

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора **Овчинникова Михаила Юрьевича** 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

За последние десятилетия произошел переход от использования малоразмерных космических аппаратов (МКА) нанокласса исключительно в образовательных целях к их массовому применению для решения различных научных и прикладных задач (дистанционное зондирование Земли, мониторинг геофизических полей, технологические эксперименты). Это повлекло за собой резкое усложнение конструкции наноспутников: появление крупногабаритных трансформируемых элементов, антенн, двигательных установок. В этих условиях жесткие требования к точности и продолжительности активного функционирования вступают в острое противоречие с фундаментальными ограничениями, присущими данному классу космических аппаратов – ограничениями на массу, габариты и энергопотребление, делающими невозможным традиционное аппаратное резервирование бортовых систем.

Целью диссертационной работы Крамлиха А.В. является решение научной проблемы, состоящей в разработке и исследовании методов и алгоритмов обеспечения отказоустойчивости управления угловым движением малоразмерных космических аппаратов. Поскольку статистика показывает, что доминирующей причиной невыполнения целевых миссий МКА являются отказы элементов системы управления угловым движением, разработка алгоритмических методов обеспечения отказоустойчивости, способных заменить аппаратную избыточность, является критически важной и **актуальной** научно-технической проблемой.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

1. Разработка архитектуры отказоустойчивой системы управления угловым движением малоразмерного космического аппарата, адаптирующейся к возможным сбоям в работе измерительных средств и исполнительных устройств.
2. Разработка методики детектирования отказов измерительных средств.
3. Разработка метода определения параметров углового движения МКА на основе геометрической видимости навигационных космических аппаратов глобальных навигационных спутниковых систем.
4. Разработка схем и алгоритмов комплексирования разнотипных измерений для определения ориентации МКА.
5. Формирование квазиоптимального терминального программного управления угловым движением МКА в штатном случае функционирования, учитывающего внешние моменты.
6. Формирование терминального программного управления угловым движением МКА в случае отказов отдельных каналов управления исполнительных устройств.
7. Синтез законов управления угловым движением МКА в случае высокой степени деградации исполнительных устройств.

Решение вышеуказанных задач создает теоретическую и практическую основы для обеспечения отказоустойчивости системы управления угловым движением МКА. Достижение данной цели определяет актуальность рецензируемой работы. Таким образом, диссертация Крамлиха А.В. представляется актуальной с точки зрения научной и практической значимости.

Структура и объем работы

Диссертация Крамлиха А.В. состоит из 210 страниц машинописного текста. Она включает введение, пять глав, заключение, список использованных источников из 207 наименований и 6 приложений.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована научная проблема, определены цель и решаемые научно-технические задачи, раскрыта

научная новизна, отмечены теоретическая и практическая значимость работы, приведены сведения о публикациях и апробации работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируются и формулируются особенности проблемы отказов в системе управления угловым движением МКА.

Во второй главе представлена архитектура контура управления угловым движением МКА, адаптирующаяся к возможным отказам датчиков и исполнительных устройств. Описываются основные системы координат, математические модели движения и измерений, используемые в цифровом двойнике.

В третьей главе рассматривается алгоритмический подход к повышению отказоустойчивости контура обратной связи за счёт адаптации к возможным отказам измерительных средств. Описан метод определения параметров углового движения МКА на основе анализа геометрической видимости навигационных космических аппаратов глобальных навигационных спутниковых систем. Описаны схемы и алгоритмы комплексирования разнотипных измерений, реконфигурация алгоритмического обеспечения обратной связи системы управления МКА.

В четвертой главе описывается синтез квазиоптимального терминального программного управления угловым движением МКА, учитывающего внешние моменты.

В пятой главе описывается построение отказоустойчивой прямой цепи системы управления угловым движением МКА. Для построения отказоустойчивой прямой цепи системы управления угловым движением МКА сформулированы и решены две задачи: синтез программного терминального управления угловым движением МКА в случае отказов исполнительных устройств и синтез законов управления угловым движением МКА в случае высокой степени деградации исполнительных устройств.

В заключении сформулированы основные достигнутые результаты.

Представленный текст диссертации содержит завершённый материал исследования. Основные результаты Крамлиха А.В. опубликованы в 51 печатной работе, в том числе 12 работ в рецензируемых научных изданиях перечня ВАК Минобрнауки РФ по специальности 2.5.16, 6 работ в рецензируемых научных изданиях, индексируемых базой данных RSCI, а также 23 работы в изданиях, индексируемых международными базами Scopus и/или Web of Science и 10 работ в сборниках трудов и тезисов конференций. Имеются публикации без соавторов.

Научная новизна и достоверность результатов работы

В работе получены следующие *новые* существенные результаты:

1. Разработана архитектура системы управления угловым движением МКА с цифровым двойником в контуре обратной связи для автономной диагностики отказов датчиков и адаптации бортового программного обеспечения.

2. Разработан метод оценки параметров углового движения МКА на основе геометрической видимости навигационных спутников, не требующий радиоинтерферометрических измерений и применимый при произвольном числе антенн.

3. Разработаны сильносвязанные и слабосвязанные схемы и алгоритмы комплексирования разнотипных измерений наиболее часто используемых измерительных средств для определения ориентации МКА.

4. Разработан алгоритм оценки параметров вращательного движения МКА, адаптирующийся к отказам датчиков на основе комплекса оригинальных алгоритмов ориентации, не требующий применения адаптивных фильтров и нелинейных наблюдателей.

5. Для штатного режима и при отказах одного или двух каналов исполнительных устройств получено квазиоптимальное терминальное программное управление угловым движением МКА с учетом внешних моментов.

6. Разработаны адаптивный и квазиадаптивный законы управления угловым движением МКА в условиях значительной деградации каналов

исполнительных устройств, обеспечивающие перераспределение управляющих воздействий на исправные органы для формирования требуемых моментов и сохранения приемлемого качества управления.

Достоверность результатов исследования подтверждается последовательной логикой исследования, применением уместных методов и подходов к исследованию, принятием предположений, адекватных реальным условиям работы МКА.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методов и алгоритмов теории управления с учетом особенностей систем управления МКА. Теоретический вклад диссертации заключается в следующем:

- развитие теории архитектуры отказоустойчивых систем управления МКА;
- развитие методов определения ориентации КА по дискретной информации;
- развитие теории комплексирования разнотипных измерений;
- развитие теории оптимального управления угловым движением;
- развитие теории адаптивного управления при деградации исполнительных устройств.

Практическая значимость работы определяется следующим:

- разработанные алгоритмы и рекомендации могут быть непосредственно использованы при проектировании систем управления МКА различного целевого назначения, поскольку не привязаны к конкретному типу исполнительных устройств и допускают масштабирование;
- метод определения ориентации по геометрической видимости навигационных спутников не требует дополнительной бортовой аппаратуры и может быть реализован программно-алгоритмическим способом на существующих навигационных приёмниках;

– алгоритмы синтеза программного управления при отказе каналов исполнительных устройств позволяют планировать манёвры переориентации МКА в нештатных ситуациях, что критически важно для спасения миссии.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Работа не лишена недостатков.

1. В Главе 1 очень подробно перечисляются типы датчиков ориентации и исполнительных элементов, их свойства, особенности и факторы деградации или отказа. Но эти сведения далее не используются. Важен лишь факт отказа или деградации датчика или актюатора, а почему это произошло – не имеет значения. Подробные свойства в Главе 1 утомляют, но не несут существенной смысловой нагрузки.

2. Постановочная часть в Главе 2 и в начале Главы 3 написана небрежно. В аэродинамическом моменте отсутствует коэффициент $\frac{1}{2}$; связь орбитальной и абсолютной скоростей оперирует векторами в разных системах координат; для описания ориентации используется «смесь» углов атаки, прецессии и собственного вращения, относящихся к разным стилям введения углов и вообще говоря в работе не введенных; плотность атмосферы рассчитывается по модели NRLMSISE, хотя примерно те же результаты дал бы и ГОСТ.

3. Рисунки 2.5-2.8 лишены обсуждения. «На рисунках показаны» результаты, но какие из этого выводы, зачем это нужно – не сказано.

4. Страница 46. В измерениях векторной величины учитывается только шум с нулевым математическим ожиданием. Непонятно, почему не учитывается сдвиг нуля, который для МКА является крайне серьезным фактором, особенно для датчика угловой скорости. При этом в формулах (2.4) и (2.5) сдвиг нуля был. Непонятна зависимость скорости от матрицы ориентации в формуле (3.4).

5. Вопросы вызывает функционал (4.3). Зачем финальные ошибки угловой скорости и ускорения умножаются на время совершения маневра и его квадрат? Время фиксировано, и оно не оказывает влияния на функционал. При этом отсутствуют весовые коэффициенты, которые задавали бы вклад первых

двух слагаемых – фактически, штрафных, и третьего и четвертого слагаемых, являющихся собственно функционалом. Эти коэффициенты необходимы для настройки оптимизационной процедуры, и они бы сразу сняли необходимость использования времени для подгонки размерностей слагаемых. Кроме того, в функционале присутствует целевое угловое ускорение в конце маневра, о котором в постановке оптимизационной задачи речи не шло.

6. На Рисунке 4.5 приведены результаты работы управления с разной структурой. Однако управление, описываемое полным (тригонометрическим), четным и нечетным рядами Фурье должно быть идентично: при правильном выборе a_n и $\tilde{a}_n$ эти ряды совпадают. Поэтому и результаты на Рисунке 4.5 для этих рядов должны быть идентичны. Судя по всему, имеется проблема в методике выбора параметров. Это частично подтверждается Рисунком 4.4. На нем приведено распределение значений $\tilde{a}_n$ – фаз, которые как раз и приводят три варианта параметризации управления к одному. Это распределение равномерное, $\tilde{a}_n$ просто принимает случайные значения с примерно равной вероятностью. В итоге начиная с Раздела 4.3.3 и в Главе 5 используются четные ряды Фурье, что основано на утверждении об их преимуществе по затратам энергии. С учетом данного замечания скорее приходится говорить об их использовании лишь как об одном из возможных вариантов, но не как о лучшем из них.

7. В Разделе 4.3.5 непонятна особенность большого аппарата. Судя по всему, имеет место лишь увеличение тензора инерции, что не является принципиальным отличием – управление масштабируется точно так же, как и тензор инерции.

8. В Таблице 5.3 приведена точность ориентации при отказе разных каналов управления. Эта точность составляет тысячные или сотые доли градуса, деградация по сравнению с полностью доступным управлением невелика. Возникает предположение, что условия моделирования были слишком мягкими: аэродинамический момент, судя по всему, является восстанавливающим, а других возмущений нет, непонятно, есть ли ошибки определения ориентации. В

таких условиях сохранение высокой точности стабилизации может быть вызвано не правильно подобранным управлением, а удачным стечением обстоятельств моделирования.

9. На странице 144 утверждается, что адаптивный закон управления позволяет достичь точности ориентации на уровне тысячных градуса при ошибках определения ориентации около одной десятой. Это невозможно. Точность обеспечения ориентации может превысить точность ее определения в несколько раз, но не на два порядка.

10. Несколько замечаний по изложению материала.

- Недоумение вызывает фраза «все результаты получены автором лично, либо под его руководством».
- В Разделе 3.2.1 не хватает общего описания, как проводится комплексирование, до перехода к схемам и таблицам.
- На Рисунке 4.18 кинетическая энергия некорректно названа «интегралом».
- По тексту диссертации плохо прослеживается использование цифрового двойника в контуре управления для идентификации отказов и деградации в системе управления. Об этом сказано во вводной части диссертации, после чего двойник практически исчезает из изложения.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным

Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация Крамлиха Андрея Васильевича «Методы и алгоритмы обеспечения отказоустойчивого управления угловым движением малоразмерных космических аппаратов» является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны новые научно обоснованные теоретические и практические решения, позволяющие решить научную проблему, имеющую важное хозяйственное значение – обеспечение отказоустойчивости управления угловым движением малоразмерных космических аппаратов.

Тема исследования соответствует паспорту специальности 2.5.16 Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов, в частности, пунктам 8, 10, 11, 12 паспорта специальности. Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация Крамлиха А.В. «Методы и алгоритмы обеспечения отказоустойчивого управления угловым движением малоразмерных космических аппаратов» удовлетворяет требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в редакции от 18.07.2026), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Хотя к работе возник ряд серьезных замечаний, считаю, что ее автор Крамлих А.В. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.16 Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник, и.о. заведующего отделом №7, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», доктор физико-математических наук, профессор

 Овчинников Михаил Юрьевич

«15» 09 2026 г.

125047, г. Москва, Миусская пл., д. 4, тел. 8 (499) 220-78-13, E-mail: ovchinni@keldysh.ru.

Подпись Овчинникова Михаила Юрьевича заверяю.

Ученый секретарь ИГиМ им. М.В. Келдыша РАН, к.ф.-м.н.

«15» 09 2026



Давыдов Александр Александрович