

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Алексея Игоревича Шестопёрова «Стабилизация заданных режимов углового движения спутников с нежесткими элементами конструкции», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика в диссертационный совет Д 002.024.01 на базе Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук"

Диссертация А.И. Шестопёрова посвящена изучению ряда аспектов управления ориентацией космических аппаратов (КА) с нежесткими элементами (НЭ), включенными в его конструкцию. К такого рода КА можно отнести телекоммуникационные аппараты с антеннами большого размера, а также, например, аппараты исследования дальнего космоса с солнечным парусом и протяженными панелями солнечных батарей. В диссертации особое внимание уделено проблемам возбуждения низкочастотных колебаний в НЭ, негативно влияющих на точность ориентации всего КА, и, как следствие, проблемам гашения указанных колебаний. Ввиду вышесказанного тема диссертационного исследования **представляется актуальной**.

Диссертация А.И. Шестопёрова изложена на 113 страницах и состоит из введения, трёх глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения.

Во введении приведены обоснования актуальности выбранной темы диссертации, аргументирована научная новизна и практическая значимость результатов исследования, представлены научные положения, выносимые на защиту. В обзоре литературы описаны существующие подходы к решению задач, рассматриваемых в диссертации.

В первой главе сформулирована постановка и выполнено решение задачи построения математической модели КА, позволяющей учитывать влияние низкочастотных вибраций НЭ на движение КА. Поведение НЭ рассмотрено в рамках модального подхода. Опираясь на подход, ранее применявшийся для описания систем твердых тел, представлен вывод уравнений движения КА с НЭ, прикрепленными к его корпусу. Уравнения движения КА с НЭ представлены в форме, позволяющей увеличить эффективность процесса их численного интегрирования. Описана методика модификации уравнений движения КА в случае изменения числа НЭ элементов конструкции и типов их сочленения с корпусом КА. Эта методика в существенной степени опирается на модульный характер полученной математической модели КА с НЭ.

Во второй главе исследуется задача инерциальной стабилизации геостационарного КА с тремя жестко сочлененными с ним НЭ в заданной ориентации. Постановка задачи включает в себя ряд особенностей. Так, управляющий момент реализуется лишь с помощью маховиков, расположенных на корпусе КА и имеющих ограниченный управляющий момент. Управление строится лишь на основе информации о состоянии корпуса аппарата. Наконец, наличие собственных колебательных мод НЭ с низкими частотами приводит к необходимости разработки закона управления, осуществляющего их гашение, наряду со стабилизацией корпуса КА в заданном угловом положении в инерциальной системе координат. Построение такого управления потребовало определения подходящей функции Ляпунова и использования прямого метода Ляпунова. Постоянные матрицы обратной связи в предложенном законе управления представляют собой матрицы усиления линейно-квадратичного регулятора, построенного на основе линеаризованных уравнений движения твердотельного КА. Следует отметить, что решение алгебраического уравнения Риккати было найдено в явном виде.

В третьей главе на основе набора кватернионов ориентации, заданных в фиксированные моменты времени, построена опорная траектория углового движения КА с НЭ, удовлетворяющая условию нормировки, и обеспечивающая непрерывность первой производной опорного ускорения. На модельном примере показано, что использование указанных траекторий приводит к слабому возбуждению вибраций в НЭ. Стабилизация полученных опорных режимов углового движения КА с НЭ осуществляется при помощи адаптации закона управления, полученного во второй главе.

Основные результаты диссертации сформулированы в заключении.

Ряд объемных выкладок отнесён в приложение.

Итогом работы является конструктивное исследование задачи стабилизации заданных режимов углового движения космических аппаратов с нежесткими элементами конструкции.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Выносимые на защиту результаты опубликованы в шести изданиях из перечня ВАК, в том числе четырех изданиях из списка Web of Science и/или SCOPUS, а также в достаточной степени апробированы на конференциях и научных семинарах.

Практическая значимость представленной диссертации заключается в следующем:

- предложенная математическая модель КА с НЭ позволяет описать движение широко используемых в настоящее время КА с деформируемыми элементами конструкции, обладающими большой протяженностью;
- несложные с вычислительной точки зрения алгоритмы стабилизации заданных режимов углового движения КА с НЭ могут быть реализованы на его бортовых вычислителях;
- реализация предложенных законов управления не требует установки исполнительных органов непосредственно на НЭ;
- качество ориентации телекоммуникационных и других геостационарных аппаратов может быть увеличено как за счет гашения низкочастотных колебаний НЭ, с помощью предложенных в работе законов управления, так и за счет перемещения КА вдоль построенных соискателем опорных траекторий углового движения.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

По работе имеются следующие **замечания**.

1. На странице 36 диссертации отмечается со ссылками на работы [24,45], что если в качестве обобщенных координат выбирать компоненты радиус-вектора центра масс всего КА, то это привело бы к отделению орбитального движения КА от углового. Известно, что разделение имеет место только при определённых предположениях типа спутникового приближения, в общем же случае колебания КА сказываются на его орбите.
2. В формуле (3.8), определяющей угловую скорость орбитальной системы координат, значатся радиус-вектор и вектор скорости центра масс спутника. Принимая во внимание наличие НЭ в конструкции КА, на геостационарной орбите будет находиться центр масс системы в целом.
3. В диссертационной работе построен закон управления, обеспечивающий инерциальную стабилизацию геостационарного КА с НЭ и гашение низкочастотных колебаний в последних. В свете этого, было бы целесообразно опробовать применяемую методику на задачах об относительных равновесиях спутника в орбитальной системе координат и сравнить решения с решениями, найденными ранее в работах М.К. Набиуллина, В.Н. Рубановского, В.Г. Вильке.
4. Было бы целесообразно более детально описать, хотя бы на примерах, моды колебаний НЭ, используемые при решении задач. В случае, когда

аналитическое представление мод невозможно, следовало бы дать графическое представление о данных модах.

5. Потенциал, заложенный в предложенной нелинейной математической модели КА с произвольным наперед заданным числом НЭ, реализован не в полной степени. Так, в главах два и три, призванных применить построенную в первой главе математическую модель КА с НЭ, рассматривался случай, когда НЭ имеют жесткое сочленение с корпусом КА. Имеющаяся возможность рассматривать НЭ, сочлененные с КА с помощью одноступенного и двухступенного шарниров, не рассматривалась. Возникает естественный вопрос о том, какие изменения будут претерпевать построенные в диссертации законы управления при изменении типа сочленения НЭ и корпуса КА.

В работе присутствует ряд опечаток.

1. На странице 25 определяется матрица Ω_s , зависящая от номера НЭ, но без явного указания этой зависимости. Более того, далее по тексту обозначение Ω_s не встречается, хотя Ω_s должно участвовать в формуле (1.21). Как следствие, в формуле (1.21) у величины Ω пропущен индекс s .
2. На страницах 27-28 потерян индекс n у величины ω – угловой скорости системы координат, связанной с n -ым НЭ, относительно инерциальной системы координат.
3. На странице 66 вместо «Центр масс последней» следует писать «Начало отсчета последней».
4. В 24-й позиции списка литературы должно быть указаны страницы 147-163 вместо имеющихся 177-193.
5. В 45-й позиции списка литературы опечатка в именах авторов. Должно быть «Ovchinnikov M.Yu., Tkachev S.S., Roldugin D.S., Nuralieva A.B., Mashtakov Y.V» вместо имеющегося «Ovchinnikov M.Yu., Tkachev S.S., Roldugin, A.B. Nuralieva D.S., Mashtakov Y.V».

Вместе с тем, указанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационного исследования.

Научные положения, выводы и результаты, сформированные в диссертации, являются строго обоснованными.

Считаю, что диссертация «Стабилизация заданных режимов углового движения спутников с нежесткими элементами конструкции» удовлетворяет всем 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 её автор Алексей Игоревич Шестопёров несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

Отзыв составил официальный оппонент

Никонов Василий Иванович, кандидат физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика», старший научный сотрудник отдела 24 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук». Адрес 119333, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2. Тел.: +7 (499) 135-35-90 Email: nikon_v@list.ru

«23» мая 2022г.

В.И. Никонов

Подпись с.н.с. Василия Ивановича Никонова удостоверяю:

Учёный секретарь ФИЦ ИУ РАН

д.т.н. В.Н. Захаров



(подпись)

«23» мая 2022г.