

## Результаты публичной защиты

Соискатель: Шестаков Сергей Алексеевич

Диссертация: «Методы построения и поддержания тетраэдральных спутниковых формаций»

На заседании 01 декабря 2020 г. присутствует 15 членов совета, из них очно – 7, дистанционно – 8, специалистов по профилю рассматриваемой диссертации – 8.

САЗОНОВ В.В.	д.ф.-м.н.	01.02.01	очно
ГОРБУНОВ-ПОСАДОВ М.М.	д.ф.-м.н.	05.13.11	очно
ШИРОБОКОВ М.Г.	к.ф.-м.н.	01.02.01	очно
БОРОВИН Г. К.	д.ф.-м.н.	01.02.01	очно
ВАШКОВЬЯК М.А.	д.ф.-м.н.	01.02.01	дистанционно
ВОЛОБОЙ А.Г.	д.ф.-м.н.	05.13.11	дистанционно
ГАЛАКТИОНОВ В.А.	д.ф.-м.н.	05.13.11	очно
ИВАШКИН В.В.	д.ф.-м.н.	01.02.01	дистанционно
КРЮКОВ В.А.	д.ф.-м.н.	05.13.11	дистанционно
КУГУШЕВ Е.И.	д.ф.-м.н.	01.02.01	дистанционно
ЛАЦИС А.О.	д.ф.-м.н.	05.13.11	дистанционно
ОВЧИННИКОВ М.Ю.	д.ф.-м.н.	01.02.01	очно
ПОЛИЛОВА Т.А.	д.ф.-м.н.	05.13.11	дистанционно
СИДОРЕНКО В.В.	д.ф.-м.н.	01.02.01	очно
ТУЧИН А.Г.	д.ф.-м.н.	01.02.01	дистанционно

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований разработана методика подбора функции, описывающей форму тетраэдра, построенного четырьмя спутниками группировки. Эта функция в дальнейшем используется для нахождения таких опорных орбит, что форма и размер тетраэдра сохраняется при движении спутников по этим орбитам. Найдены необходимые и достаточные условия, которым должны удовлетворять начальные данные движения спутников в группе. Построены и уточнены численно с учётом возмущения от второй гармоники гравитационного поля Земли отдельные семейства опорных орбит. Произведена оценка скорости распада группы из четырёх спутников в зависимости от ошибок в начальных данных. Разработана методика построения алгоритма управления относительным движением на основе прямого метода Ляпунова. Полученные

результаты адаптированы для поддержания тетраэдральной группировки из малых спутников на низкой околоземной орбите.

**К наиболее значимым результатам** работы, представляющим научную новизну, относятся:

1. На основе анализа существующих подходов введено описание качества тетраэдра с помощью скалярной функции. Найдены необходимые и достаточные условия, при которых введённое качество тетраэдра сохраняется в линеаризованной модели движения. Описаны семипараметрические семейства решений. Исследованы условия существования тетраэдральных конфигураций, сохраняющих качество, в зависимости от амплитуд колебаний спутников на относительных орбитах.
2. В частных случаях тетраэдра с равными амплитудами и формации вида leader-follower (ведущий-ведомый) проведена минимизация деградации формации с учётом возмущений от второй гармоники гравитационного поля Земли. Показано, что в пассивном движении время, в течение которого тетраэдр остаётся невырожденным, зависит от высоты орбиты и размеров тетраэдра. Продемонстрировано, что на высоте 400 км при низкой солнечной активности для тетраэдра с характерным размером 1 км, это время составляет порядка недели. Исследована чувствительность формации к начальным данным движения спутников.
3. Разработана методика построения алгоритма управления относительным движением спутников в группе на основе прямого метода Ляпунова с использованием геометрических характеристик опорных орбит. Построен алгоритм управления тетраэдральной формацией, позволяющий поддерживать тетраэдр невырожденным, а качество тетраэдра – близким к необходимому. Проведена адаптация алгоритма с учётом особенностей исполнения при использовании сил аэродинамического сопротивления. Показано, что при различных наклонениях опорной орбиты, временах запуска, размерах тетраэдра и ошибках в начальных данных, построенное управление способно поддерживать тетраэдр на протяжении от одного до нескольких месяцев. Продемонстрирована возможность использования паруса на спутниках для увеличения времени поддержания заданной конфигурации тетраэдральной формации.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что доказан критерий, которому должны удовлетворять начальные данные движения спутников в группе с тем, чтобы форма тетраэдра сохранялась в линейном приближении с течением времени. Построен алгоритм управления тетраэдральной спутниковой конфигурацией с помощью сил аэродинамического сопротивления, поддерживающий форму и размер тетраэдра.

Значение полученных соискателем результатов исследования для **практики** подтверждается тем, что полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты позволяют:

1. на этапах проектирования миссии с использованием тетраэдральной спутниковой формации подобрать необходимые опорные орбиты;
2. проводить трёхмерное исследование ионосферы Земли с помощью групп малых космических аппаратов, разработанных с использованием предложенной методики;
3. использовать представленную методику построения управления для поддержания относительных орбит при построении миссий с использованием спутниковых формаций.

**Оценка достоверности** результатов исследования выявила, что представленные в диссертации результаты получены с применением и разработкой моделей относительного движения спутников в группе в соответствии с общепринятыми стандартами. Проведено численное моделирование, подтверждающее полученные аналитические результаты, сравнение полученных результатов с опубликованными ранее смежными результатами других авторов.

**Личный вклад** соискателя состоит в получении всех представленных в диссертации результатов, в подготовке всех публикаций и докладов по полученным результатам, личном представлении результатов на конференциях и семинарах.

На заседании 01 декабря 2020 г. диссертационный совет принял решение присудить Шестакову Сергею Алексеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук. При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» **присуждение ученой степени – 15**, «против» присуждения ученой степени – **нет**, воздержавшихся – **нет**.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.024.01  
кандидат физико-математических наук

Широбоков М.Г.