



Государственная корпорация
по космической деятельности "Роскосмос"



Акционерное общество
"Центральный научно-исследовательский институт
машиностроения" (АО "ЦНИИмаш")

ул. Пионерская, д. 4, корп. 22
г.о. Королёв,
Московская область, 141070

Тел.: +7 (495) 513 5951
Факс: +7 (495) 512 2100

e-mail: corp@tsniimash.ru
http://www.tsniimash.ru

ОГРН 1195081054310
ИНН/КПП 5018200994 / 501801001

31.07.2026 исх. № 09001-1002

На № _____ от _____

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации Крамлиха Андрея Васильевича

«Методы и алгоритмы обеспечения отказоустойчивого управления
угловым движением малоразмерных космических аппаратов»,
представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по
специальности 2.5.16 – Динамика, баллистика, управление движением
летательных аппаратов

1. Актуальность избранной темы

Диссертационная работа А.В. Крамлиха посвящена решению одной из наиболее острых и практически значимых проблем современной космонавтики – обеспечению отказоустойчивости систем управления угловым движением (СУД) малоразмерных космических аппаратов (МКА). Как справедливо отмечает автор, в последние десятилетия наблюдается взрывной рост количества запускаемых МКА нанокласса, усложнение их конструкций и повышение требований к длительности активного существования. При этом жёсткие ограничения на массу, габариты и энергопотребление не позволяют реализовать традиционное для больших космических аппаратов структурное резервирование, особенно исполнительных устройств.

Статистика отказов космических аппаратов, приведённая в работе, убедительно свидетельствует, что именно СУД является одной из наиболее уязвимых систем, а её отказ часто приводит к преждевременному завершению всей миссии. В связи с этим разработка автономных, адаптивных методов и алгоритмов, позволяющих системе управления сохранять работоспособность и обеспечивать выполнение целевых задач, пусть и с худшим качеством, при отказах или деградации как измерительных средств, так и исполнительных органов, является безусловно актуальной научно-технической проблемой. Комплексный подход к решению проблемы, учитывающий как обратную связь (определение ориентации), так и прямую цепь (формирование управления), отличает данную работу от большинства существующих исследований и делает её особенно ценной для практики проектирования современных МКА.

Входящий № 205-4526

Дата 01 СЕН 2026

Самарский университет

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Все основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, достаточно обоснованы. Это достигается за счёт:

1. Корректной постановки задач. Автор чётко формулирует частные математические постановки для каждой из решаемых подзадач: от детектирования отказов и определения ориентации до синтеза оптимального и адаптивного управления.

2. Использования апробированных математических моделей. В работе применяются верифицированные модели движения центра масс и углового движения, модели магнитного поля Земли (IGRF), атмосферы (NRLMSISE-00) и движения Солнца (VSOP), что закладывает прочную основу достоверности полученных результатов.

3. Строгого математического аппарата. Для решения задач автор использует современные методы теории управления (скользящие режимы, фильтрация), оптимизации (дифференциальная эволюция, метод Монте-Карло) и обработки информации (решение задачи Вахбы, фильтр Калмана).

4. Тщательной проверки результатов. Все разработанные алгоритмы прошли всестороннюю проверку с помощью математического и, в ряде случаев, программно-аппаратного моделирования. Результаты численных экспериментов сопровождаются статистическим анализом, что обеспечивает высокую надёжность сделанных выводов.

5. Сравнения с известными подходами. Предложенные автором решения (особенно в главе 4) сравниваются с классическими методами, такими как обратные задачи динамики и принцип максимума Понтрягина, что позволяет объективно оценить их эффективность и преимущества.

3. Достоверность и новизна полученных результатов

Достоверность результатов исследования не вызывает сомнений. Она обеспечена:

- использованием корректных и общепризнанных физических и математических моделей;
- применением хорошо зарекомендовавших себя численных методов;
- сходимостью результатов, полученных с помощью разных подходов (например, сравнение с принципом максимума Понтрягина);
- апробацией алгоритмов на реальном бортовом компьютере наноспутника SamSat-ION, что подтверждает их практическую реализуемость;
- достаточным объёмом статистических испытаний, подтверждающих стабильность характеристик алгоритмов.

Научная новизна работы, безусловно, является высокой и заключается в следующем:

1. Впервые предложена архитектура СУД МКА, включающая цифровой двойник, предназначенный для автономного детектирования отказов измерительных средств и реконфигурации алгоритмов определения ориентации.

2. Разработан оригинальный метод определения параметров углового движения МКА на основе анализа геометрической видимости навигационных космических аппаратов ГНСС, использующий различные конфигурации антенн и не требующий дорогостоящей радиоинтерферометрии.

3. Создан комплекс алгоритмов (сильносвязанная и слабосвязанная схемы) для комплексирования разнотипных измерений, что позволяет гибко адаптировать обратную связь к наличию и исправности различных датчиков.

4. Разработан алгоритм определения параметров движения, адаптирующийся к отказам датчиков, который реализован без использования сложных адаптивных фильтров и нелинейных наблюдателей, что снижает вычислительную нагрузку на БЦВМ.

5. Предложен и обоснован новый подход к синтезу квазиоптимального терминального программного управления переориентацией МКА на основе параметризации управления чётными рядами Фурье. Этот подход позволяет эффективно учитывать внешние возмущающие моменты и ограничения на управление, а также обеспечивает решение задачи при отказе одного или двух каналов управления.

6. Разработаны новые адаптивный и квазиадаптивный законы управления на основе теории скользящих режимов, которые позволяют сохранить управляемость и приемлемое качество переориентации при высокой (до 5% от номинала) деградации исполнительных устройств.

4. Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методов и алгоритмов теории управления применительно к специфическому классу объектов – МКА. Автором предложены:

- новые подходы к комплексированию информации от разнородных датчиков;
- оригинальный метод параметризации управления для решения краевых задач с учётом возмущений;
- методика синтеза адаптивных законов управления, устойчивых к деградации исполнительных органов.

Практическая значимость работы весьма высока. Разработанные алгоритмы ориентированы на использование в реальных СУД наноспутников с ограниченными вычислительными ресурсами. Основные результаты, имеющие практическую направленность:

- методика детектирования отказов и алгоритмы реконфигурации могут быть непосредственно внедрены в ПО бортовых компьютеров для повышения живучести МКА;

- алгоритмы определения ориентации по ГНСС предоставляют дополнительный независимый канал для грубой оценки, что крайне полезно в аварийных ситуациях;

- методы синтеза программного и адаптивного управления позволяют проектировать энергоэффективные законы управления для МКА с различной конфигурацией исполнительных устройств.

Важно отметить, что результаты исследования уже нашли применение при разработке СУД наноспутников семейства СамСат, что подтверждается актами внедрения, приведёнными в приложении к диссертации. Это свидетельствует о высоком уровне практической готовности разработок.

5. Оценка содержания диссертации по главам и её завершённость

Диссертационная работа А.В. Крамлиха представляет собой завершённое, логически выстроенное и внутренне непротиворечивое научное исследование, в котором чётко прослеживается единая методологическая линия: от анализа проблемы и разработки концепции — через создание инструментария для детектирования отказов и определения ориентации — к синтезу управляющих алгоритмов, обеспечивающих живучесть системы в целом. Такая структура, где каждая последующая глава опирается на результаты предыдущей, является признаком зрелого системного подхода и свидетельствует о высоком уровне научной культуры автора.

Глава 1 выполняет роль фундамента, на котором базируется всё последующее исследование. В разделе 1.1.1 автор обоснованно выделяет три ключевые особенности МКА, которые делают классические подходы к управлению больших КА неприменимыми: существенная нелинейность динамики, сопоставимость внешних возмущающих моментов с управляющими и жёсткие ограничения на резервирование. В разделе 1.1.3 последовательно разобраны принципы работы и факторы деградации магнитометров, датчиков угловых скоростей, солнечных датчиков, звёздных датчиков, маховиков и магнитных катушек. Особую ценность представляет то, что автор не просто констатирует возможные отказы, а связывает их с конкретными физическими процессами (радиационное воздействие, термоциклирование, механические повреждения), что впоследствии позволяет ему строить не абстрактные, а физически обоснованные модели диагностики. В разделе 1.2 представлена развёрнутая классификация методов детектирования отказов (методы на основе моделей, на основе данных, гибридные), сопровождаемая детальной таблицей сравнения их достоинств и недостатков. Автор убедительно показывает, что для МКА с их ограниченными вычислительными ресурсами наиболее перспективны методы на основе моделей, но они требуют адаптации к высокой неопределённости внешних условий. Завершающий раздел 1.3 формулирует главный вывод: традиционный «безопасный режим» (переход в пассивное состояние до связи с Землёй) не отвечает современным требованиям, и необходима разработка автономных адаптивных систем детектирования и парирования отказов.

Глава 2 является концептуальным ядром диссертации. В разделе 2.1 автор вводит ключевую инновацию — цифровой двойник системы управления, который ранее для МКА не применялся. В отличие от традиционных подходов, где модель используется лишь для наземного проектирования, здесь цифровой двойник интегрируется непосредственно в контур управления (рис. 2.1) и выполняет функции оперативной диагностики: он параллельно с реальной СУД моделирует движение и измерения, а затем сравнивает прогноз с фактом. В разделе 2.1.2 приведены все необходимые математические модели: модель движения центра масс с учётом зональных гармоник и сопротивления атмосферы, модель углового движения с гравитационным и аэродинамическим моментами (причём для расчёта плотности атмосферы предлагается использовать верифицированную модель NRLMSISE-00, а для аэродинамических коэффициентов — панельный метод), а также детализированные модели измерений магнитометра, ДУС и датчика Солнца с учётом широкого спектра инструментальных погрешностей (масштаб, неортогональность, смещение нуля, температурный дрейф). В разделе 2.1.3 описана пятиэтапная методика детектирования отказов: идентификация параметров МКА, прогноз движения, расчёт модельных измерений, пересчёт в связанную систему координат и сравнение с реальными измерениями. Важнейшим достоинством этой главы является её практическая апробация — на реальных данных с МКА «СамСат-Ионосфера» показано (рис. 2.6–2.8). Единственным дискуссионным моментом, который автор мог бы прояснить, является вопрос о периодичности идентификации параметров и о влиянии ошибок моделирования (особенно плотности атмосферы) на частоту ложных срабатываний.

Глава 3 посвящена решению задачи сохранения возможности оценки ориентации при отказах измерительных средств. В разделе 3.1 дана обобщённая математическая постановка задачи определения ориентации как минимизации квадратичной целевой функции, что унифицирует подход к разнотипным измерениям. Раздел 3.2.1 представляет собой оригинальную разработку автора — методы определения ориентации по анализу геометрической видимости навигационных космических аппаратов ГНСС. Здесь предложены четыре алгоритма (от простого определения двух углов по одной антенне до полного восстановления кватерниона и угловой скорости по трём антеннам), разработаны целевые функции (3.6)–(3.8), в том числе с регуляризирующими членами для случая управляемой маски, и приведены результаты статистического моделирования, показывающие, что метод позволяет определять ориентацию с ошибкой порядка нескольких градусов, что достаточно для грубой ориентации и инициализации более точных фильтров. В разделе 3.2.2 предложены сильносвязанная и слабосвязанная схемы комплексирования разнотипных измерений. Однако наиболее ярким результатом главы, безусловно, является раздел 3.2.3, где описан двухэтапный алгоритм определения ориентации, использующий только магнитометрические измерения. На первом этапе алгоритм QUEST (решение

задачи Вахбы) формирует начальное приближение кватерниона, используя измерения магнитометра и датчика Солнца; на втором этапе запускается фильтр Калмана, который работает исключительно по магнитометру. Автор подробно описывает процедуру настройки ковариационных матриц, что является критически важной инженерной задачей, и приводит результаты как статистического моделирования (сходимость за ~ 2000 с, точность $< 0.5^\circ$ с вероятностью 0.99), так и программно-аппаратного моделирования на реальном бортовом компьютере МКА SamSat-ION (рис. 3.19–3.22). Этот эксперимент имеет огромную практическую ценность, поскольку доказывает не только теоретическую состоятельность, но и практическую реализуемость алгоритма на ограниченных вычислительных ресурсах. В разделе 3.2.4 автор синтезирует все предыдущие результаты и показывает логику реконфигурации алгоритмического обеспечения: на примере МКА с четырьмя типами датчиков (магнитометр, ДО, ДУС, НП) он демонстрирует, что предложенная схема позволяет сохранить оценку ориентации и угловой скорости при всех возможных комбинациях отказов одного или двух датчиков, за исключением единственного случая (одновременный отказ магнитометра и ДУС).

Глава 4 посвящена синтезу программных траекторий переориентации. В разделе 4.1 автор формулирует классическую задачу терминального управления с минимизацией энергозатрат, но с принципиальным отличием — обязательным учётом внешних моментов, что критично для МКА. В разделе 4.2 предлагается оригинальный подход: параметризация управления с помощью функциональных рядов, что позволяет свести сложную вариационную задачу к многопараметрической оптимизации, решаемой алгоритмом дифференциальной эволюции. Раздел 4.3 представляет собой скрупулёзное численное исследование, выполненное в пять этапов. На первом этапе автор решает проблему локализации коэффициентов, используя метод Монте-Карло для сужения области поиска перед запуском алгоритма дифференциальной эволюции (АДЭ) — это грамотное инженерное решение, повышающее эффективность оптимизации. На втором этапе проводится сравнительный анализ семи различных типов функциональных рядов (степенной, тригонометрический, чётный и нечётный ряды Фурье, классический и модифицированный ряды Шлёмилля). Результаты убедительно показывают (рис. 4.5–4.9, табл. 4.4), что наилучшими свойствами обладают чётные ряды Фурье, обеспечивающие минимальные пиковые значения момента и наименьшие энергозатраты. На третьем этапе исследуется влияние числа членов ряда: показано, что при $m=2$ задача не решается (не обеспечивается конечная угловая скорость), при $m=4$ решение находится, но траектория имеет колебательный характер, и только при $m=6$ достигается плавная и энергоэффективная переориентация. Четвёртый этап — сравнение с классическим методом обратных задач динамики (ОЗД) — демонстрирует существенное преимущество предложенного подхода: энергозатраты снижаются более чем в 6 раз (917 мкДж·с против 147 мкДж·с), что является

весьма убедительным результатом. Пятый этап — сравнение с принципом максимума Понтрягина (ПМП) — показывает, что предложенный метод даёт практически те же результаты (расхождение по интегралу энергии менее 1%), что и строгий теоретический оптимум, но при этом легко учитывает внешние возмущения, что для ПМП представляет собой крайне сложную задачу. Этот результат имеет фундаментальное значение, поскольку доказывает квазиоптимальность разработанного подхода. Несмотря на отмеченные в выводах недостатки (неприменимость для замкнутого контура, отсутствие гарантии глобального экстремума), глава 4 представляет собой завершённое и высокоэффективное решение задачи синтеза программного управления.

Глава 5 является логическим продолжением главы 4 и посвящена синтезу управляющих алгоритмов для двух принципиально различных сценариев отказов исполнительных устройств. Раздел 5.1 рассматривает случай полного отказа одного или двух каналов управления. Автор адаптирует разработанный в главе 4 подход с чётными рядами Фурье, сокращая число искомых коэффициентов в соответствии с количеством работоспособных каналов (34 коэффициента при отказе одного канала, 17 — при отказе двух). Проведено обширное численное моделирование для всех возможных комбинаций отказов (каналы x , y , z по отдельности и попарно), результаты которого представлены на рис. 5.1–5.27. Ключевые количественные выводы: при отказе одного канала время переориентации составляет ~ 1.5 витка, погрешность по ориентации не превышает 0.05° , по скорости — $3.4 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ/\text{с}$; при отказе двух каналов — ~ 2 витка, погрешность по ориентации $< 0.2^\circ$, по скорости $< 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ/\text{с}$. Важно, что величина требуемого управляющего момента не превышает $3 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{м}$, что достижимо для типовых магнитных исполнительных устройств наноспутников формата CubeSat. Раздел 5.2 переходит к более сложному случаю — высокой деградации исполнительных устройств (снижение эффективности до 5% от номинала). Здесь автор использует аппарат теории скользящих режимов, предлагая нелинейную поверхность скольжения (5.8), эффективность которой зависит всего от двух коэффициентов k_q и α . Разработаны два варианта управления: квазиадаптивный, где коэффициенты подбираются заранее в зависимости от начальной угловой скорости, и адаптивный, где коэффициенты изменяются в полёте по дифференциальным законам (5.17). Проведено масштабное статистическое моделирование (таблицы 5.5–5.12, рис. 5.28–5.39), которое показывает, что адаптивный закон обеспечивает высокую точность (ошибка ориентации $< 0.3^\circ$ даже в наихудшем случае) и в два раза быстрее выходит на установившийся режим по сравнению с квазиадаптивным. Квазиадаптивный закон, хотя и уступает в точности (систематическая ошибка $1.7\text{--}2.8^\circ$), оказывается менее чувствительным к случайным возмущениям и может быть рекомендован как упрощённая резервная стратегия для миссий, не требующих высокой точности. В заключительной части главы автор анализирует поведение законов управления при деградации отдельных каналов (x и y), показывая, что адаптивный закон критически зависит от соответствия текущей

ситуации настроенному алгоритму, тогда как квазиадаптивный демонстрирует более предсказуемое, хотя и менее точное поведение.

В **заключении** автор корректно резюмирует основные итоги работы, подтверждая достижение поставленной цели и решение всех научно-технических задач.

Таким образом, диссертация представляет собой замкнутый цикл исследований, в котором все элементы процесса управления угловым движением — от детектирования отказов до синтеза управляющих сигналов — объединены в единую архитектуру.

Диссертация оставляет впечатление целостного, глубокого и методически выверенного труда, в котором органично сочетаются фундаментальные теоретические выкладки и инженерные решения, доведённые до уровня практических рекомендаций и подтверждённые актами внедрения.

6. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Основным достоинством работы является её комплексный характер, когда проблемы определения ориентации и управления решаются в едином ключе для обеспечения конечной цели — отказоустойчивости. Среди других достоинств можно выделить:

- оригинальность и практическую реализуемость большинства предложенных алгоритмов;
- глубокое математическое обоснование;
- большой объём и качество проведённого численного и статистического моделирования;
- ясность и логичность изложения материала.

Тем не менее по тексту диссертации можно сделать ряд **замечаний**:

1. Цифровой двойник (Глава 2) является ключевым элементом системы детектирования отказов. Он использует модели (IGRF, NRLMSISE-00 и др.), которые сами по себе имеют погрешности. В работе показано сравнение модельных и измеренных значений (Рис. 2.6-2.8), но не проведен системный анализ того, как ошибки моделей (особенно плотности атмосферы и, следовательно, аэродинамического момента, который сильно влияет на МКА) влияют на точность прогноза. Завышенная ошибка прогноза может приводить к ложным срабатываниям (детектированию отказа там, где его нет) или, наоборот, к пропуску реального отказа, если порог $\delta_{\max}$ будет выбран слишком большим.

2. В главах 4 и 5 для решения задач многопараметрической оптимизации (поиск коэффициентов рядов Фурье) автор использует алгоритм дифференциальной эволюции (АДЭ). Этот метод является эвристическим. В работе не приводятся строгие математические доказательства того, что АДЭ гарантированно находит глобальный минимум целевой функции для всех возможных начальных условий и параметров МКА. Автор сам упоминает этот

недостаток в выводах (стр. 143), но в самом исследовании не предлагает способов его преодоления, кроме эмпирического подбора параметров.

3. Чрезмерная детализация выбора функционального ряда в Главе 4. Хотя это важное исследование, подробный перебор всех вариантов (ряды Фурье, Шлёмилха и т.д.) выглядит несколько громоздко. Возможно, имело смысл вынести часть этого материала в приложение, сосредоточившись в основном тексте на выводах и сравнении с ключевыми альтернативами (ОЗД, ПМП).

4. В главе 5.1 при синтезе управления для случая отказов каналов автор оперирует значениями управляющих моментов порядка 10^{-6} Н·м. В работе утверждается, что это достижимо для магнитных катушек на наноспутниках. Однако было бы полезно привести конкретную оценку: каким параметрам магнитной катушки (дипольный момент, ток, габариты) соответствует такая величина момента для типового МКА (например, формата 3U)? Это усилило бы практическую направленность результатов.

5. В обзоре (Глава 1) и при разработке алгоритмов автор не рассматривает и не сравнивает свои подходы с активно развивающимися методами машинного обучения и нейросетями для диагностики отказов и управления. Хотя автор справедливо указывает на сложность их применения на борту, краткое обоснование, почему выбранные классические методы предпочтительнее, было бы уместно.

6. Сложность восприятия некоторых выкладок. Формулы для матриц Якоби (Приложения А, Б) чрезвычайно громоздки. Хотя их наличие необходимо для воспроизводимости результатов, возможно, стоило дать их в более компактном виде, используя промежуточные переменные, чтобы облегчить чтение.

Однако указанные недостатки носят частный характер, не влияют на основные научные и практические результаты работы и не снижают общей высокой оценки диссертационного исследования.

Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертации. В нём в сжатой и чёткой форме изложены все ключевые результаты, положения, выносимые на защиту, и выводы. Структура автореферата логично повторяет структуру диссертации. Основные научные положения, их новизна и практическая значимость отражены в автореферате адекватно и полно.

Вывод

Диссертация Крамлиха Андрея Васильевича является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение крупной научной проблемы – обеспечения отказоустойчивости управления угловым движением малоразмерных космических аппаратов – имеющей важное значение для развития теории и практики управления движением летательных аппаратов.

Полученные автором результаты являются новыми, обоснованными и достоверными, а их практическая значимость подтверждена внедрением в разработки наноспутников семейства СамСат.

Диссертация соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Крамлих Андрей Васильевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.5.16 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Официальный оппонент

Главный ученый секретарь АО «ЦНИИмаш»,

доктор технических наук,

старший научный сотрудник

(e-mail: klyushnikovvy@tsniimash.ru)

В.Ю.Ключников

Подпись Ключникова Валерия Юрьевича заверяю

Заместитель генерального директора АО «ЦНИИмаш»
доктор технических наук, профессор

доктор технических наук, профессор

М.М.Пеньков

