

## ОТЗЫВ

официального оппонента, д.т.н., доцента, профессора кафедры космического машиностроения имени генерального конструктора Д.И. Козлова Самарского национального исследовательского университета Стариновой Ольги Леонардовны на диссертационную работу Макаренковой Надежды Алексеевны «Система управления пространственной ориентацией солнечного паруса бескаркасной центробежной конструкции без расхода рабочего тела», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук в диссертационный совет Д 212.125.12 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

### 1. Актуальность темы диссертации

Проблема снижения расхода топлива при космических перелётах всегда была актуальна, однако с увеличением времени активного существования космических аппаратов, связанного с совершенствованием элементной базы ракетно-космической техники, становится особенно острой. Идеальным вариантом является такой принцип работы космического аппарата, который позволил бы вообще не расходовать рабочее тело, как для осуществления полёта, так и для ориентации и стабилизации космического аппарата. Одним из таких способов является использование давления солнечного света.

Актуальность и перспективность подобных разработок подтверждается многочисленными исследованиями и проектами солнечных парусов, реализованными на практике в России («Знамя-2») и за рубежом («IKAROS», Япония; «NanoSail-D», США). Чтобы обеспечить желаемую траекторию полёта космических аппаратов с солнечным парусом, необходимо постоянно переориентировать космический аппарат для обеспечения требуемого программного угла установки паруса. Одно из возможных решений данной задачи для солнечного паруса бескаркасной центробежной конструкции – центральная жесткая вставка, передающая управляющий момент, рассмотрено соискателем в диссертационной работе.

### 2. Структура работы и достоверность полученных результатов

Структура работы в целом замечаний не вызывает. В ней в логической последовательности раскрыты все основные вопросы темы. Рукопись диссертации включает в себя введение, три главы, объединяющих 7 параграфов, заключение и список использованных источников. Тематика и

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № 09 11 2018

содержание диссертации полностью соответствуют паспорту специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов», а основные результаты, полученные соискателем, находят отражение в трёх статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и пяти публикациях в сборниках тезисов конференций.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается непротиворечивой методологической платформой и взаимосвязанностью выводов. Структура диссертации соответствует заявленной теме, цели и задачам исследования, раскрывает его основные проблемы и выводы. Каждая из частей диссертации составляет органическое единство с другими частями. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые автором для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Предложенные автором решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

Достоверность полученных результатов подтверждается математическим моделированием предложенной системы управления пространственной ориентацией солнечного паруса, физически обоснованными закономерностями, соответствием отдельных полученных результатов известным результатам натурных испытаний.

### **3. Новизна проведенных исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В работе рассматривается математическая модель поверхности паруса в виде аппроксимирующих окружностей, позволяющая приближённо оценить форму плёнки при переориентации солнечного паруса с постоянной угловой скоростью. Правомерность использования такой модели подтверждается совпадением результатов моделирования формы поверхности плёнки в плоском сечении при переориентации солнечного паруса с постоянной угловой скоростью с результатами, полученными при описании поведения мембранного диска уравнениями в частных производных. Макаренковой Н.А. проведена оценка соотношения радиуса плёнки к радиусу жёсткой вставки, предпочтительного для поддержания плоской формы поверхности плёнки, при требуемых угловых скоростях переориентации солнечного паруса для выполнения необходимых манёвров.

Показано, что система первого приближения, описывающая поверхность плёнки при эволюции солнечного паруса, является управляемой и наблюдаемой. Найден спектр частот колебаний плёнки. Частоты спектра

разнесены друг от друга, а диссипативные силы весьма малы, поэтому Макаренкова Н.А. решает задачу демпфирования первого ненулевого тона, оказывающего максимальное влияние на поверхность плёнки. Результаты моделирования показали, что построенный релейный закон демпфирования приводит плёнку в равновесное состояние за конечное время. Для оценки неизмеряемых угловых координат поверхности плёнки построен редуцированный наблюдатель.

Полученные результаты позволили автору при разработке алгоритма пространственной переориентации солнечного паруса обоснованно считать поверхность плёнки плоским диском, расположенным под углом по отношению к плоскости жёсткой вставки.

В работе предполагается, что в стабилизированном состоянии солнечного паруса кинетический момент жёсткой вставки и плёнки компенсируются. При перераспределении по направлению векторов кинетических моментов всех элементов конструкции сумма векторов кинетических моментов маховика, плёнки и жёсткой вставки перестаёт быть равной нулю, что приводит к нежелательной прецессии солнечного паруса. Автором разработан алгоритм управления пространственным положением солнечного паруса, проведена оценка времени переходного процесса в системе.

Проводится сравнительный анализ с существующим методом управления пространственным положением солнечным парусом без расхода рабочего тела, основанном на изменении отражательной способности плёнки (проект «IKAROS»). Предложенный алгоритм управления путём изменения угла между векторами кинетических моментов плёнки, жёсткой вставки и маховика позволяет осуществлять пространственный разворот в несколько раз быстрее, чем при управлении путём изменения отражательной способности плёнки, что и следовало ожидать.

При реализации управления пространственной ориентацией солнечного паруса с помощью жёсткой вставки важным условием является равенство по модулю векторов кинетических моментов маховика и поверхности паруса. Для компенсации возможного неравенства указанных векторов соискателем предложен соответствующий алгоритм устранения дисбаланса. В качестве внешнего воздействия, создающего управляющий момент при реализации данного алгоритма, предлагается использовать изменение отражательной способности поверхности плёнки. Макаренковой Н.А. проведена оценка предполагаемого времени на устранение дисбаланса, а также найден угол ориентации паруса по отношению к солнечным лучам, при котором это время будет минимальным. Также проведена оценка предполагаемого

расхода энергии на изменение отражательной способности поверхности плёнки.

Энергию, необходимую для реализации алгоритма устранения дисбаланса векторов кинетических моментов маховика и поверхности паруса путём изменения отражательной способности плёнки, предлагается получать путём рекуперации кинетических энергий маховика, плёнки и жёсткой вставки. Теоретически, это позволит обойтись без использования химических источников тока на борту космического аппарата, при этом площадь солнечных батарей также не придётся увеличивать. Автором проведен анализ возможной величины снижения угловой скорости поверхности паруса, при которой модель плёнки позволительно представлять в виде плоского диска. Проведена оценка предполагаемого времени возвращения угловых скоростей к первоначальному уровню при различной площади солнечных батарей.

Научная новизна разработанных алгоритмов определяется:

- алгоритм активного демпфирования колебаний поверхности солнечного паруса при эволюциях космического аппарата получен с учетом невозможности прямого измерения угловых координат поверхности паруса относительно жесткой вставки (в работе построен редуцированный наблюдатель);

- алгоритм управления пространственным разворотом солнечного паруса, основанный на изменении угла между векторами кинетических моментов маховика и поверхности паруса, является эффективным и регулярным.

Использование разработанных алгоритмов позволило предложить следующие новые способы и методики:

- способ устранения дисбаланса абсолютных значений кинетических моментов маховика и поверхности солнечного паруса без расхода рабочего тела основанный на изменении отражательной способности поверхности паруса;

- методику оценки необходимого увеличения площади солнечных батарей для обеспечения работоспособности системы управления солнечным парусом при использовании в качестве аккумуляторов энергии вращающейся части солнечного паруса для размещения солнечных источников энергии.

#### **4. Значимость для науки и производства результатов, полученных автором диссертации**

Значимость полученных автором результатов для науки вообще и прикладной научной дисциплины «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов», в частности, заключается в разработке

перспективных систем управления пространственным разворотом космических аппаратов, содержащих тонкоплёночные конструкции, в том числе солнечного паруса бескаркасной центробежной конструкции с жесткой центральной вставкой.

Апробация и внедрение результатов исследования осуществлялись на международных и российских научных и научно-практических конференциях. Основные научные результаты диссертационного исследования отражены в научных трудах автора.

#### **5. Соответствие паспорту специальности.**

Указанная область исследования соответствует паспорту специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, а именно пунктам: 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений, перечисленных в формуле специальности; 3. Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей для использования на предварительном этапе математического моделирования; 4. Разработка, обоснование и тестирование эффективных численных методов с применением ЭВМ; 5. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

#### **6. Общие замечания по содержанию и оформлению диссертации**

Диссертация и автореферат написаны на высоком научном и методическом уровне. Стиль изложения построен логично, грамотен и понятен.

Вместе с тем, необходимо отметить следующее:

1. В работе не рассматривается возможность использования предложенных алгоритмов и методик управления разворотом поверхности солнечного паруса для выполнения конкретных манёвров космических аппаратов, например, для перелётов между заданными околоземными орбитами, для осуществления набора параболической скорости в поле тяготения Земли или перелётов к другим телам солнечной системы. Выполнение каждого такого манёвра требует определенных предельных значений угловых скоростей программных разворотов. Подобный анализ позволил бы сделать выводы об осуществимости перелётов космических аппаратов с солнечным парусом с заданными проектными характеристиками.

2. В работе не проведена оценка работоспособности разработанных методик, алгоритмов и способов управления при отклонении поверхности пленки от плоскости, хотя интуитивно ясно, что данные методы и алгоритмы сохранят свою работоспособность при небольших искажениях формы поверхности.

Отмеченные замечания не снижают научной и практической значимости работы и высокой положительной оценки диссертационного исследования. Оба замечания сформулированы в развитие темы и свидетельствуют не об ошибках автора, а о профессиональном интересе к его работе, комплексном и многогранном характере исследованных вопросов, перспективах научных изысканий, основу которых сформировал диссертант, что делает диссертацию ценной в научном и практическом отношении.

## **7. Заключение**

Диссертация Макаренковой Надежды Алексеевны представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой, на основании выполненных автором исследований, разработана совокупность аналитических и численных методик, позволяющих решить актуальную научную задачу разработки системы управления пространственной ориентацией солнечного паруса бескаркасной центробежной конструкции без расхода рабочего тела, имеющую научную и практическую значимость.

Данная работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, что свидетельствует о личном вкладе автора в науку, в ней содержатся достаточные рекомендации по использованию научных выводов и полученных результатов, предложенные автором решения аргументированы и оценены по сравнению с известными решениями.

Диссертация оформлена в соответствии с Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (ред. от 28.08.2017), а также соответствует требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденного Приказом Минобрнауки России от 10.11.2017 № 1093 к оформлению диссертаций.

Материалы диссертации полно представлены в публикациях автора и известны широкой научной общественности и достаточно апробированы. Основное содержание, результаты, выводы и рекомендации диссертации отражены в 8 опубликованных работах автора, в том числе в трёх статьях

опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ.

В автореферате диссертации изложены основные идеи и выводы диссертационного исследования, показан вклад соискателя в разработку избранной темы, степень новизны и значимости результатов исследований, а также обоснована структура диссертации. Работа соответствует специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, удовлетворяет требованиям ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор, Макаренко Надежда Алексеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры космического машиностроения  
имени генерального конструктора Д.И. Козлова  
федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
"Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королева"  
(Самарский университет)



Старинова Ольга Леонардовна

Служебный адрес:

443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева" (Самарский университет)

e-mail: [ssau@ssau.ru](mailto:ssau@ssau.ru), сайт организации [www.ssau.ru](http://www.ssau.ru),

телефон: (846) 335-18-26

