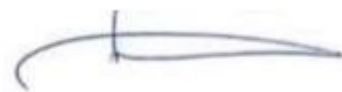


На правах рукописи



Филиппов Александр Сергеевич

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ
УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ МАЛОГО
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Специальность 2.2.11. Информационно-измерительные
и управляющие системы

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Самара - 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский Университет) на кафедре «Космического машиностроения имени Генерального конструктора Д.И. Козлова»

Научный руководитель:

Седельников Андрей Валерьевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Космического машиностроения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Официальные оппоненты:

Бодин Олег Николаевич

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Информационно-измерительной техники и метрологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет»

Кушников Вадим Алексеевич

Доктор технических наук, профессор, председатель Саратовского научного центра Российской академии наук

Ведущая организация:

АО «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева», г. Москва

Защита состоится «23» ноября 2021 г. в 12 :00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07), созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», по адресу г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ауд. №200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: 443100, г. Самара, ул. Первомайская, 18 и на сайте диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07) <http://d21221707.samgtu.ru>.

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07), тел.: (846) 337-05-45, факс(846) 278-44-00, e-mail.ru: 212.217.07@mail.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

24.2.377.04 (Д 212.217.07),

к.т.н., доцент



Екатерина Евгеньевна Ярославкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Широкое применение в различных сферах исследований и доступность малых космических аппаратов (МКА) может существенно ускорить технический прогресс во многих областях науки и техники. МКА, в отличие от космических аппаратов (КА) среднего класса, имеют невысокую стоимость разработки и эксплуатации. Они могут быть созданы и испытаны за относительно короткий срок и выведены на орбиту в качестве попутной нагрузки. В соответствии с «Основными положениями Федеральной космической программы 2016-2025» главным направлением развития космических комплексов являются МКА для мониторинга погоды, фундаментальных космических исследований и отработки новых технологических и схемотехнических решений служебных систем и целевой аппаратуры. Для всех МКА вышеперечисленных направлений необходимо управление ориентацией с помощью информационно-измерительных управляющих систем (ИИУС ориентации) при выполнении следующих целевых задач: мониторинг земной поверхности из космоса, ориентация панелей солнечных батарей относительно Солнца, прием и передача телеметрической информации (ТМИ). Управление ориентацией МКА заключается в обеспечении значений угловой скорости в заданном целевом диапазоне. Данный диапазон определяется техническим заданием на конкретный МКА. В качестве исполнительных органов ИИУС ориентации чаще всего используют магнитные исполнительные органы (МИО). Для оценки значений угловой скорости в составе ИИУС ориентации необходимо наличие информационно-измерительной системы контроля угловой скорости вращательного движения (ИИС КВД). Средствами измерения могут служить магнитометры, датчики угловой скорости, звездные датчики, акселерометры и др. Для МКА широко применяются магнитометры, поскольку они имеют большой ресурс работы, высокую надежность, компактные габариты, низкие массу и стоимость по сравнению с другими видами ИИС КВД.

Степень разработанности темы. Основные принципы работы магнитных ИИУС ориентации изучены достаточно хорошо и изложены в ряде фундаментальных работ Коваленко А.П., Драновского В.И., Овчинникова М.Ю. Однако развитие и миниатюризация космической техники, а также использование в ней новых технологий оставляет тему разработки эффективной ИИУС ориентации актуальной в настоящее время (работы Аншакова Г.П., Сёмкина Н.Д., Сазонова В.В. и др.).

Растущее количество создаваемых МКА придало этой тематике ещё большую актуальность. Плотная внутренняя компоновка и малые размеры МКА не позволяют изолировать магнитометры от влияния бортовой аппаратуры (БА). БА при своем функционировании создает магнитные возмущения, воздействие которых приводит к увеличению погрешности измерения вектора индукции магнитного поля Земли (МПЗ) магнитометрами. Это подтвердил опыт эксплуатации двух МКА серии «Аист».

Актуальной остается проблема разработки ИИС КВД, которая при работе учитывает погрешность измерения магнитометров из-за влияния БА. Для решения этой проблемы недостаточно только улучшение технических возможностей ИИС КВД. Необходимо проведение комплексных наземных испытаний для каждого режима работы БА с целью выявления влияния магнитных возмущений на измерения магнитометров. Поскольку при наземных испытаниях невозможно учесть

все факторы реального космического полета, то для эффективного функционирования ИИС КВД требуется непрерывный контроль корректности измерения магнитометров.

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности ИИС КВД с магнитометрами за счет снижения погрешности измерения вектора индукции МПЗ на основе использования новых алгоритмов функционирования и методики наземных испытаний.

Основные задачи исследования:

1 Анализ алгоритмов и структур построения информационно-измерительных систем для контроля угловой скорости МКА.

2 Разработка структуры ИИС КВД с магнитометрами, реализующей настраиваемые алгоритмы обработки информации на борту МКА на стадии эксплуатации.

3 Разработка функционально-ориентированной на применение в ИИС КВД математической модели вращения МКА для анализа влияния возмущений гравитационного, магнитного и аэродинамического характера на угловую скорость вращательного движения МКА.

4 Разработка методики наземных испытаний ИИС КВД, позволяющей по результатам их проведения сформировать массив поправочных коэффициентов для снижения погрешности измерений магнитометров, связанной с влиянием магнитных возмущений от работы БА.

5 Разработка схемы функционирования ИИС КВД в составе ИИУС на борту МКА, включающей в себя алгоритм непрерывного контроля, для повышения эффективности контроля угловой скорости МКА.

6 Количественная оценка повышения эффективности контроля угловой скорости средствами разработанной ИИС КВД при эксплуатации МКА «АИСТ-2Д».

Объектом исследований является ИИС КВД

Предметом исследований является МКА с ИИС КВД.

Научная новизна заключается в следующем:

1 Разработана функционально-ориентированная математическая модель вращения МКА, отличающаяся от известных моделей учетом возмущений от БА, которая является методологической основой для разработки структуры ИИС КВД.

2 Разработана структура ИИС КВД, отличающаяся от существующих реализацией алгоритма непрерывного контроля за счет внедрения блока вычислителя, что позволяет снизить погрешность оценки угловой скорости.

3 Разработан метод наземных испытаний ИИС КВД для МКА, отличающийся учетом влияния магнитных возмущений от бортовой аппаратуры на измерения магнитометров путем формирования массива поправочных коэффициентов, для снижения погрешности измерений индукции магнитного поля Земли.

4 Разработан алгоритм непрерывного контроля угловой скорости МКА, который позволяет учесть значимые внутренние и внешние возмущения магнитных полей, не выявленные при наземных испытаниях.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

1 Разработанная ИИС КВД позволяет контролировать угловую скорость вращения МКА без применения высокоточных и дорогостоящих систем ориентации и управления движением.

2 Разработанные методика наземных испытаний и схема функционирования ИИС КВД позволяют обеспечивать эффективную работу ИИС КВД с учётом влияния возмущений от БА на магнитометры для КА различных классов.

3 Разработанный алгоритм непрерывного контроля может использоваться для обеспечения целевого диапазона угловой скорости в различных ИИУС ориентации.

На ИИС КВД получен патент №2692741. Методика испытаний, представленные в работе, используются в деятельности предприятия АО «РКЦ «Прогресс», о чем свидетельствует акт внедрения.

Методы исследования включают в себя методы математического анализа, интегрального и дифференциального исчисления, теоретической механики, технического контроля, оценивания погрешностей, численного анализа, имитационного моделирования на ЭВМ. В экспериментальных исследованиях использовались положения теории измерений, планирования эксперимента и статистическая обработка полученных результатов.

На защиту выносятся:

1) Структура ИИС КВД, содержащая блок вычислителя для реализации алгоритма непрерывного контроля угловой скорости вращения МКА.

2) Методика наземных испытаний ИИС КВД для формирования массива поправочных коэффициентов, учитывающих влияние БА на измерения магнитометров.

3) Схема функционирования ИИС КВД с алгоритмом непрерывного контроля для снижения погрешности оценки угловой скорости вращения МКА.

4) Функционально-ориентированная на применение в ИИС КВД математическая модель вращения МКА, учитывающая значимые возмущающие факторы.

5) Результаты лётно-космических испытаний ИИС КВД в составе магнитной ИИУС ориентации на борту МКА «АИСТ-2Д» с оценкой точности определения угловой скорости вращения МКА, вероятности её пребывания в целевом диапазоне, вероятности принятия правильного решения об использовании управления, подтверждающие повышение эффективности контроля угловой скорости.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.11.16 «Информационно-измерительные и управляющие системы (технические системы)»:

По п. 1 – научное обоснование разработанной структуры ИИС, позволяющей повысить эффективность существующих ИИС, предназначенных для контроля угловой скорости вращательного движения МКА за счёт снижения погрешности измерений магнитометров.

По п. 3 – методика испытаний разработанного ИИС, позволяющая учитывать влияние магнитных возмущений от БА на измерения магнитометров при функционировании ИИС.

По п. 4 – методы наземных и лётных испытаний разработанного ИИС в составе МКА «АИСТ-2Д».

Достоверность результатов исследования обеспечивается корректным использованием математического аппарата и вводимых допущений, имитационным моделированием и экспериментальными исследованиями разработанной ИИС КВД, подтверждающими основные теоретические положения работы и не противоречащими известным знаниям в данной области исследований.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на 11 международных и Всероссийских конференциях, в числе которых: третья международная конференция «Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках» (2014, г. Самара); XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (2015, г. Казань); II Дальневосточный конгресс инженеров «Наука-инженер-промышленность» (2015, г. Комсомольск-на-Амуре); Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Орбита молодежи и перспективы развития Российской космонавтики» (2016, г. Самара); Международная молодежная научная конференция, посвященная 110-летию со дня рождения академика С.П. Королева, 75-летию КуАИ–СГАУ–СамГУ–Самарского университета и 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника Земли «XIV Королевские чтения» (2017, г. Самара); V Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (V Козловские чтения) (2017, г. Самара); 60-я Всероссийская научная конференция МФТИ (2017, г. Долгопрудный); Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии в промышленности и производстве» (2018, г. Томск); 2nd International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (2018, г. Москва); The 3rd International Conference on Smart Materials Technologies (2018, г. Москва); FarEastCon (2020, г. Владивосток).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 24 работах, в том числе: 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 8 статей в журналах, входящих в международные базы Web of Science и Scopus, 9 статей в прочих изданиях.

Личный вклад автора. Все результаты, определяющие научную новизну, получены автором лично. В публикациях, выполненных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты: В публикациях, выполненных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты: разработка функционально ориентированной математической модели вращения МКА для использования в ИИС КВД, разработка структуры ИИС КВД с магнитометрами, разработка методик наземных и летных испытаний ИИС КВД, исследование эффективности созданной ИИС КВД.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 125 наименований, изложена на 145 страницах текста, содержит 40 рисунков, 7 таблиц и 1 приложение.

Во **введении** показана актуальность темы диссертации, сформулирована цель, перечислены задачи исследования, дан анализ состояния проблемы, представлены научная новизна, практическая ценность работы и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведён обзор и анализ существующих ИИС КВД. Рассмотрены основные принципы их построения и функционирования.

Установлено, что для эффективной работы ИИУС ориентации требуется с высокой точностью определять и контролировать угловую скорость вращения МКА с помощью ИИС КВД. При этом эффективность функционирования ИИС КВД можно количественно оценить значениями рисков невыполнения задачи снижения угловой скорости МКА. Целевой диапазон угловой скорости вращения определяет возможность применения МКА для решения различных целевых задач.

Такая ИИС КВД может быть построена на использовании измерений с магнитометров. Их важными преимуществами являются высокая надежность,

простота конструкции, малые масса, габариты и энергопотребление. Это обуславливает их широкое применение на МКА. Однако у магнитометров имеются и недостатки. Например, влияние на измерения собственных магнитных полей МКА, определяющее невысокую точность измерений составляющей МПЗ. В этой связи проведен анализ существующих способов снижения влияния возмущений от БА на магнитометры. Сделан вывод о том, что одним из самых эффективных способов является компенсация магнитных возмущений в цепи обратной связи блока вычисления ИИС КВД. Для оценки величины компенсации возмущений необходимо создать методику испытаний по определению магнитных возмущений от БА.

Для ИИС КВД условия эксплуатации будут отличаться от условий наземных испытаний. Для эффективного функционирования на стадии эксплуатации МКА требуется разработка алгоритма функционирования ИИС КВД в составе ИИУС ориентации.

Во **второй** главе построена функционально-ориентированная математическая модель определения угловой скорости вращательного движения МКА по данным измерения вектора индукции МПЗ при справедливости следующих допущений:

- 1 модель движения МКА – пространственное вращение вокруг центра масс;
- 2 МКА представляет собой абсолютно твёрдое тело;
- 3 учитываются следующие возмущающие факторы: гравитационный, аэродинамический, магнитный моменты и управляющий момент МИО.

Используем теорему об изменении кинетического момента:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}^e,$$

где $\vec{M}^e$ – вектор внешних моментов, действующих на КА и определённых допущением 3.

Выражение для кинетического момента будет иметь вид:

$$\vec{L} = \hat{I} \cdot \vec{\omega} + m \vec{r}_0 \times \dot{\vec{r}}_0,$$

где $\hat{I}$ – тензор инерции КА в главной связанной системе координат (рисунок 1); $\vec{\omega}$ – вектор угловой скорости МКА в главной связанной системе координат; m – масса КА; $\vec{r}_0$ – радиус-вектор центра масс в главной связанной системе координат; $\dot{\vec{r}}_0$ – вектор скорости центра масс в главной связанной системе координат.

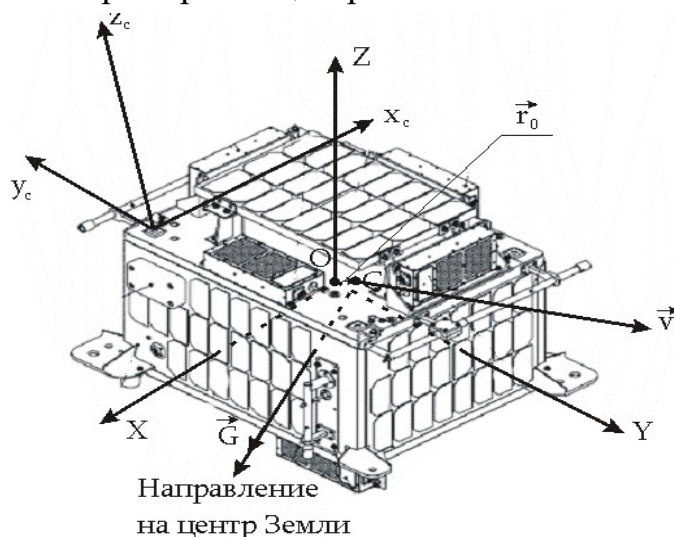


Рисунок 1 – Используемые системы координат: XYZ – главная связанная система координат; $x_c y_c z_c$ – строительная система координат магнитометра; C – центр масс МКА; G – направление на центр Земли

При принятых допущениях уравнения модели примут вид:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x [I_x + m(y_0^2 + z_0^2)] - \dot{\omega}_y (mx_0 y_0) - \dot{\omega}_z (mx_0 z_0) + m[\omega_x x_0 (\omega_z y_0 - \omega_y z_0) + \omega_y \omega_z (y_0^2 - z_0^2) + y_0 z_0 (\omega_z^2 - \omega_y^2)] = \\ = -M_{ynpX} + G_z y_0 - G_y z_0 + B_z p_y - B_y p_z; \\ -\dot{\omega}_x (mx_0 y_0) + \dot{\omega}_y [I_y + m(x_0^2 + z_0^2)] - \dot{\omega}_z (my_0 z_0) + m[\omega_y y_0 (\omega_x z_0 - \omega_z x_0) + \omega_x \omega_z (z_0^2 - x_0^2) + x_0 z_0 (\omega_x^2 - \omega_z^2)] = \\ = -M_{ynpY} + G_x z_0 - G_z x_0 + B_x p_z - B_z p_x; \\ -\dot{\omega}_x (mx_0 z_0) - \dot{\omega}_y (my_0 z_0) + \dot{\omega}_z [I_z + m(x_0^2 + y_0^2)] + m[\omega_z z_0 (\omega_y x_0 - \omega_x y_0) + \omega_x \omega_y (x_0^2 - y_0^2) + x_0 y_0 (\omega_y^2 - \omega_x^2)] = \\ = -M_{ynpZ} + G_y x_0 - G_x y_0 + B_y p_x - B_x p_y. \end{cases}$$

Согласно допущению №3, правая часть имеет структуру:

$$\vec{M}^e = \vec{M}_{aep} + \vec{M}_{ep} + \vec{M}_{mag} + \vec{M}_{ynp},$$

где $\vec{M}_{aep}, \vec{M}_{ep}, \vec{M}_{mag}, \vec{M}_{ynp}$ – векторы аэродинамического, гравитационного, магнитного моментов и управляющего момента МИО соответственно.

Проведенные оценки на примере МКА «Аист» показывают, что гравитационный и магнитный возмущающие моменты, действующие на МКА, являются соизмеримыми при доминировании магнитного момента. Аэродинамический возмущающий момент примерно на два порядка ниже. Эти оценки хорошо согласуются с аналогичными оценками, выполненными для других МКА («Ямал-200», «Ямал-201», «Ямал-202», «Микросат», «Ямал-100», «Egyptsat»).

В результате лётных испытаний ЛО и ОО МКА «Аист» выяснилось, что влияние магнитных возмущений, создаваемых БА, привело к существенным различиям измерений двух магнитометров. Использование этих измерений для управления МИО на ЛО МКА «Аист» привело к снижению угловой скорости вращения МКА вокруг центра масс и последующему нахождению ее значений в пределах целевого диапазона. Попытки снижения угловой скорости на ОО МКА «Аист», наоборот, привели к «раскрутке» МКА и выходу значений угловой скорости за целевой диапазон. На рисунке 2 приведены оценки сдвигов средних выборочных значений измерений по соответствующим каналам двух магнитометров для наземных и лётных испытаний ЛО МКА «Аист» без включения и с включением МИО.

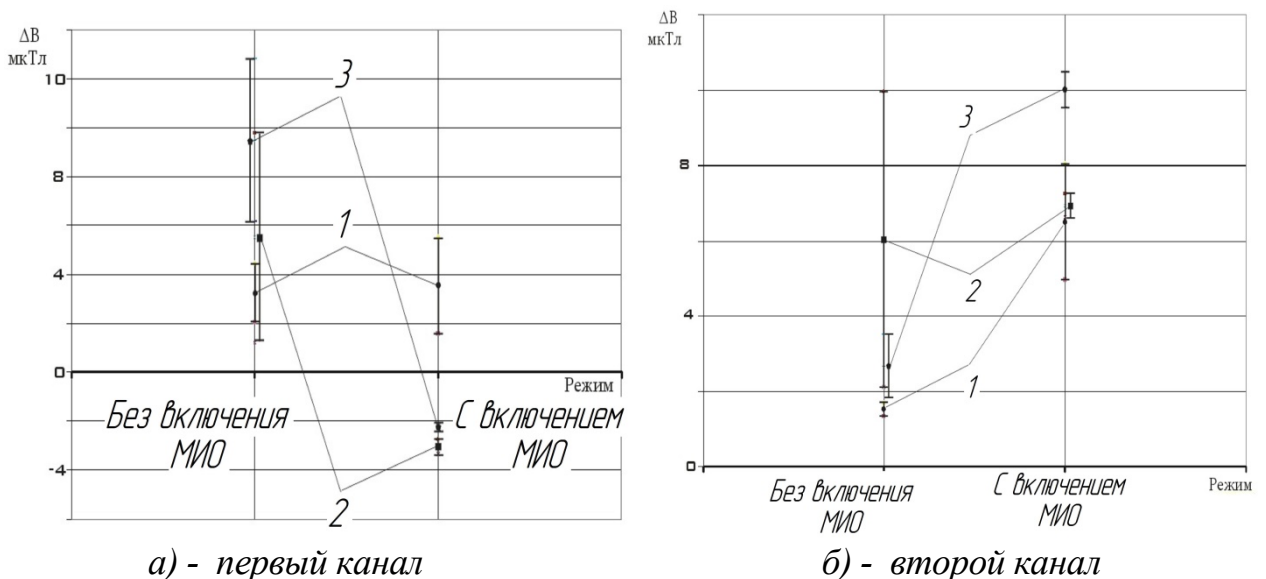


Рисунок 2– Оценка сдвига средних выборочных значений магнитной индукции по каналам измерений двух магнитометров:

1) лётные испытания; 2) испытания в цехе; 3) испытания на Байконуре

Результаты представленные на рисунке 2 показывают, что средние значения измерений магнитометров имеют значимый сдвиг из-за влияния БА.

С помощью функционально-ориентированной модели установлено, что основным возмущающим фактором, влияющим на угловую скорость МКА является магнитный момент. Это подтверждается результатами эксплуатации ЛО и ОО МКА «Аист».

В третьей главе разработана структура ИИС КВД с магнитометрами (рисунок 3).

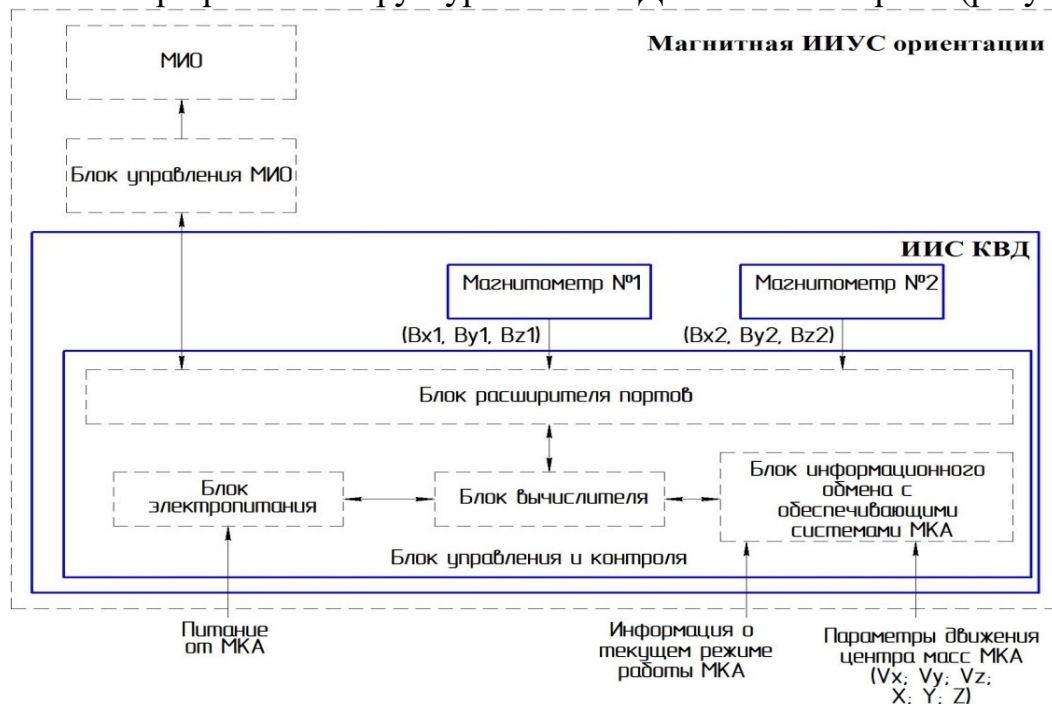


Рисунок 3 – Структурная схема бортового сегмента ИИС КВД

Она позволяет снижать погрешность определения угловой скорости вращения МКА. Это достигается за счет реализации алгоритма непрерывного контроля на средствах ИИС КВД, для чего в ее состав введен блок вычислителя. При этом часть вычислительных задач, связанных с формированием массива поправочных коэффициентов, переложена с блока вычислителя на наземный сегмент ИИС КВД. Это позволяет снизить массо-габаритные характеристики бортового сегмента ИИС КВД.

На ИИС КВД получен патент № 2692741 «Устройство контроля параметров углового движения космического аппарата по данным бортовых измерений состояния геомагнитного поля».

Алгоритм функционирования ИИС КВД приведен на рисунке 4. Проведен метрологический анализ измерительных каналов ИИС КВД. Для расчета инструментальных погрешностей разработана модель измерительных каналов магнитометра (рисунок 5). Для определения методических погрешностей при оценке угловой скорости вращения МКА разработана модель измерительного канала ИИС КВД (рисунок 6). Получены выражения для мультипликативной и аддитивной относительных погрешностей измерительных каналов.

Используемый в составе ИИС КВД магнитометр АКПС.411173.100 является модернизированной версией магнитометра бесконтактного ДМ-002 АКПС.411172.002, который внесен в государственный реестр средств измерений рег. номер №38456-08. Модернизация затронула только замену АЦП в связи с прекращением выпуска ЭКБ. Используемый в настоящее время АЦП AD7928 имеет большую разрядность и повышенную частоту дискретизации по сравнению со своей

предыдущей версией. Таким образом, погрешность магнитометра АКПС.411173.100, используемого в разработанной ИИС КВД, не может превышать погрешность магнитометра АКПС.411172.002 и составит $\pm 0,5$ мкТл.



Рисунок 4 – Алгоритм функционирования ИИС КВД

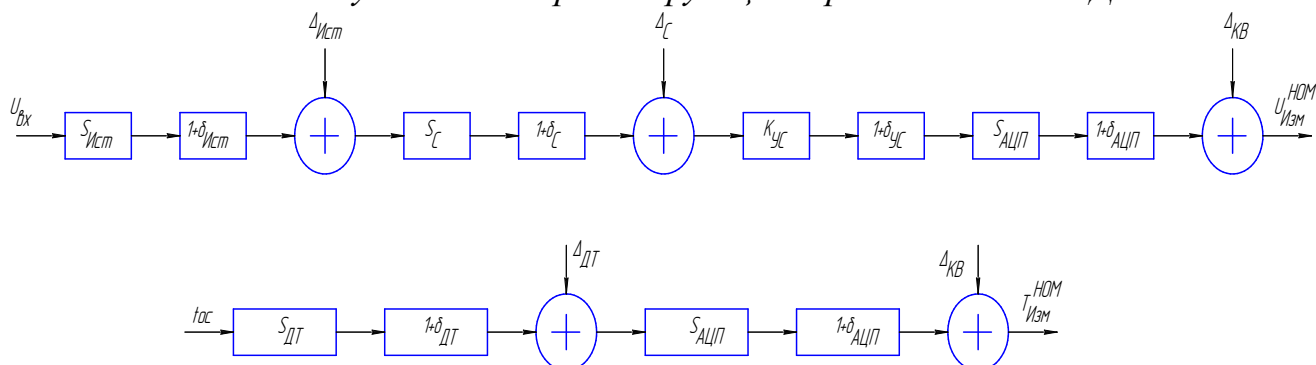


Рисунок 5 – Модель измерительных каналов магнитометра

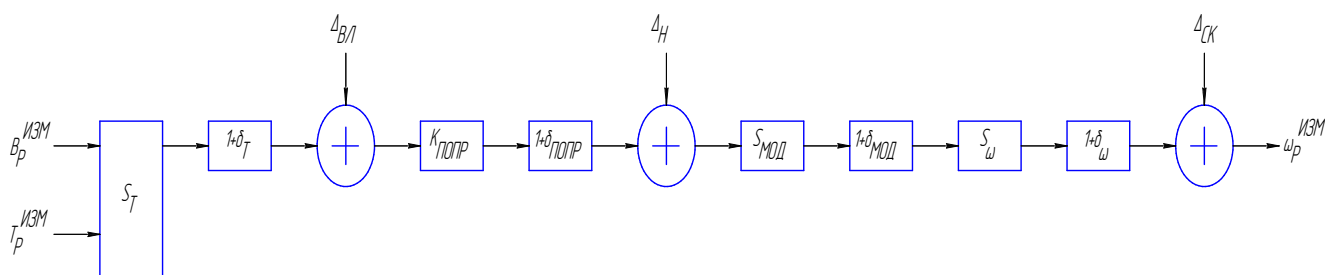


Рисунок 6 – Структурная модель канала ИИС КВД для определения угловой скорости МКА

В четвёртой главе представлены методика наземных испытаний ИИС КВД и схема функционирования ИИС КВД, включающая процедуру непрерывного контроля угловой скорости МКА.

Отличительной особенностью разработанной методики наземных испытаний является формирование массива поправочных коэффициентов для учёта влияния магнитных возмущений от БА. Дополнительно методика позволяет определить магнитные возмущения от других объектов, присутствующих на испытаниях, например, испытательной оснастки или контрольно-проверочной аппаратуры. Методика предполагает определение поправочных коэффициентов как при работе отдельной БА, так и при работе комплекса БА, определенного штатными режимами функционирования МКА. Сформированный массив поправочных коэффициентов позволяет снизить погрешность измерения индукции МПЗ. Алгоритм проведения испытаний по разработанной методике приведен на рисунке 7.

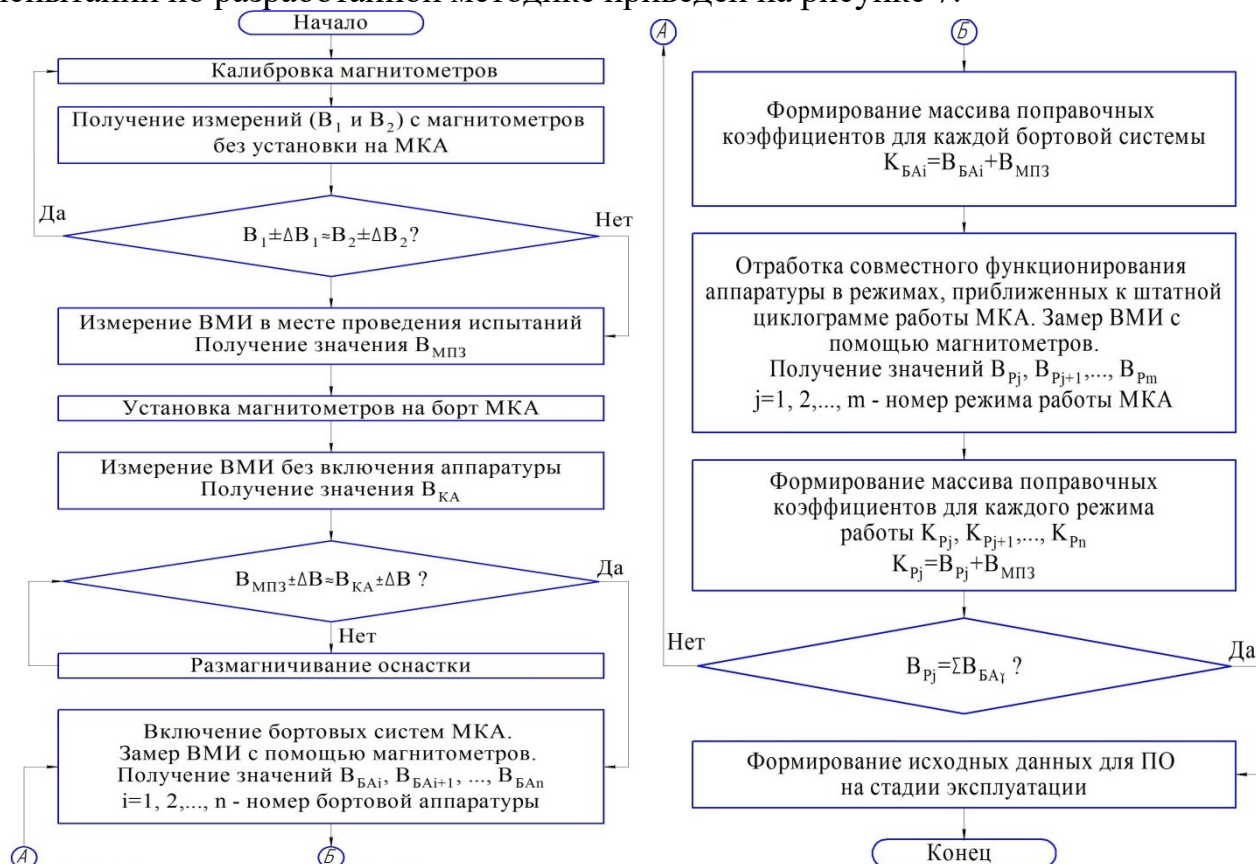


Рисунок 7 – Алгоритм проведения наземных испытаний ИИС КВД

Разработанная схема функционирования ИИС КВД позволяет учесть возмущения магнитного характера, которые не могли быть учтены на этапе

наземных испытаний. Конечным результатом применения схемы функционирования ИИС КВД является постоянная корректировка сформированных на стадии наземных испытаний поправочных коэффициентов и непрерывный контроль пребывания угловой скорости в целевом диапазоне.

Схема функционирования ИИС КВД представлена на рисунке 8. Алгоритм непрерывного контроля, реализуемый на средствах ИИС КВД, представлен на рисунке 9.

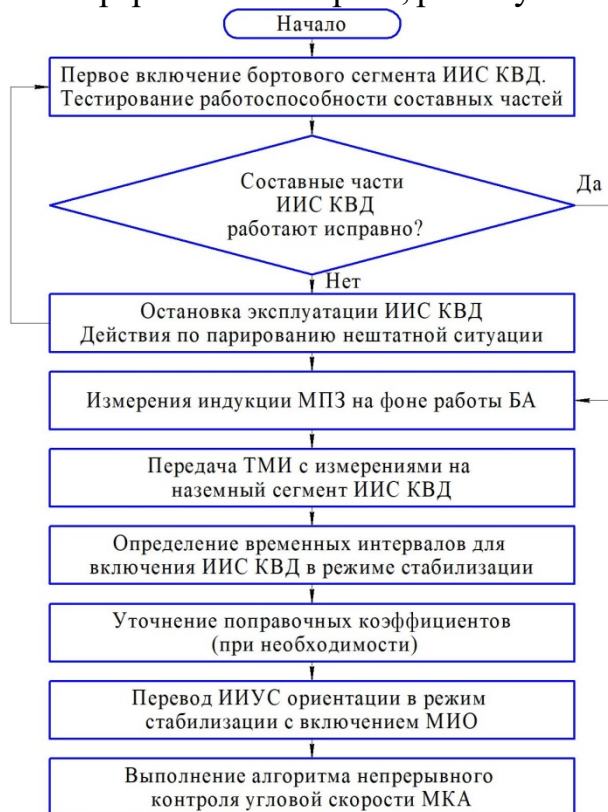


Рисунок 8 – Схема функционирования ИИС КВД

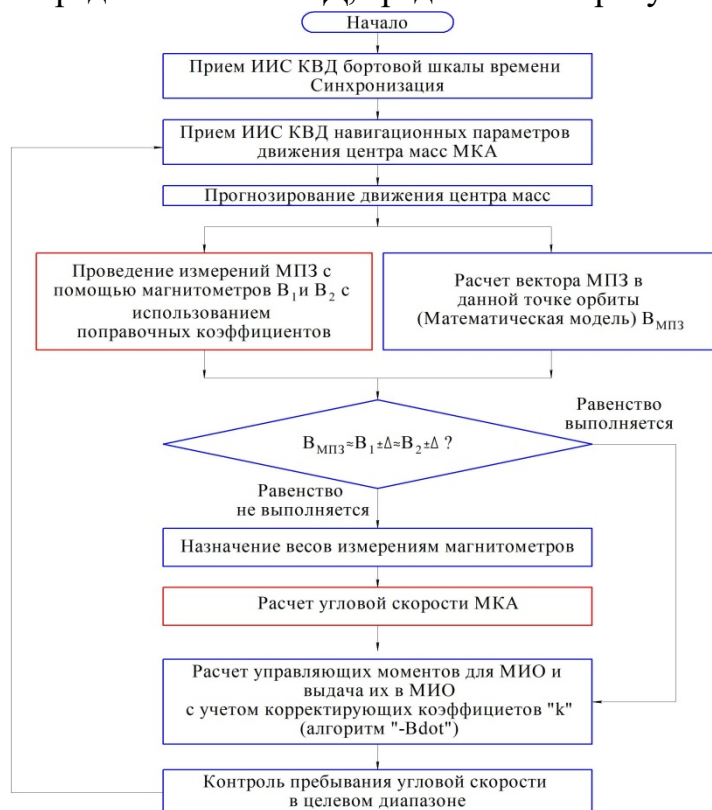


Рисунок 9 – Алгоритм непрерывного контроля угловой скорости МКА

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований разработанной ИИС КВД. Структура ИИС КВД была реализована в составе аппаратуры «КМУ-1», которая является ИИУС ориентации МКА «АИСТ-2Д», выведенного на орбиту в 2016г. В результате летно-космических испытаний ИИС КВД показала снижение погрешности оценки угловой скорости по сравнению с предшествующими аналогами.

Предлагаемая методика была реализована при проведении наземных испытаний МКА «АИСТ-2Д», а также запланировано её использование в рамках подготовки КА «Бион-М» №2. Определены поправочные коэффициенты, которые при использовании в полете МКА «АИСТ-2Д» позволили снизить погрешность измерений вектора индукции МПЗ.

Эффективность разработанной ИИС КВД была продемонстрирована при штатной эксплуатации в составе ИИУС МКА «АИСТ-2Д» в сравнении с МКА серии «Аист».

Оценка угловой скорости вращения МКА вокруг центра масс проводилась с помощью магнитометров путём прямых измерений вектора индукции МПЗ и последующей оценки компонентов вектора угловой скорости с помощью формулы Бура.

Оценим погрешность путём сравнения данных различных магнитометров АКПС.411173.012 разработки Самарского университета друг с другом и соотнесём её с погрешностью косвенных измерений угловой скорости. Сравнение разницы оценок магнитометров разных МКА приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение разницы оценок угловой скорости различных магнитометров

МКА	Дата	Инструментальная погрешность магнитометров, мкТл	Погрешность косвенных измерений, °/с	Разница оценок угловой скорости по компонентам, °/с		
				ω_x	ω_y	ω_z
Без применения методик и корректирующих коэффициентов						
ЛО «Аист»	27.05.13	0,5	0,04	0,48	0,63	0,46
ОО «Аист»	26.02.14	0,5	0,04	0,92	0,48	0,89
С применением методик и корректирующих коэффициентов						
«АИСТ–2Д»	30.06.16	0,5	0,04	0,25	0,2	0,15

Поскольку магнитометры МКА «АИСТ–2Д», ЛО и ОО МКА «Аист» были идентичными, то погрешность косвенных измерений компонентов вектора угловой скорости при инструментальной погрешности магнитометров $\pm 0,5$ мкТл приблизительно одинакова и оценивается 0,04 °/с. Разница оценок двух магнитометров в среднем составила 0,25 °/с; 0,20 °/с и 0,15 °/с по соответствующим компонентам вектора угловой скорости. Это существенно ниже, чем для ЛО и ОО МКА «Аист», что подтверждает эффективность разработанного ИИС КВД.

МКА «АИСТ–2Д» имеет полноценную систему ориентации и управления орбитальным движением. Поэтому в данном случае есть возможность сравнения оценок угловой скорости вращения МКА, полученных с помощью ИИС КВД и штатной измерительной аппаратурой системы управления – измерителей угловой скорости (ИУС), имеющих более высокий класс точности.

На рисунке 10 показаны результаты такого сравнения. Выделены участки стабилизации МКА и программных поворотов.

Разница оценок двух магнитометров с ИУС в среднем составила 0,17 °/с; 0,08 °/с; 0,18 °/с (магнитометр № 1) и 0,20 °/с; 0,18 °/с; 0,16 °/с (магнитометр № 2) по соответствующим компонентам вектора угловой скорости. Это существенно ниже, чем для ЛО и ОО МКА «Аист».

С другой стороны, сравнение абсолютных значений невязок оценок угловой скорости по данным двух магнитометров ИИС КВД с аналогичными значениями невязок оценок по данным ИУС показывает корректность оценки погрешности путём сравнения данных друг с другом.

Таким образом, разработанная ИИС КВД позволяет эффективнее контролировать пребывание значений угловой скорости в целевом диапазоне. Это снижает вероятность принятия неверного решения об использовании управления, что в совокупности с уменьшением погрешности измерений индукции МПЗ повышает эффективность обеспечения целевых значений угловой скорости вращения МКА.

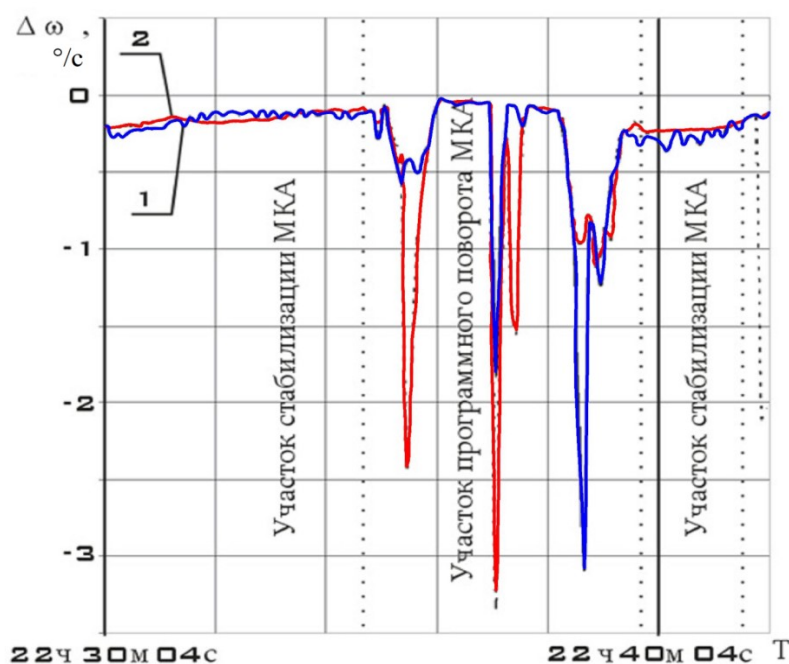


Рисунок 10 - Разность оценок компонентов (1 – магнитометр № 1; 2 – магнитометр № 2) по данным измерений от 26.02.2014

Далее оценим снижение вероятности принятия неверного решения об использовании управления. ИИС КВД производит оценку компонента вектора угловой скорости по рекуррентной формуле:

$$\omega_{ki+1} = \frac{\arccos(B_{ki+1}/|\vec{B}_{i+1}|) - \arccos(B_{ki}/|\vec{B}_i|)}{t_{i+1} - t_i},$$

где i и $i+1$ – два последовательных измерения; $k = x, y, z$.

Оценки показывают, что магнитные возмущения от БА могут втрое увеличивать погрешности измерения компонентов вектора индукции МПЗ. Поэтому примем:

$$dB_x = dB_{x+1} = dB_y = dB_{y+1} = dB_z = dB_{z+1} = 1,5 \text{ мкТл}$$

В этом случае для измерений $\vec{B}(B_x, B_y, B_z)$ от 02.09.2014 модуль погрешности оценки угловой скорости ОО МКА «Аист» составил:

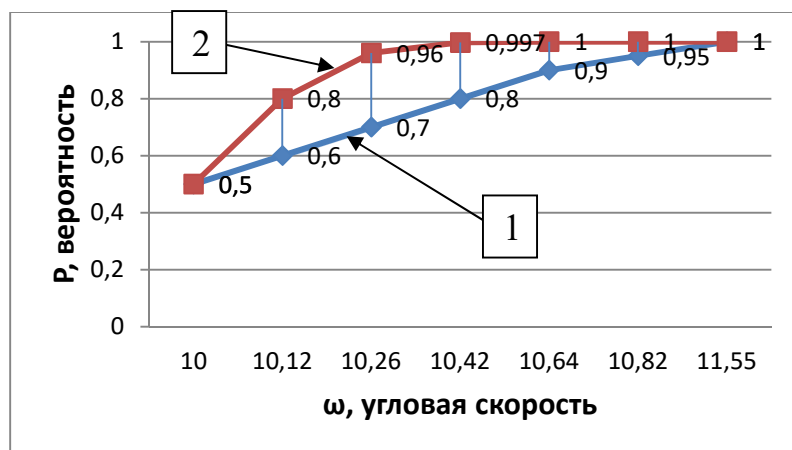
- 0,229598 °/с без учёта влияния целевой и обеспечивающей аппаратуры;
- 0,0765 °/с с учётом влияния целевой и обеспечивающей аппаратуры.

Согласно техническому заданию на аппаратуру «КМУ-1», целевой диапазон угловой скорости вращения должен составлять от 0 до 10 °/с. Считая погрешность ошибки измерения нормально распределённой случайной величиной с нулевым математическим ожиданием, получим оценку вероятности принятия верного решения об использовании управления при значениях угловой скорости, близкой к правой границе целевого диапазона (рисунок 11).

На основе оценки вероятности принятия верного решения относительно использования управления можно утверждать, что гарантированный управляющий сигнал на МИО при реальной погрешности $\pm 1,5 \text{ мкТл}$ поступит при значении $\omega_{кр} = 11,55 \text{ °/с}$, а при $\pm 0,5 \text{ мкТл}$ – при значении $\omega_{кр} = 10,64 \text{ °/с}$. Считая все значения

угловой скорости равновероятными, получим, что вероятности выхода за целевой диапазон будут 0,134 и 0,060 соответственно.

Следовательно, применение разработанной ИИС КВД в составе ИИУС ориентации на борту МКА «АИСТ-2Д» позволило уменьшить (до 20% по сравнению с МКА «Аист») погрешности определения угловой скорости МКА в полёте.



*Рисунок 11 – Вероятности принятия верного решения вблизи границы целевого диапазона значений угловой скорости вращения МКА:
1 – ИИС КВД, функционировавшая на ЛО и ОО МКА «Аист»;
2 – разработанная ИИС КВД*

Таким образом, в настоящей диссертационной работе получены положения, заключающиеся в разработке новой структуры; методике наземных испытаний; схеме функционирования ИИС КВД, включающей в себя алгоритм непрерывного контроля, и содержащие решение научной задачи контроля угловой скорости вращения МКА, имеющей важное значение для развития и широкого применения МКА в различных областях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Все задачи исследований, поставленные в диссертации выполнены.

Основные выводы и результаты, полученные в работе:

1. Проведен анализ алгоритмов и структур построения ИИС для контроля угловой скорости МКА. Выявлено, что магнитометры как средство измерения, применяемое в составе ИИС КВД, имеют ряд преимуществ. Показано, что основной причиной невысокой точности магнитометров является влияние на измерения собственных магнитных полей МКА. Для снижения влияния предложено применять корректирующие коэффициенты, величина которых определяется по результатам экспериментальной отработки ИИС КВД.

2. Для анализа влияния возмущений гравитационного, магнитного, аэродинамического характера на угловую скорость вращательного движения МКА разработана функционально-ориентированная на применение в ИИС КВД математическая модель вращения МКА. Предложено использование алгоритма непрерывного контроля угловой скорости МКА.

3. Применительно к МКА в обеспечение применения корректирующих коэффициентов и алгоритма непрерывного контроля на бортовых вычислительных средствах разработана структура ИИС КВД, позволяющая контролировать угловую скорость МКА без применения высокоточных и дорогостоящих систем ориентации и управления движением.

4. Для определения основных источников магнитных возмущений на борту МКА, а также формирования поправочных коэффициентов, предложена методика наземных испытаний ИИС КВД. Применение данной методики позволяет снизить погрешности измерений вектора индукции МПЗ магнитометрами, связанные с влиянием магнитных возмущений от работы БА. Для аппаратуры «КМУ-1», функционирующей в составе МКА «АИСТ-2Д», удалось снизить погрешность определения индукции МПЗ на 0,9 мкТл – с $\pm 1,5$ мкТл до $\pm 0,6$ мкТл.

5. С целью учета составляющих внутренних и внешних возмущений магнитных полей, не выявленных при наземных испытаниях и влияющих на измерения магнитометров, разработана методика летных испытаний ИИС КВД. Методика включает в себя новый алгоритм непрерывного контроля для повышения эффективности контроля угловой скорости МКА.

6. Проведены экспериментальные исследования разработанной ИИС КВД при наземных и летных испытаниях в составе реального МКА.

7. Проведена количественная оценка повышения эффективности контроля угловой скорости средствами разработанной ИИС КВД при летных испытаниях МКА «АИСТ-2Д». За счет введения поправочных коэффициентов и применения алгоритма непрерывного контроля обеспечено снижение погрешности определения угловой скорости с 0,2 °/с до 0,04 °/с. Сокращение вероятности выхода угловой скорости за целевой диапазон понижена с 13% до 6%.

Таким образом, достигнута цель работы и полностью решены все поставленные в ней задачи.

Публикации по теме диссертации

В журналах из перечня ВАК:

1. Седельников, А.В. Проблемы обработки данных магнитного поля земли средствами измерений научной аппаратуры «МАГКОМ» / А.В. Седельников, **А.С. Филиппов**, А.С. Горожанкина // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.–2017.– № 7.–С. 33–40.
2. Белоусов, А.И. Анализ вращательного движения малых космических аппаратов серии «Аист» / А.И. Белоусов, Н.Д. Сёмкин, А.В. Седельников, К.Е. Воронов, А.В. Пияков, **А.С. Филиппов**, Ю.Я. Пузин // Авиакосмическое приборостроение. – 2017. – № 8. – С. 3 – 10.
3. Седельников, А.В. Тест проверки корректности работы магнитометров на лётном образце МКА «Аист» / А.В. Седельников, Ю.Я. Пузин, **А.С. Филиппов** и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. – № 2. – С. 34 – 39.
4. **Филиппов, А.С.** Разработка эффективной методики наземных испытаний датчиков магнитометров научной аппаратуры «МАГКОМ» на малых космических аппаратах типа «Аист» / **А.С. Филиппов** // Авиакосмическое приборостроение. – 2018. – № 3. – С. 37 – 47.
5. Седельников, А.В. Программно-аппаратное средство контроля параметров вращательного движения малого космического аппарата / А.В. Седельников, **А.С. Филиппов**, Ю.Я. Пузин, К.Е. Воронов, А.В. Пияков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2018. – № 10. – С. 1 – 9.

6. **Филиппов, А.С.** Информационно-измерительная и управляющая система эффективного контроля угловой скорости вращения малого космического аппарата/ **А.С. Филиппов** // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2019. – № 6. – С. 23 – 30.

7. Седельников, А.В. Использование лингвистических переменных для анализа влияния бортовой аппаратуры на средства измерений вектора индукции магнитного поля Земли / А.В. Седельников, Д.П. Малявко, **А.С. Филиппов** и др.// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. - №1. – С.6 – 14.

В журналах из наукометрических баз Web of Science и Scopus:

8. Abrashkin, V.I. Uncontrolled attitude motion of the small satellite AIST / V.I. Abrashkin, Y.Y. Puzin, **A.S. Filippov**, K.E. Voronov, A.V. Piyakov, N.D. Semkin, V.V. Sazonov, S.Y. Chebukov // Cosmic Research. – 2015. – Т. 53. – № 5. – С. 360 – 373.

9. Abrashkin, V.I. Uncontrolled rotational motion of the aist small spacecraft prototype / V.I. Abrashkin, Y.Y. Puzin, **A.S. Filippov**, K.E. Voronov, A.V. Piyakov, N.D. Semkin, V.V. Sazonov, S.Y. Chebukov // Cosmic Research. – 2017. – Т. 55. – № 2. – С. 128 – 141.

10. Sedelnikov, A.V. Approach towards Establishing a Backup Satellite Attitude Control System Based on the Photovoltaic Array / A.V. Sedelnikov, S.L. Safronov, **A.S. Filippov**, E.K. Savich // MATEC Web Conf. – 2018. – Vol. 220. – <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822008005>.

11. Sedelnikov, A.V. Evaluation of calibration accuracy of magnetometer sensors of Aist small spacecraft / A.V. Sedelnikov, **A.S. Filippov**, A.S. Gorozhankina // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 1015. Issue 3. – doi :10.1088/1742-6596/1015/3/032045.

12. Sedelnikov, A.V. Earth's magnetic field measurements data accuracy evaluation on board of the small spacecraft AIST flight model / Sedelnikov A.V., Filippov A.S., Ivashova T.A. // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. – 2018. - Vol. 12. - №4. – P. 253-260.

13. Abrashkin, V.I. Detection of the Rotational Motion of the AIST-2D Small Spacecraft by Magnetic Measurements / V.I. Abrashkin, K. E. Voronov, A.S. Dorofeev, A.V. Piyakov, Yu. Ya. Puzin, V.V. Sazonov, N.D. Semkin, **A.S. Filippov**, S. Yu. Chebukov // Cosmic Research. – 2019. – Т. 57. – № 1. – С. 1 – 13.

14. Sedelnikov, A.V. Measurements Analysis of the Earth's Magnetic Field Data Obtained from the Flight Model of AIST Small Spacecraft / A.V. Sedelnikov, E.S. Khnyryova, **A.S. Filippov**, T.A. Ivashova // International Journal of Mechanical Engineering and Robotic Research. – 2019. – Vol. 8. – № 4. – P. 542 – 546.

15. Sedelnikov, A.V. Test results analysis of soft hardware for evaluating the parameters of the rotational motion of a small spacecraft / A.V. Sedelnikov, **A.S. Filippov**, E.S. Khnyryova // 2020 International multi-conference on industrial engineering and modern technologies, FarEastCon 2020. – Vladivostok, 2020. – 9271168.

В других изданиях:

16. Абрашкин, В.И. Определение вращательного движения спутника АИСТ по данным бортовых измерений магнитного поля Земли / В.И. Абрашкин, К.Е. Воронов, А.В. Пияков, Ю.Я. Пузин, В.В. Сазонов, Н.Д. Сёмкин, **А.С. Филиппов**, С.Ю. Чебуков // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2014. – № 17. – С. 1 – 38.

17. Абрашкин, В.И. Реконструкция фактического вращательного движения ИСЗ по измерениям бортовых датчиков / В.И. Абрашкин, К.Е. Воронов, И.В. Пияков, Ю.Я.

Пузин, В.В. Сазонов, **А.С. Филиппов** // В сборнике: XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики сборник докладов. Составители: Д.Ю. Ахметов, А.Н. Герасимов, Ш.М. Хайдаров; ответственные редакторы: Д.А. Губайдуллин, А.И. Елизаров, Е.К. Липачев. – 2015. – С. 49 – 52.

18. Абрашкин, В.И. Неуправляемое вращательное движение малого спутника АИСТ / В.И. Абрашкин, К.Е. Воронов, А.В. Пияков, Ю.Я. Пузин, В.В. Сазонов, Н.Д. Сёмкин, **А.С. Филиппов**, С.Ю. Чебуков // Космические исследования. – 2015. – Т. 53. – № 5. – С. 395 – 408.

19. Горожанкина, А.С. О принципе контроля микроускорений на малом космическом аппарате / А.С. Горожанкина, **А.С. Филиппов**, А.В. Седельников // В сборнике: XIV КОРОЛЁВСКИЕ ЧТЕНИЯ международная молодежная научная конференция, посвящённая 110-летию со дня рождения академика С. П. Королёва, 75-летию КуАИ-СГАУ-СамГУ-Самарского университета и 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника Земли: в 2 томах. – 2017. – С. 20.

20. Абрашкин, В.И. Неуправляемое вращательное движение опытного образца малого космического аппарата АИСТ / В.И. Абрашкин, К.Е. Воронов, А.В. Пияков, Ю.Я. Пузин, В.В. Сазонов, Н.Д. Сёмкин, **А.С. Филиппов**, С.Ю. Чебуков // Космические исследования. – 2017. – Т. 55. – № 2. – С. 135 – 149.

21. Абрашкин, В.И. Определение вращательного движения малого космического аппарата "АИСТ-2Д" по данным научной аппаратуры КМУ-1 / В.И. Абрашкин, К.Е. Воронов, А.В. Пияков, А.С. Дорофеев, Ю.Я. Пузин, В.В. Сазонов, Н.Д. Семкин, **А.С. Филиппов**, С.Ю. Чебуков // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2017. – № 57. – С. 1 – 37.

22. Седельников, А. В. Методика летной эксплуатации программно-аппаратных средств контроля параметров вращательного движения малых космических аппаратов серии «Аист» / А.В. Седельников, Ю.Я. Пузин, **А.С. Филиппов** // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. – 2018. – Т.2. – № 3. – С. 35 – 43.

23. Седельников, А.В. Оценка эффективности программно-аппаратного средства обеспечения и контроля угловой скорости вращения малого космического аппарата / А.В. Седельников, Ю.Я. Пузин, **А.С. Филиппов**, Е.С. Хнырева // Вестник МАИ. – 2018. – Т. 25. – № 4. – С. 152 – 162.

24. Абрашкин, В.И. Определение вращательного движения малого космического аппарата АИСТ-2Д по данным магнитных измерений / В.И. Абрашкин, К.Е. Воронов, А.С. Дорофеев, А.В. Пияков, Ю.Я. Пузин, В.В. Сазонов, **А.С. Филиппов**, С.Ю. Чебуков // Космические исследования. – 2019. – Т. 57. – № 1. – С. 1–13.

Объекты интеллектуальной собственности

25. Пат. 2692741 С1 Российская Федерация, МПК В64G 1/32 (2019.02). Устройство контроля параметров углового движения космического аппарата по данным бортовых измерений состояния геомагнитного поля / **Филиппов А.С.**, Воронов К.Е., Дорофеев А.С., Ивашова Т.А. и др.; заявитель и правообладатель Самарский Университет. – № 2018122367; заявл. 18.06.2018; опубл. 26.06.2019, Бюл.№18.

Формат 60x84 1/16. Уч.изд.л. 1,0. Тираж 60 экз. Заказ №
Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета, 443100, г.
Самара, ул. Молодогвардейская, 244, корпус 8.
e-mail: polygraph@samgtu.ru.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.04
(Д 212.217.07) ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол №4 от 20.09.2021 г.)