

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации А.И. Шестопёрова  
«Стабилизация заданных режимов углового движения  
спутников с нежесткими элементами конструкции»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 01.02.01 –  
Теоретическая механика

Диссертационная работа А.И. Шестопёрова посвящена проблеме стабилизации углового движения космических аппаратов (КА), содержащих в своей конструкции нежесткие элементы (НЭ). При этом управляющий момент реализуется лишь с помощью исполнительных органов, расположенных на корпусе КА. **Актуальность представленного диссертационного исследования** обусловлена тем, что полученные автором результаты могут иметь практическое применение для широкого спектра КА, содержащих в своей конструкции крупногабаритные деформируемые элементы с низкими собственными частотами колебаний.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и приложений. Обзор литературы по теме диссертационного исследования приведен во введении.

В первой главе А.И. Шестопёровым **разработана** нелинейная математическая модель, позволяющая описать широкий класс КА с НЭ конструкции. Она допускает жесткое крепление НЭ к корпусу КА, а также крепление с помощью одностепенного и двухстепенного шарниров. Благодаря примененной соискателем методологии вывода уравнений движения КА с НЭ, удалось добиться адаптируемости полученной математической модели объекта на случай изменения его конфигурации, а именно числа и типов сочленения НЭ с корпусом. Приведен соответствующий алгоритм модификации математической модели КА с НЭ. Получены соотношения, с помощью которых суммирование по точкам каждого НЭ проводится однократно до начала численного интегрирования. Проведенное тестирование позволяет говорить о достоверности полученной модели.

Вторая глава диссертации посвящена задаче инерциальной стабилизации КА с НЭ. Соискатель исследовал угловое движение геостационарного КА заданной конфигурации, НЭ которого обладают низкими собственными частотами колебаний с нулевыми декрементами затухания. А.И. Шестопёровым **был предложен** закон управления угловым движением корпуса КА, на различных этапах построения которого использовалась теорема Барбашина-Красовского, решалась задача линейно-квадратичного регулирования, причем положительно-определенное решение соответствующего алгебраического

уравнения Риккати было найдено в явном виде. Указанный подход позволил не только обеспечить инерциальную стабилизацию корпуса КА, но вместе с тем осуществить гашение колебаний в НЭ. В роли исполнительных органов системы управления используются маховики, расположенные на корпусе КА. При этом установка исполнительных органов непосредственно на НЭ, равно как и выполнение процедуры идентификации модальных переменных не предполагаются, что имеет высокую **практическую значимость**.

В заключительной главе диссертации рассматривается проблема построения опорных траекторий углового движения спутника, имеющая в случае КА с НЭ **важную практическую особенность**: перемещение его корпуса вдоль указанной опорной траектории должно как можно меньше возбуждать колебания в НЭ. В работе кинематика корпуса КА описывается с помощью кватерниона ориентации, значения которого известны в заданные моменты времени. Соискателем **предложена** методика построения опорных траекторий КА с НЭ, удовлетворяющих условию нормировки на всем интервале движения и обладающих третьей степенью гладкости. Для их стабилизации адаптирован закон управления, использовавшийся ранее в ряде работ для обеспечения асимптотической устойчивости заданных режимов углового движения твердотельных спутников. Обоснованность использования полученного А.И. Шестопёровым класса опорных траекторий с целью меньшего возбуждения колебаний в НЭ подтверждается демонстрационным примером, приведенным в конце главы.

В заключении перечислены основные результаты работы.

**Автореферат полностью отражает** содержание диссертации.

Основные результаты диссертации докладывались на отечественных и зарубежных конференциях, а также были опубликованы в шести изданиях из перечня ВАК, в том числе четырех изданиях из списка Web of Science и/или SCOPUS.

Диссертация качественно оформлена, снабжена достаточным количеством иллюстраций. Структура работы логична и отвечает задачам исследований.

По тексту диссертации имеется ряд замечаний:

1. В работе управляющий момент маховиков формируется из двух составляющих (формула 2.9): первая компенсирует момент внешних сил, вторая строится по принципу обратной связи в целях стабилизации стационарного состояния спутника. В диссертации отсутствуют сведения, каким образом вычислялась либо оценивалась первая составляющая управления, влияющая на точность стабилизации положения спутника и нежестких элементов.

2. В тексте работы отсутствует проверка условий существования единственного решения алгебраического уравнения Риккати (формула 2.16).
3. В работе не проведено исследование влияния ошибок оценки параметров углового движения спутника на точность предложенного алгоритма стабилизации.
4. В задаче переориентации спутника построение алгоритма стабилизации опирается на предположение о квазистационарности процесса переориентации. В работе отсутствуют оценки допустимых величин скорости изменения программного углового движения для обоснования допустимости предложенного автором алгоритма управления.

Перечисленные недостатки **не влияют** на общую положительную оценку работы.

В целом диссертация А.И.Шестоперова представляет законченное научное исследование, выполненное на высоком научном и квалификационном уровне. Научные положения, выводы и результаты работы являются **обоснованными**.

На основании изложенного считаю, что работа «Стабилизация заданных режимов углового движения спутников с нежесткими элементами конструкции» **соответствует** требованиям Положения ВАК (в текущей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика, а ее автор – Шестопёров Алексей Игоревич – **заслуживает** присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составил официальный оппонент **Лемак Степан Степанович**, доктор физико-математических наук по специальности 01.02.01 – теоретическая механика, профессор кафедры прикладной механики и управления механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова», руководитель лаборатории «Математическое обеспечение имитационных динамических систем» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова».

119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1.

Тел: +7 (495) 932-89-54, Email: lemaks2004@mail.ru

« 23 » мая 2022 г.

Подпись официального оппонента С.С. Лемака удостоверяю

Декан механико- математического факультета МГУ,

Член- корреспондент РАН, профессор А.И.Шафаревич



С.С. Лемак