

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию 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.

Рецензируемая работа посвящена проблеме обеспечения отказоустойчивости системы управления угловым движением (СУУД) малоразмерных космических аппаратов (МКА) с учетом существующих технических и функциональных ограничений, характерных для МКА. Актуальность сформулированной проблемы определяется фактами все более широкого использования космических аппаратов (КА) данного класса для решения перманентно расширяющегося класса задач, что, в свою очередь, приводит к усложнению конструкции, бортовых аппаратных средств и алгоритмического обеспечения таких аппаратов. Последние обстоятельства имеют своим следствием рост требований к качеству функционирования бортовых систем МКА, включая СУУД, с точки зрения надежности и отказоустойчивости. Приведенные выше соображения позволяют утверждать, что тема настоящего исследования является остро актуальной. Автор рецензируемой работы решает обсуждаемую научно – техническую проблему путем формирования адаптивной автономной системы детектирования и парирования отказов измерительных средств и исполнительных систем МКА без резервирования исполнительных устройств на основе использования современных бортовых вычислительных средств.

Структура диссертационной работы и основные результаты.

Работа включает введение, пять глав, заключение и ряд приложений. Введение содержит детальное обоснование актуальности темы настоящего диссертационного исследования, а также формулировки цели исследования и основных положений, характеризующих его научную новизну и прикладную значимость.

В первой главе, которая имеет название «Формулировка и анализ состояния проблемы», автор проводит детальный анализ особенностей МКА как средства для решения целевых научно-технических задач и объекта управления, уделяя существенное внимание, в том числе, ключевым факторам, влияющим на деградацию измерительных средств и исполнительных устройств, а также способам компенсации их влияния. Кроме того, глава содержит анализ достоинств и недостатков методов

диагностирования и обнаружения отказов, результаты которого, как считает автор, демонстрируют, что выбор такого метода должен быть основан на «специфических требованиях миссии и доступных ресурсах». Такой вывод, по мнению оппонента, является априори очевидным и в рамках настоящего исследования лишь подтверждает научную добросовестность автора при решении обсуждаемой проблемы. В конечном счете с учетом существующих ограничений на массу и габариты на МКА результаты данной главы подтверждают целесообразность выбранного автором подхода к решению обсуждаемой научно –технической проблемы обеспечения отказоустойчивости СУУДД МКА на основе формирования адаптивной автономной системы детектирования и парирования отказов измерительных средств и исполнительных систем МКА без резервирования исполнительных устройств на базе современных бортовых вычислительных средств.

Вторая глава «Архитектура системы управления угловым движением МКА», является, по мнению оппонента, центральной с точки зрения научной новизны и оригинальности предлагаемого автором способа формирования архитектуры контура управления угловым движением МКА с использованием цифрового двойника в интересах автономного детектирования отказов измерительных средств МКА. При этом адаптация бортовой математической модели к текущим условиям функционирования и состоянию МКА обеспечивается путем генерации цифровым двойником прогнозных измерений и последующим сравнением. прогнозных значений, с фактическим измерениями. Таким образом, реализуется возможность предотвратить использования недостоверных измерений при решении задачи оценки ориентации МКА.

Третья глава работы носит название «Повышение отказоустойчивости контура обратной связи за счёт адаптации к возможным отказам измерительных средств» и содержит ряд результатов, представляющих существенный научный и прикладной интерес. Речь идет, в частности, о способе определения параметров углового движения МКА на основе геометрической видимости навигационных космических аппаратов глобальных навигационных спутниковых систем и алгоритмах определения ориентации МКА на основе комплексирования разнотипных измерений, наиболее часто используемых датчиков с данными о геометрической видимости навигационных космических аппаратов. Здесь, в первую очередь, следует отметить оригинальность предлагаемых научно-технических решений. Вместе с тем, при их анализе возникают неизбежные вопросы. Действительно, как пишет автор, исходные данные в этой задаче включают: параметры движения центра масс (ПДЦМ) МКА: координаты и проекции

скорости в АГСК, координаты НКА ГНСС, а также вектор направляющих косинусов (НК) фазовых центров навигационных антенн (ФЦНА) в связанной системе координат (ССК). Все перечисленные выше исходные данные не являются детерминированными. Это случайные векторы, а вектор направляющих косинусов ФЦНА – неопределенная величина, т.к. определение положения ФЦ вообще самостоятельная сложная задача. Таким образом, при всей оригинальности и новизне данного подхода характеристики такого алгоритма подлежат самостоятельному дополнительному исследованию с учетом приведенных замечаний. Аналогично, анализ приведенных в главе распределения вероятностей требует дополнительной информации относительно условий моделирования с точки зрения доверительных интервалов и вероятностей. Тем не менее, несмотря на сформулированные замечания, в целом данная глава подтверждает высокий научный уровень и новизну приведенных результатов работы. Отдельно следует отметить тщательность проработки путем имитационного моделирования алгоритма калмановского типа.

Четвертая глава работы «Квазиоптимальное терминальное программное управление угловым движением МКА, учитывающее внешние моменты» является, по мнению оппонента, центральной с точки зрения уровня новизны полученных теоретических результатов. Автором предложено интерпретировать задачу управления угловым движением МКА с внешними моментами как задачу поиска неизвестных коэффициентов в рамках заданной структуры управления. При этом для штатного режима и случаев потери одного или двух каналов изменяется лишь набор коэффициентов и число доступных управляющих компонент. Иными словами, предложено перейти от бесконечномерной задачи поиска функции управления к конечномерной задаче оптимизации, решаемой с использованием так называемого алгоритма дифференциальной эволюции, не имеющего, к сожалению, строгого доказательства факта сходимости генерируемого решения к глобальному экстремуму.

Пятая глава, имеющая название «Построение отказоустойчивой прямой цепи системы управления угловым движением МКА» посвящена формированию программного терминального управления угловым движением МКА в случаях отказов и высокой деградации исполнительных устройств. В целом для решения сформулированных выше задач здесь использовался подход, развитый в предыдущей главе работы. Так, для случая программного управления при отказах исполнительных устройств используется эмпирический выбор коэффициентов функционального ряда в рамках выбранной структуры управления, основанный на имеющемся опыте с учетом

адекватности соответствующих моделей движения МКА. Достижимый эффект подтверждается имитационным моделированием. Задача формирования управления в случае высокой деградации исполнительных устройств решается на основе так называемого скользящего управления при эмпирическом подборе неизвестных коэффициентов в двух вариантах реализации алгоритма: квазиадаптивным, т. е. с коэффициентами, не зависящими от начальной угловой скорости МКА и адаптивным, когда коэффициенты зависят от времени. Работоспособность алгоритмов подтверждается имитационным моделированием.

Научная новизна результатов диссертационной работы. По мнению оппонента, наибольший интерес представляют следующие новые научные результаты, полученные лично автором.

1. Интерпретация понятия отказоустойчивости не как факта обнаружения отдельного отказа, а как свойства замкнутой системы управления пространственным движением МКА, реализующей три взаимосвязанных процесса: выявление недостоверной информации, определение параметров углового движения МКА при изменении состава измерений и сохранение управляемости при потере или высокой деградации исполнительных устройств.

2. Включение цифрового двойника в контур управления угловым движением МКА, что дает возможность рассматривать бортовые математические модели как функциональный элемент системы управления, влияющий на выбор её структуры и используемый для калибровки, идентификации, прогнозирования, диагностики и реконфигурации в рамках единой динамической схемы.

3. Интерпретация задачи управления угловым движением МКА с учетом внешних моментов как задачи поиска неизвестных коэффициентов в рамках заданной структуры управления (выбранного функционального ряда). В результате для штатного режима и случаев потери одного или двух каналов единая структура управления сохраняется, а изменяется лишь набор коэффициентов и число доступных управляющих компонент. Таким образом, предложен механизм формирования программного управления при различной структуре исполнительной системы, что позволяет сравнивать качество генерируемых решений по единому критерию.

4. Интерпретация понятия избыточности системы управления как избыточности отображений между состоянием МКА и доступной измерительной информацией. В результате избыточность создаётся не количеством одинаковых приборов, а множественностью алгоритмических способов извлечения информации из уже имеющегося состава аппаратуры.

5. Разработка комплекса алгоритмов для достижения цели настоящего исследования, включающего:

- алгоритм определения параметров углового движения МКА на основе геометрической видимости навигационных космических аппаратов глобальных навигационных спутниковых систем
- алгоритмы определения ориентации МКА на основе интеграции разнотипных измерений и данных о геометрической видимости навигационных космических аппаратов
- алгоритм определения параметров движения относительно центра масс МКА, адаптирующийся к возможным отказам измерительных средств
- алгоритм синтеза квазиоптимальных терминальных программных управлений угловым движением МКА в штатном случае и в случае отказа одного или двух каналов управления исполнительных устройств, учитывающий внешние моменты
- алгоритм синтеза адаптивного и квазиадаптивного законов управления угловым движением МКА в случае высокой деградации каналов управления исполнительных устройств, обеспечивающий сохранение приемлемого качества управления.

Практическая ценность диссертационной работы. Практическая ценность результатов диссертации определяется тем, что разработанные методы и алгоритмы позволяют:

компенсировать дефицит аппаратного резерва программными, модельными и информационными средствами.

варьировать алгоритм определения ориентации и формировать аварийное управление при изменении состава измерительных средств или исполнительных каналов

восстанавливать энергобезопасную ориентацию, связь, наведение антенн или ограниченный режим работы полезной нагрузки в условиях, когда номинальная точность и быстродействие системы недостижимы.

снизить объём срочного «ручного» анализа в центре управления с учетом возможности автоматической диагностики и реконфигурации алгоритмического обеспечения.

Замечания, которые оппонент считает необходимым привести в своем отзыве.

1. Предложенный автором алгоритм определения параметров углового движения МКА на основе геометрической видимости навигационных

космических аппаратов глобальных навигационных спутниковых систем интерпретирует используемые исходные данные как детерминированные, в то время как фактически они являются случайными и частично неопределёнными. В связи со сказанным характеристики этого алгоритма и возможность его использования на борту МКА подлежат отдельному исследованию.

2. В тексте диссертации, в частности, в первой, второй и третьей главах встречаются положения и математические модели, более уместные в учебном пособии.
3. Формулировки выводов по главам не всегда адекватно отражают описанные в соответствующей главе результаты.
4. В тексте диссертации присутствуют орфографические и пунктуационные ошибки.

Несмотря на высказанные замечания считаю, что диссертационная работа А.В. Крамлиха содержит теоретическое обобщение и решение сложной проблемы создания системы отказоустойчивого управления угловым движением малоразмерных космических аппаратов, а также результаты практического использования предложенного теоретического обобщения в процессе решения прикладных задач,

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертационной работы.

Вывод. Диссертационная работа А.В. Крамлиха выполнена на актуальную тему, отличается научной новизной и практической значимостью полученных результатов, имеет завершённый характер. Автором в диссертации сформулирована и решена важная научно-техническая проблема, связанная с разработкой отказоустойчивого управления угловым движением малоразмерных космических аппаратов. Диссертация, содержит ряд новых научных результатов, полученных лично автором. Теоретические решения и прикладные методики, предложенные автором работы, внедрены как в реальный процесс создания систем управления угловым движением малоразмерных космических аппаратов, так и в учебный процесс, связанный с созданием перспективных образцов космической техники, о чем свидетельствуют соответствующие документы. На основании вышесказанного можно утверждать, что настоящая диссертационная работа соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842.

Таким образом, считаю, что диссертация А.В Крамлиха является законченной научно-квалификационной работой, отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 2.5.16. «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Официальный оппонент, Заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Совета Министров СССР и премии Правительства РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационно-управляющие комплексы летательных аппаратов» Института №7 «Робототехнические и интеллектуальные системы летательных аппаратов» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета).

 М.Н. Красильщиков
08.09.2026

Подпись профессора М.Н. Красильщикова заверяю:

Директор Дирекции Института №7 «Робототехнические и интеллектуальные системы летательных аппаратов» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета),
д.т.н., профессор РАН



А.В.Кривилев.