



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ
«КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА,
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
КОМПЛЕКСЫ» имени А.Г. ИОСИФЬЯНА»
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)



Хороменный тупик, д. 4, стр. 1, Москва, 107078
Тел.: (495) 608-84-67, (495) 365-56-10; Факс: (495) 624-86-65, (495) 366-26-38
e-mail: info@vniiem.ru; http://www.vniiem.ru
ОКПО 04657139; ОГРН 5117746071097; ИНН/КПП 7701944514/770101001

№ _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора

по научной работе, доктор
технических наук, профессор

В.Я. Геча

2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Крамлиха Андрея Васильевича
на тему: «Методы и алгоритмы обеспечения отказоустойчивого управления
угловым движением малоразмерных космических аппаратов»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.5.16. «Динамика, баллистика, управление движением
летательных аппаратов»

Актуальность темы диссертационного исследования.

Диссертационная работа посвящена развитию методов обеспечения отказоустойчивого управления угловым движением малоразмерных космических аппаратов (МКА). Актуальность выбранного направления определяется противоречием между возрастающей сложностью решаемых МКА задач и жесткими ограничениями по массе, габаритам, энергопотреблению и составу бортовой аппаратуры. При таких ограничениях традиционное аппаратное резервирование измерительных средств и исполнительных органов либо невозможно, либо существенно снижает полезную нагрузку МКА, вследствие чего особую ценность приобретают алгоритмическая избыточность, автономное выявление неисправностей и реконфигурация алгоритмического обеспечения системы управления угловым движением (СУД) МКА.

Входящий № 204-8646
Дата 28 СЕН 2026
Самарский университет

182861

Научная проблема сформулирована автором шире обычной задачи диагностики отдельных элементов СУД МКА. В работе совместно исследуются две взаимосвязанные стороны системы управления: формирование обратной связи при частичной утрате измерительной информации и формирование управляющих воздействий при отказах или высокой степени деградации исполнительных каналов. Подобное объединение задач оценивания, диагностики и синтеза управления соответствует современному представлению об отказоустойчивости как о свойстве всей замкнутой динамической системы, а не отдельного ее компонента.

Характеристика диссертационной работы по главам. Диссертационная работа Крамлиха А.В. состоит из введения. Пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка цитируемой литературы из 207 наименований, приложений. Объем диссертации – 210 страниц, 110 рисунков, 45 таблиц.

Во введении показана актуальность выбранного направления исследований, выявлена и сформулирована научная проблема, подлежащая решению. Определены цель диссертационной работы, перечень решаемых научно-технических задач, а также сформулированы положения научной новизны. Дана характеристика теоретической и практической значимости работы, приведены библиографические сведения о публикациях автора и информация об апробации результатов на научных конференциях. Перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ причин и последствий отказов в системах управления угловым движением МКА, а также показано, что традиционный безопасный режим не всегда позволяет продолжить выполнение миссии.

Во второй главе предложен модельно-ориентированный подход к обеспечению отказоустойчивости СУД МКА: параллельно с реальным контуром функционирует цифровой двойник, включающий модели орбитального и углового движения, измерительных средств и алгоритмов определения ориентации. На основе сопоставления измеренных и прогнозных данных формируется решение о пригодности измерений и последующей реконфигурации алгоритмического обеспечения.

В третьей главе разработан оригинальный метод определения параметров углового движения по геометрической видимости навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS. Метод предусматривает

варианты для одной, двух и трех навигационных антенн, позволяет определять отдельные углы, пространственную ориентацию либо совместно ориентацию и угловую скорость и не требует радиоинтерферометрических измерений. Информация о видимых и невидимых навигационных спутниках используется как дополнительная информация об ориентации. Ее объединение с другими измерениями реализовано в сильносвязанной и слабосвязанной схемах. Существенным результатом является построение набора взаимозаменяемых алгоритмов, между которыми система может переключаться при отказе одного или двух датчиков.

В четвертой главе задача терминальной переориентации сведена к определению коэффициентов параметризованного управляющего воздействия. Исследованы степенные, тригонометрические и специальные функциональные ряды; по результатам сравнительного моделирования выбрана структура в виде четного ряда Фурье, обеспечивающая наименьшие энергетические затраты в рассмотренных вариантах.

В пятой главе выбранная параметризованная структура использована для компенсации отказа одного или двух каналов управления. В первом случае задача сводится к отысканию 34 коэффициентов, во втором – 17 коэффициентов, причем требуемая переориентация достигается приблизительно за полтора и два витка соответственно. Для случая сохранения лишь малой части эффективности двух исполнительных каналов синтезированы адаптивный и квазиадаптивный законы на основе нелинейной поверхности скольжения.

В заключении сформулированы основные полученные результаты.

Новизна проведенных исследований и полученных результатов.

Научная новизна диссертационного исследования определяется совокупностью впервые полученных теоретических и методических результатов, обеспечивающих комплексное решение проблемы отказоустойчивости управления угловым движением МКА.

1. Архитектура отказоустойчивой системы управления угловым движением МКА с цифровым двойником. Впервые предложена и обоснована архитектура контура СУД МКА, включающая цифровой двойник в контуре обратной связи. Цифровой двойник интегрирует в единую вычислительную среду математические модели движения центра масс, углового движения, измерений штатных датчиков, а также процедуры калибровки, идентификации параметров бортовой модели и моделирования работы алгоритмов определения ориентации. Такая интеграция позволяет

реализовать замкнутый цикл «прогнозирование – сравнение – диагностика – реконфигурация» непосредственно на борту МКА, что принципиально отличает предложенный подход от существующих схем, в которых диагностика осуществляется наземными средствами по данным телеметрии.

2. Метод определения параметров углового движения МКА на основе геометрической видимости НКА ГНСС. Впервые разработан метод определения параметров углового движения МКА, основанный на анализе геометрической видимости навигационных космических аппаратов ГНСС. В отличие от известных методов спутниковой навигации, использующих радиоинтерферометрию или фазовые измерения, предложенный метод оперирует дискретной информацией о наличии или отсутствии сигнала от НКА, что существенно упрощает бортовую реализацию и не требует специализированной аппаратуры.

3. Схемы и алгоритмы комплексирования разнотипных измерений. Впервые разработаны сильносвязанная и слабосвязанная схемы комплексирования разнотипных измерений наиболее часто используемых на МКА датчиков (магнитометр, датчик Солнца, датчик освещенности) с информацией о геометрической видимости навигационных космических аппаратов ГНСС. Предложенные схемы допускают гибкое варьирование состава используемых измерителей в зависимости от их работоспособности, что обеспечивает адаптивность контура обратной связи к различным комбинациям отказов.

4. Адаптивный алгоритм определения параметров углового движения МКА. Впервые разработан алгоритм определения параметров движения относительно центра масс МКА, адаптирующийся к возможным отказам одного или двух измерительных средств, без использования адаптивных фильтров и нелинейных наблюдателей, которые традиционно применяются в задачах реконфигурации. Отказ от адаптивных фильтров и нелинейных наблюдателей в пользу комплекса оригинальных алгоритмов определения ориентации МКА существенно снижает требования к вычислительным ресурсам бортового компьютера.

5. Квазиоптимальное терминальное программное управление угловым движением МКА. Впервые получено квазиоптимальное терминальное программное управление угловым движением МКА, учитывающее внешние возмущающие моменты (аэродинамический и гравитационный), как для штатного случая функционирования исполнительных устройств, так и для случаев отказа одного или двух каналов

управления. В отличие от обратных задач динамики, предложенный подход позволяет решать задачу именно оптимального программного управления, а в отличие от принципа максимума Понтрягина – учитывать внешние моменты, записанные как функции фазовых переменных.

6. Адаптивный и квазиадаптивный законы управления при деградации исполнительных устройств. Впервые получены адаптивный и квазиадаптивный законы управления угловым движением МКА в случае высокой деградации каналов управления исполнительных устройств, обеспечивающие перераспределение управления на исправные органы с целью создания необходимых управляющих моментов и сохранения приемлемого качества управления. Предложена поверхность скольжения с двумя настраиваемыми коэффициентами и два способа их задания: квазиадаптивный и адаптивный. Синтез ориентирован на случай, когда два канала сохраняют лишь 5% штатного момента; получены статистические оценки точности при ошибках определения ориентации и скорости.

Степень обоснованности и достоверности полученных результатов.

Степень обоснованности и достоверности научных результатов, представленных в диссертационном исследовании, определяется совокупностью методологических, вычислительных и верификационных процедур, использованных автором на всех этапах работы. Проведённый анализ позволяет заключить, что полученные результаты являются научно обоснованными и достоверными в рамках принятого расчётно-теоретического метода исследования и обеспечиваются:

1. Обоснованностью принятых математических моделей. Достоверность результатов в значительной мере определяется адекватностью используемых математических моделей. В диссертации применены общепринятые и апробированные в космической практике модели.

2. Обоснованностью методов исследования. Автор последовательно использует комплекс взаимодополняющих методов исследования, что повышает надёжность полученных выводов: методы теории движения искусственных спутников Земли; методы теории управления; методы теории обработки измерений; численные методы и математическое моделирование.

3. Достоверностью через статистическое моделирование. Достоверность результатов подтверждена статистическим моделированием с использованием метода статистических испытаний.

4. Достоверностью через сравнение с известными результатами. Обоснованность результатов подкреплена их сопоставлением с данными, полученными другими исследователями.

5. Достоверностью через апробацию и публикации. Достоверность и обоснованность результатов косвенно подтверждаются их широкой апробацией в научном сообществе.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в:

- развитии теории реконфигурируемого управления космическими аппаратами в условиях изменения информационной и исполнительной структуры;

- развитию принципа функциональной и информационной избыточности;

- развитию методов терминального управления за счет разработки метода конечномерной параметризации структуры управления для случаев, когда внешние моменты зависят от фазовых переменных и непосредственное применение классических необходимых условий оптимальности затруднено.

Практическая значимость диссертационной работы определяется её прямой направленностью на повышение надёжности, отказоустойчивости и срока активного существования перспективных МКА, а также возможностью непосредственного внедрения разработанных алгоритмов в бортовое программное обеспечение. Ключевые аспекты практической значимости состоят в следующем:

- сохранение работоспособности целевой миссии. Предложенные алгоритмы и логика реконфигурации позволяют отказаться от перевода аппарата в неуправляемый «безопасный» режим при одиночных и множественных отказах датчиков или деградации исполнительных устройств;

- универсальность и масштабируемость решений. Синтезированные законы адаптивного и квазиадаптивного управления при высокой деградации исполнительных устройств не привязаны к конкретному типу исполнительных органов, что позволяет использовать полученные результаты на этапах эскизного и технического проектирования СУД МКА различного целевого назначения и орбитального базирования.

Рекомендации по использованию результатов исследования.

Предложенные научно-технические решения рекомендуются к внедрению на предприятиях ракетно-космической отрасли, специализирующихся на разработке малых космических аппаратов в целом или их систем управления в частности: ООО «СТЦ», ООО «СПУТНИКС», ООО «Геоскан»; вузам, занимающимся разработкой, проектированием и изготовлением МКА: МГТУ им. Н. Э. Баумана, МАИ, НИУ ВШЭ, НГУ, ЮЗГУ, СибГУ им. Решетнева и др.

Замечания по диссертационной работе. Положительно оценивая работу в целом, считаем необходимым отметить следующие вопросы научно-дискуссионного характера:

1. Отсутствие сквозной экспериментальной верификации полной архитектуры. Отдельные элементы подтверждены реальными магнитометрическими данными, статистическим моделированием, запуском фильтра на БЦВМ и актами использования. Однако не показан единый эксперимент, в котором реальный или аппаратно-программный контур автоматически проходит последовательность «возникновение отказа - обнаружение - изоляция - реконфигурация оценивания - повторный синтез или выбор управления - восстановление целевого режима». В результате основное архитектурное положение подтверждено совокупностью частных испытаний, но не интегрально.

2. Для метода определения ориентации по геометрической видимости навигационных спутников ГНСС желательно более явно сформулировать условия наблюдаемости и однозначности решения. В частности, не ясно, как на точность и возможность определения ориентации МКА влияют реальные диаграммы направленности антенн, ошибки эфемерид и прогнозирования/оценки положения МКА на орбите. Следовало бы привести карту точности и наблюдаемости по орбите, конфигурации антенн и числу доступных навигационных спутников.

3. Высокая деградация исполнительных устройств в работе связывается со снижением доступного управляющего момента до 5 % от штатного значения, однако представляет интерес оценка качества управления во всем диапазоне деградации.

4. Представляет интерес сравнение предложенного автором подхода к повышению надежности МКА с распространенным в последнее время подходом к повышению надежности группировки МКА в целом, при

некотором, обусловленном экономическими соображениями, снижении требований к отдельному МКА.

5. При создании и испытаниях СУД наноспутников семейства СамСат, не было ли возможности наблюдать и оценить работу предложенных автором алгоритмов при отказах/деградации исполнительных органов или датчиков, подтвердить эффективность предложенных решений при их летных испытаниях или наземной отработке.

6. При средних высотах орбиты порядка 500 км учет аэродинамических моментов на угловые движения МКА представляется избыточным. Напротив, представляется, что несимметрия токов, например, например, в солнечных батареях, при их разной освещенности, может сказываться сильнее.

7. В тексте встречаются отдельные редакционные неточности, неодинаковое оформление единиц, символов и ссылок, а часть исходных параметров распределена между разделами и приложениями. Сводные перечни допущений, параметров моделирования и контрольных сценариев повысили бы воспроизводимость, но эти недостатки не влияют на существо научных результатов.

Отмеченные замечания не снижают высокой значимости полученных в диссертационном исследовании результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Диссертация Крамлиха Андрея Васильевича на тему: «Методы и алгоритмы обеспечения отказоустойчивого управления угловым движением малоразмерных космических аппаратов», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук является научно-квалификационной работой, в которой сформулирована и решена научная проблема, имеющая важное значение для развития теоретических и прикладных методов проектирования систем управления угловым движением МКА. Внедрение полученных результатов позволит повысить отказоустойчивость указанных систем, что имеет важное значение при создании современных МКА различного назначения.

Диссертация по области исследования соответствует паспорту специальности 2.5.16. «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, а именно пунктам 8, 10, 11, 12 паспорта специальности».

Диссертация хорошо структурирована, обладает внутренним единством. Автореферат и список публикаций полностью отражают содержание диссертации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 51 печатной работе, в том числе: 12 работ в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки РФ; 6 работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых базой данных RSCI; а также 23 работы в изданиях, индексируемых международными базами Scopus и Web of Science; 10 работ в сборниках трудов и тезисов конференций. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертационная работа на тему: «Методы и алгоритмы обеспечения отказоустойчивого управления угловым движением малоразмерных космических аппаратов» соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Автор диссертационной работы Крамлих Андрей Васильевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.16. «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Результаты диссертационной работы и отзыв на диссертационную работу были рассмотрены на заседании секции №4 научно-технического совета АО «Корпорация ВНИИЭМ» (протокол № 28 от 10.09.2026 г.) и получили положительную оценку.

Начальник отдела 18

АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

доктор технических наук, доцент



Захаренко Андрей Борисович

Учёный секретарь секции №4 НТС

АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

кандидат технических наук




Мартынова Светлана Андреевна

Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

Почтовый адрес: 107078, Российская Федерация, город Москва, Хоромный тупик, дом 4, строение 1.

Телефон: (495) 365-26-69

Факс: (495) 624-85-65, (495) 366-26-38

E-mail: GechaVY@vniiem.ru