



# ФЕДЕРАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»



Ленинградская ул., д. 24, г. Химки, Московская область, Российская Федерация, 141400  
тел. (495) 629-67-55, факс (495) 573-35-95,  
e-mail: npo@iaspace.ru, http://www.iaspace.ru

8.12.2016 г. № 517/14070

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Ученому секретарю Ученого совета  
Московского авиационного института  
(национального исследовательского  
университета) МАИ  
к.т.н., доц.  
А. О. Шемякову

г. Москва,  
Волоколамское шоссе, д. 4  
Факс: 8-499-158-29-77



УТВЕРЖДАЮ

Исполняющий обязанности  
генерального директора,  
к.э.н.

С.А. Лемешевский

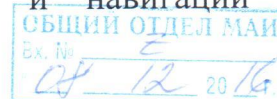
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»  
на диссертационную работу  
**Войсковского Андрея Павловича**

«Автономное управление движением центра масс геостационарного космического аппарата на этапах довыведения, перевода в рабочую позицию и удержания», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

Одной из общих тенденций развития современных сложных технических систем во многих сферах жизнедеятельности является повышение их автономности. Рецензируемая диссертационная работа посвящена решению задачи автономизации процессов управления движением и навигации





геостационарного космического аппарата (КА) на основных этапах его жизненного цикла – довыведения, перевода в рабочую позицию и удержания. Одним из положительных аспектов увеличения степени автономности функционирования КА на ГСО является уменьшение влияния т.н. «человеческого фактора», повышающего надежность функционирования спутника. Также это обеспечивает снижение расходов на содержание наземной инфраструктуры. Для решения такой задачи необходима разработка алгоритмов управления, способных вырабатывать управляющие воздействия непосредственно на борту КА, используя текущую информацию о векторе его состояния, формируемую также автономной бортовой навигационной системой.

Для математической формализации технической задачи автономного управления движением центра масс геостационарного КА разработаны математические модели управляемого возмущенного движения центра масс КА на этапах довыведения на ГСО, перевода в рабочую позицию и удержания в точке стояния. С учетом особенностей используемых моделей формализованы две исходные задачи автономного управления движением, решаемые в работе. Первая задача заключается в создании алгоритма автономного управления движением центра масс КА от окончания довыведения до приведения в окрестность рабочей орбитальной позиции на ГСО. Вторая задача заключается в разработке алгоритма автономного управления коррекциями удержания КА в окрестности рабочей позиции на длительном интервале времени. Алгоритмы приведения и удержания используют данные навигационной системы с учетом случайных ошибок реализации тяги двигателей коррекции, ошибок решения навигационной задачи и систематических детерминированных возмущений от гравитации Земли, Луны и Солнца. Задачи автономного управления рассматриваются в стохастической постановке как задачи управления по полным данным в рамках теоремы разделения.

Задачи приведения и удержания решаются с помощью разработанного автором квазиоптимальный алгоритма управления с обратной связью, устанавливающего зависимость управления вектором тяги ЭРДУ от вектора состояния КА в детерминированной постановке. Особенностью алгоритма является использование не точных значений компонентов вектора состояния КА, а результатов решения навигационной задачи, формируемых блоком навигации, включенным в замкнутый контур управления движением. Алгоритмы управления на этапах приведения в рабочую позицию и удержания создаются путем решения стохастической задачи синтеза оптимального управления квазилинейной дискретной стохастической системой по полным данным с использованием принципа оптимальности Беллмана.

Для решения приведённых выше задач автором разработан программно-математический комплекс для имитационного моделирования процессов функционирования интегрированных систем навигации и управления КА на ГСО. Этот комплекс позволяет получать и исследовать точностные характеристики решения поставленной задачи при различных исходных данных



состояния КА и разном составе и уровне влияния неконтролируемых факторов различной физической природы. Проведенный статистический анализ точности работы замкнутой системы автономного управления движением геостационарного КА на рассматриваемых в работе этапах его функционирования наглядно подтверждает правомерность использования автором методов и средств решения поставленных задач, как отвечающих предъявляемым требованиям к терминальной точности управления.

Всё перечисленное позволяет утверждать, что диссертационная работа выполнена на **актуальную** тему и направлена на повышение эффективности выполнения транспортных межпланетных перелётов.

Сформулированной автором целью работы является разработка методики автономного управления движением центра масс КА на этапах его довыведения на ГСО с помощью ЭРДУ, перевода в рабочую точку и удержания в ней, обеспечивающих выполнение международных требований по точности с учетом случайных ошибок управления и навигации.

Для достижения поставленной цели решаются задачи синтеза стохастического управления по неполным данным с использованием критерия, отражающего статистические характеристики по терминальной точности управления и затратам рабочего тела ЭРДУ на реализацию управления.

При разработке алгоритмов управления используется понятие, так называемых, достаточных координат, позволяющее разделить исходную задачу стохастического управления по неполным данным на две независимые:

- задачу формирования оптимальных в среднеквадратическом смысле оценок компонент расширенного вектора состояния КА на ГСО (задача навигации);
- задачу оптимального стохастического управления по полным данным.

Структура диссертации отражает состав решаемых задач. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 19 наименований.

**К новым научным результатам** диссертационных исследований следует отнести следующие:

- Разработан алгоритм автономного управления при переводе в рабочую позицию в стохастической постановке по интегро-терминальному критерию с учетом систематических возмущений от гравитационного поля Земли, гравитации Луны и Солнца.

- Разработан алгоритм синтеза управления удержанием КА в рабочей позиции на ГСО в стохастической постановке в установившемся режиме.

- Получена оценка достигаемой точности автономного управления движением центра масс КА на этапах довыведения, приведения в рабочую позицию на ГСО и удержания в ней с учетом ошибок решения навигационной задачи, что существенно отличает настоящую работу от предыдущих аналогов.

**Достоверность и обоснованность** полученных в диссертации результатов подтверждается корректностью и достаточной строгостью обоснований принятых допущений, теоретическим обоснованием применяемого



методического и алгоритмического обеспечения, а также результатами имитационного моделирования. Автор использует корректные математические стохастические модели, описывающие движение КА с ЭРДУ. Научные положения и выводы диссертации обоснованы проведением расчётов и сравнением результатов с известными данными.

**Апробация работы** проведена на трёх российских и международных конференциях. Непосредственно относящиеся к представленным в работе результатам материалы опубликованы в 3 печатных работах, из которых 2 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах из списка ВАК и индексируемых в международных системах цитирования Scopus и «Web of science».

Разработанная методика автономного управления движением центра масс геостационарного КА имеет большую **практическую ценность** и может найти широкое использование в практике отработки средств автономного проведения динамических операций КА. Также разработанные алгоритмы и программное обеспечение могут быть использованы в интересах разработки программного обеспечения для управления динамическими операциями КА на орбитах, отличных от ГСО.

Результаты диссертационного исследования могут быть полезны при проектировании геостационарных КА, разрабатываемых в НПО им. С.А. Лавочкина.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы к использованию в организациях, занимающихся разработкой геостационарных КА – «Спутниковые информационные системы» им. М.Ф. Решетнёва и РКК «Энергия» им. С.П. Королева.

По работе необходимо сделать следующие замечания:

1. Разработанные в диссертации алгоритмы предполагают расчёт бортового прогноза, учитывающего сложную и ресурсоёмкую модель детерминированных возмущающих факторов. Его реализация представляется трудноосуществимой. Так, например, никакой из перспективных БКУ не обеспечивает расчёт в режиме реального времени используемых в диссертации 70 гармоник гравитационного поля Земли. В связи с этим рекомендуется сократить число возмущаемых факторов до приемлемого уровня и оценить вызванное этим снижение точности прогноза ЦМ КА.

2. В тексте диссертации не указан источник информации для блока навигации. Ни односеансные траекторные измерения наземными станциями, ни блок аппаратуры спутниковой навигации, работающий вне сплошного навигационного поля, не обеспечивают точность определения местоположения КА на уровне порядка 10 метров.

Однако, эти замечания не снижают научной ценности проведенного исследования, и их следует рассматривать как рекомендации к дальнейшему развитию разработанной методики.

Тема и содержание диссертации соответствует специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов. Работа

написана грамотно, аккуратно оформлена и снабжена наглядными графическими иллюстрациями. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации и отражает личный научный вклад автора.

Считаем, что по совокупности полученных результатов диссертационная работа «Автономное управление движением центра масс геостационарного космического аппарата на этапах довыведения, перевода в рабочую позицию и удержания», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, соответствует критериям, изложенным в пунктах 9 – 14 Положения о присуждении учёных степеней, а её автор Войсковский Андрей Павлович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по названной специальности.

Отзыв обсужден и одобрен на секции №1 НТС, протокол № 10-16 от 8 декабря 2016 года.

Заместитель генерального директора –  
генеральный конструктор,  
кандидат технических наук

  
М.Б. Мартынов

Заместитель начальника отдела,  
доктор технических наук

  
А. Е. Назаров

Ведущий математик,  
кандидат технических наук

  
А. В. Симонов