, написанную понятным научным языком с корректным использованием научной и технической терминологии и содержащую научную и практическую ценность.

Диссертационная работа Щербакова Михаила Сергеевича «Выбор орбит и алгоритмов управления инспекционным движением малоразмерного космического аппарата», оформлена в соответствии с Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (ред. от 28.08.2017), а также соответствует требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденного Приказом Минобрнауки России от 10.11.2017 №1093 к оформлению диссертаций.

Автор диссертационной работы Щербаков Михаил Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Официальный оппонент

Д.С. Иванов

старший научный сотрудник
федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»,
кандидат физико-математических наук,
доцент

10.10.2024

125047, г. Москва, Миусская пл., 4

Тел. +7 963 729 58 53

Email: danilivanovs@gmail.com

Подпись Иванова Данила Сергеевича заверяю

Ученый секретарь
федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»,
кандидат физико-математических наук



А.А. Давыдов