

УТВЕРЖДАЮ
И.о. проректора по научной работе
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)»
д. т. н. профессор Равикович Ю. А.



27.05.2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»
о диссертации Алексея Игоревича Шестопёрова
«Стабилизация заданных режимов углового движения спутников с нежесткими элементами конструкции»,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика»

Актуальность темы исследования

Многие из современных космических аппаратов имеют в своей конструкции достаточно протяженные элементы сравнительно малой массы, деформация которых оказывает существенное влияние на движение аппарата. В то же время к аппаратам указанного типа зачастую предъявляются высокие требования по точности ориентации. Сложившаяся ситуация порождает ряд проблем, важнейшей из которых является проблема возникновения слабозатухающих колебаний в нежестких элементах, пагубно влияющих на процесс стабилизации заданных режимов углового движения космического аппарата.

Тема и содержание диссертационного исследования актуальны в связи с использованием имеющихся и разработкой новых КА, миссии

которых требуют решения задачи стабилизации заданных режимов углового движения КА, равно как и задачи гашения низкочастотных колебаний НЭ.

Общая характеристика работы

Диссертация объёмом в 113 страниц машинописного текста состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 69 наименований и приложений.

Во введении приводятся краткое описание исследуемых проблем, обзор существующих методов моделирования и управления движением космических аппаратов с нежесткими элементами, а также способов построения опорных траекторий. Помимо этого, обосновывается актуальность работы, указываются научная и практическая значимость.

Глава 1 посвящена разработке математической модели космического аппарата с нежесткими элементами. Последние крепятся к корпусу жестко или с помощью шарнирных соединений. В рамках предположения о малости деформаций, упругое смещение точек каждого нежесткого элемента представляется в виде разложения по собственным формам, что позволяет с достаточной точностью описывать движение конечномерной системой дифференциальных уравнений, записанных относительно специальных обобщенных координат космического аппарата с нежесткими элементами. Основным достоинством уравнений движения космического аппарата с нежесткими элементами, полученных соискателем, является удобство их преобразования в случае изменения конфигурации космического аппарата. Стоит отметить, что автор справедливо уделяет внимание и ряду вычислительных аспектов предложенной модели. Таким образом, **построенная математическую модель является новой и практически важной**, ее можно эффективно использовать для описания поведения большого числа существующих космических аппаратов.

В главе 2 объектом исследования является геостационарный космический аппарат с нежесткими элементами. Автор указывает, что такие элементы обладают низкочастотным спектром собственных колебаний. Примером таких аппаратов могут служить геостационарные телекоммуникационные спутники, содержащие в своих конструкциях антенны большой длины и панели солнечных батарей. Наиболее важным результатом этой главы является выведенный автором закон управления, решающий задачу инерциальной стабилизации корпуса космического аппарата и реализующийся с помощью маховичной системы ориентации. Важным представляется тот факт, что хотя в приведенном выражении управляющего момента не фигурируют модальные переменные, с его помощью также удастся осуществить гашение слабозатухающих вибраций нежестких элементов. Заслуживает внимания подход к построению матриц обратной связи, в рамках которого автору удается в явном виде решить соответствующее матричное уравнение Риккати. Результаты

иллюстрируются численным моделированием, использующим математическая модель движения космического аппарата, полученная автором в первой главе. **Результаты автора, описанные в этой главе, имеют очевидную прикладную ценность.**

Несомненный интерес представляет рассмотренная в главе 3 задача о построении опорных траекторий корпуса космического аппарата, движение вдоль которых обеспечивало бы как можно более малое возбуждение вибраций в нежестких элементах в процессе его переориентации. При формировании кинематических уравнений углового движения космического аппарата автором использовались кватернионы ориентации, наиболее выгодные с вычислительной точки зрения. В диссертационной работе на основе их значений в конкретные моменты времени построен класс обладающий следующими актуальными для практики свойствами траекторий корпуса космического аппарата с нежесткими элементами, которые

- сохраняют норму кватерниона ориентации;
- имеют в указанные моменты времени заданные значения кватерниона ориентации, угловой скорости, углового ускорения и его производной;
- обеспечивают непрерывность производной опорного углового ускорения.

Подробно изложенная и реализованная методика построения указанных траекторий включает в себя процедуры полиномиальной интерполяции и поиска постоянных вспомогательных кватернионов из кинематических соотношений. Анализ, проведенный в разделе 3.7, позволяет говорить о пользе полученных автором траекторий в контексте решения вышеуказанной проблемы минимизации возбуждения колебаний в нежестком элементе. Результаты автора, изложенные в этой главе, также являются **новыми и важными как с теоретической, так и с прикладной точек зрения**

В заключении представлены основные результаты работы.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Достоверность результатов подтверждается адекватным выбором методов исследования и проведенным численным моделированием.

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

Теоретическая значимость результатов определяется применением фундаментальных методов теоретической механики и теории управления.

Практическая значимость результатов: Работа имеет очевидную практическую направленность. Ее результаты уже нашли свое применение при выполнении контрактных работ с предприятиями отечественной космической промышленности, то есть непосредственно в космической практике. В дальнейшем они могут быть полезны при разработке систем

управления космическими аппаратами с нежесткими элементами, а также в процессе определения их режимов углового движения.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Результаты диссертации рекомендованы к использованию при проектировании космических миссий, в ходе которых применяются спутники с крупногабаритными нежесткими элементами конструкции.

Существенных замечаний, как к содержанию, так и к тексту диссертации нет. Следует отметить, однако, что

1. В изложении постановки задачи и описании получаемых результатов имеются некоторые шероховатости, не влияющие на целостность изложения. В частности, отсутствуют некоторые необходимые подробности. Например, был бы полезен рисунок, подробно иллюстрирующий конструкцию, на которой проверялась эффективность схемы вывода уравнений движения и предложенного алгоритма стабилизации.

2. Возможно, было бы полезно включить в текст в качестве еще одного приложения иллюстрацию эффективности результатов диссертационной работы на примере конструкции, содержащей существенно более трех нежестких элементов. По крайней мере, следует пожелать автору сделать это в его дальнейших исследованиях.

3. Несмотря на то, что эффективность используемого для описания упругих деформаций подхода в рамках поставленной задачи и целей исследования выглядит очевидной, автору стоило бы детально сравнить используемый им метод с альтернативными, например, с методом конечных элементов, в частности, для оценки быстродействия и качества получаемых результатов.

Упомянутые недостатки **не влияют** на общую положительную оценку работы. Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне. Научные положения, выводы и результаты работы являются **полностью обоснованными**.

Оценка работы в целом.

Диссертация посвящена актуальной теме в области динамики космических аппаратов, состоящих из твердотельных и упругих элементов. Полученные в ней результаты несомненно представляют интерес как с общединамической точки зрения, так и для практического планирования актуальных космических миссий. В работе строится математическая модель космического аппарата, конструкция которого предусматривает наличие нежестких элементов и алгоритм стабилизации такого аппарата, предусматривающий гашение колебаний таких элементов, а также содержит предложения по способам переориентации аппарата, сокращающим

возможные колебания. Проведенное исследование основано на методах теоретической и прикладной небесной механики и математических алгоритмах, ориентированных на компьютерную реализацию.

Автор продемонстрировал прекрасное владение математическим аппаратом, применяемым по теме диссертации. Упомянутые замечания не снижают общую положительную оценку научного уровня выполненной диссертационной работы. Результаты диссертации в достаточной степени опубликованы в специализированных журналах по теме работы и достаточно полно апробированы.

Диссертация Алексея Игоревича Шестопёрова «Стабилизация заданных режимов углового движения спутников с нежесткими элементами конструкции» **удовлетворяет** всем требованиям Положения ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика, а ее автор **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры мехатроники и теоретической механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» 11 мая 2022 г., протокол № 8.

Заведующий кафедрой мехатроники
и теоретической механики
Московского авиационного института (НИУ),
доцент, д. ф.-м. н.



Б. С. Бардин

Профессор кафедры мехатроники
и теоретической механики
Московского авиационного института (НИУ),
доцент, д. ф.-м. н.



А. В. Родников

27.05.2022