

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации С.А. Шестакова «Методы построения и поддержания тетраэдральных спутниковых формаций», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика

Представленная работа С.А. Шестакова описывает и решает ряд задач, связанных с построением и поддержанием на орбите формации из четырех спутников. Основной практической задачей, частичному решению которой посвящена работа, является разработка миссии по исследованию ионосферы Земли с помощью космических аппаратов. Во введении работы, а затем в первой, обзорной главе приводится аналогия между задачами, решаемыми в исследовании, и задачами, возникшими при разработке космических миссий Cluster и MMS. Миссия, подобная Cluster или MMS, но запущенная на низкие околоземные орбиты, позволит получить более точную модель ионосферы Земли. Это, в свою очередь, важно с теоретической и практической точек зрения. Вышесказанное подтверждает **актуальность представленного диссертационного исследования.**

Вторая глава работы посвящена аналитическому исследованию опорных орбит для спутников формации в линеаризованной модели движения. **Новым результатом** являются полученные в работе необходимые и достаточные условия, которые нужно наложить на начальные данные спутников формации, чтобы размер и форма формации в среднем не изменялись. Отдельное внимание в главе уделено понятию формы – нетривиальность понятия связана с физическим смыслом решаемой задачи. В работе ищутся тетраэдральные конфигурации, представляющие собой невырожденные трёхмерные структуры. Полученные условия выражены Шестаковым С.А. в виде алгебраических уравнений, далее приводятся многопараметрические семейства решений, что **важно с теоретической точки зрения.**

Третья глава работы в основном продолжает и уточняет результаты второй главы применительно к более полным и реалистичным моделям движения спутников. С помощью последовательного анализа задачи, аналитической, а затем численной оптимизации, семейства опорных орбит уточняются и улучшаются. Оптимизируется при этом скалярный параметр, называемый в работе качеством спутниковой формации. Хотя идея использования одного параметра для описания спутниковой формации не является новой (соответствующие ссылки представлены в диссертации), сам вид параметра, методика построения орбит и дальнейшей оптимизации являются **новыми результатами,**

полученными соискателем. Также в работе приводятся конкретные опорные орбиты, представленное обобщение широко известной формации leader-follower на четыре спутника представляет большой теоретический и практический интерес. Достоверность результатов подтверждается проведённым численным моделированием.

Четвертая глава работы целиком посвящена построению управления спутниками формации. Цель управления – поддержание качества формации, т.е. размера и формы тетраэдра в среднем. Основным методом получения алгоритма управления, выбранным соискателем, является прямой метод Ляпунова. Выбор обоснован простотой и практичностью получаемого управления, которое обеспечивает асимптотическую устойчивость опорного движения. Однако, поскольку исследование ионосферы предполагает низкие околоземные орбиты, для получения управляющего воздействия используется сила сопротивления атмосферы. В связи с этим возникает необходимость модификации прямого метода Ляпунова, что и составляет содержание большей части главы. Представлена методика построения функций Ляпунова для поддержания заданной конфигурации спутников, важная с практической точки зрения. Построенный алгоритм поддержания тетраэдральной формации на низкой околоземной орбите с помощью силы сопротивления атмосферы является новым результатом, а кроме того целостно завершает представленное диссертационное исследование.

В заключении кратко представлены результаты работы.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Результаты диссертации докладывались на российских и зарубежных конференциях, были опубликованы в пяти изданиях из перечня ВАК, в том числе трёх изданиях из списка Web of Science и/или SCOPUS. Список релевантных публикаций приведен в автореферате.

В качестве замечания к диссертации можно упомянуть часть, относящуюся к постановке задачи. При выборе модели управляющих сил было принято предположение о форме аппарата в виде плоской пластинки, находящейся под воздействием аэродинамических сил. Учитывая, что в качестве объекта управления наиболее подходящим является кубсат, хотелось бы сопроводить такой выбор формы соответствующим обоснованием.

Указанный недостаток не влияет на общую положительную оценку работы. Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне. Научные положения, выводы и результаты работы являются полностью обоснованными и актуальными.

Работа «Методы построения и поддержания тетраэдральных спутниковых формаций» полностью удовлетворяет требованиям Положения ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика, а ее автор – Шестаков Сергей Алексеевич – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составил официальный оппонент

## **Эйсмонт Натан Андреевич**

Кандидат технических наук по специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований Российской академии наук».

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32.

Тел: +7(495) 333-52-12

Email: neismont@iki.rssi.ru

30.09.2020 г.

— H.A. Эйсмонт

Подпись официального оппонента Н.А. Эйсмана удостоверяю

Учёный секретарь ИКИ РАН

Садовский Андрей Михайлович

