



**Минобрнауки России**  
**Федеральное государственное учреждение**  
**«Федеральный исследовательский центр**  
**Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша**  
**Российской академии наук»**  
**(ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)**

125047, Москва, Миусская пл., 4 Тел. 8 (499) 220-72-33 Факс 8 (499) 972-07-37

<http://keldysh.ru> e-mail: [office@keldysh.ru](mailto:office@keldysh.ru)

ОКПО 02699381 ОГРН 1037739115787 ИНН/КПП 7710063939/771001001

13.05.2025 № 11103-9422/425

На № \_\_\_\_\_

Председателю диссертационного  
совета 24.1.075.02 на базе  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института машиноведения имени  
А.А. Благоднарова Российской  
академии наук (ИМАШ РАН),  
академику РАН, д.т.н., профессору  
Ганиеву Р.Ф.

119334, г. Москва, ул. Бардина, 4.

Уважаемый Ривнер Фазылович!

Направляю отзыв официального оппонента на диссертацию Игнатова Александра Ивановича на тему: «Динамика и управление угловым движением космического аппарата, предназначенного для проведения длительных научных экспериментов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.7 Теоретическая механика, динамика машин (технические науки).

Главный научный сотрудник  
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,  
д.ф.-м.н., профессор

 Овчинников М. Ю.

Подпись Овчинникова Михаила Юрьевича заверяю.

Ученый секретарь  
ИПМ им М.В. Келдыша РАН,  
кандидат физ.-мат. наук

 Давыдов А.А.

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

доктора физико-математических наук, профессора **Овчинникова Михаила Юрьевича** на диссертационную работу **Игнатова Александра Ивановича** на тему: «**Динамика и управление угловым движением космического аппарата, предназначенного для проведения длительных научных экспериментов**», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.7 Теоретическая механика, динамика машин (технические науки).

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

С самого начала эры практической космонавтики и до текущего момента времени, тема, связанная с проведением научных экспериментов в космосе, не теряет своей актуальности. Это связано с уникальными условиями их проведения – это космический вакуум, микрогравитация, наличие разного вида излучений. Возможность реализации научных и технологических исследований широкого спектра в космосе необходима для дальнейшего развития многих областей науки и отраслей промышленности.

В настоящее время большинство экспериментов на околоземной орбите осуществляется на борту Международной космической станции (МКС), одним из основных предназначений которой было обеспечение оптимальных условий для их проведения. Однако, по мере увеличения размера и объема станции, условия для проведения ряда исследований на ее борту значительно ухудшились. В частности, на результаты экспериментов в условиях микрогравитации значительное влияние оказывают возмущающие ускорения в широком спектре частот, вызванные упругими колебаниями конструкции, удаленностью точки проведения от центра масс МКС, воздействием сопротивления атмосферы, перемещениями экипажа.

В связи с вышесказанным представляется целесообразным создание специального космического аппарата (КА) - автономного орбитального модуля на основе одного из модулей разрабатываемых в настоящее время в ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева» для Российской орбитальной станции. Конструкция и режимы функционирования такого КА будут учитывать все необходимые условия



для проведения самого широкого спектра космических экспериментов. Принципиальная особенность его функционирования должна состоять в возможности отделения от основной станции на длительный срок для обеспечения необходимых условий проведения исследований с последующей обратной стыковкой для получения материалов, использовавшихся в экспериментах, обслуживании научного оборудования.

Целью диссертационной работы Игнатова А.И. является решение научной проблемы, состоящей в разработке и исследовании комплекса режимов углового движения КА, обеспечивающих на борту необходимые условия для проведения длительных научных экспериментов широкого спектра на околоземной орбите. Эти режимы могут быть использованы как на упомянутом выше модуле, так и на иных целевых аппаратах.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены задачи:

1. Разработка и исследование законов управления угловым движением КА.
2. Прогнозирование условий проведения экспериментов на борту КА.
3. Исследование установившегося углового движения КА с целью выбора параметров законов управления, обеспечивающих заданные характеристики движения.
4. Выбор используемых исполнительных органов системы управления угловым движением КА, а также анализ их динамических возможностей.

Решение вышеуказанных задач создает теоретическую и практическую основы для создания системы управления угловым движением КА, предназначенного для проведения длительных научных экспериментов. Достижение данной цели определяет актуальность рецензируемой работы. Таким образом, диссертация Игнатова А.И. представляется актуальной с точки зрения научной и практической значимости.

### **Структура и объем работы**

Диссертация Игнатова А.И. состоит из 300 страниц машинописного текста, трех таблиц и 126 рисунков. Она включает в себя введение, шесть глав, заключение, список литературы, а также одно приложение с копиями актов о внедрении результатов диссертационной работы.

**Во введении** приведена общая характеристика работы. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, рассмотрены основные достижения в области управления угловым движением космических аппаратов и обеспечения приемлемых условий проведения научных исследований на околоземной орбите. Обоснованы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Приведены сведения о достоверности, апробации работы и публикациях. Формулируются положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** является вспомогательной - в ней определены используемые системы координат, приведены уравнения движения КА, а также начальные параметры орбит и значения массово-инерционных характеристик, используемые в дальнейшем при численном моделировании движения КА. Рассмотрены модели действующих на КА внешних моментов. Приведен вывод формулы для расчета микроускорений, а также описана схема проведения спектрального анализа данных, используемых в диссертации.

**Вторая глава** посвящена описанию и обоснованию методики исследования установившегося ориентированного движения КА. Эффективность методики демонстрируется на примере исследования углового движения осесимметричного КА с постоянным магнитом под действием магнитного поля Земли (МПЗ). В качестве модели МПЗ используется модель IGRF, описание которой приводится в первой главе. Основная методологическая идея главы – аппроксимация ориентированного движения набором полученных для упрощенных систем периодических движений, для которых известны эффективные методы анализа.

**В третьей главе** предложена методика оценки и прогноза уровня микроускорений на борту КА. Прогноз проводится в точке, максимальной удаленной от его центра масс, но в пределах внутреннего рабочего отсека КА, и сводится к вычислению интеграла по времени от квадрата угловой скорости, выбираемого в качестве минимизируемого функционала. При этом учитываются параметры орбиты и режима углового движения КА. В диссертации рассматриваются только низкочастотные микроускорения. В заключении третьей



главы приводится численная оценка минимального уровня микроускорений, полученная в результате математического моделирования уравнений движения КА.

**В четвертой главе** диссертации рассматриваются два варианта поддержания режима орбитальной ориентации КА – с помощью гиросистемы и с помощью электромагнитных исполнительных органов системы управления. При этом на борту КА обеспечивается уровень микроускорений весьма близкий к минимальному, оценка которого была получена в главе 3. С помощью методики, предложенной в главе 2, проведено исследование углового движения КА с целью выбора параметров законов управления при использовании электромагнитных исполнительных органов.

**В пятой главе** рассматривается режим поддержания солнечной ориентации КА с помощью гироскопических или электромагнитных исполнительных органов. Панели солнечных батарей установлены неподвижно относительно корпуса КА. Применяется методика, предложенная во второй главе, для проведения исследования углового движения КА с целью выбора параметров законов управления при использовании электромагнитных исполнительных органов.

**В шестой главе** исследования описана методика обоснованного выбора геометрических параметров и физических характеристик гироскопических органов управления для реализации предложенных в главах 4 и 5 режимов углового движения КА. Фактически это - трансформация фундаментальных результатов в инженерную реализацию гироскопических органов управления.

**Научная новизна работы** обусловлена спецификой требований, предъявляемых к управляемым движениям КА и условиям на его борту. В диссертации автором получены новые научные результаты, к которым относится:

1. Методика численного параметрического исследования устойчивости установившегося движения КА, центр масс которого движется по близкой к круговой околоземной орбите, для выбора параметров законов управления, обеспечивающих заданные характеристики движения.
2. Методика прогнозирования и оценки уровня микроускорений в зоне рабочих отсеков на борту КА при заданном режиме углового движения КА на основе спектрального анализа.

3. Методика снижения возмущающего действия динамических маневров КА на уровень микроускорений.
4. Методика выбора геометрических параметров и физических характеристик гироскопических органов управления, установленных на борту КА.

### **Достоверность результатов работы**

Достоверность полученных в диссертации результатов и положений подтверждается логическими рассуждениями, методологией исследования и совокупностью используемых методов и подходов теоретической механики – от аналитических выкладок до моделирования с применением численных методов. Результаты хорошо согласуются с результатами теоретических исследований, полученных другими специалистами в соответствующей области знаний, апробированы на авторитетных научных форумах, прошли рецензирование специалистами и опубликованы в высокорейтинговых печатных изданиях.

### **Теоретическая и практическая ценность результатов диссертации**

К основным практическим результатам, полученным в диссертации следует отнести:

1. Методику численного параметрического исследования установившихся режимов угловых движений КА, близких к периодическим, которая позволяет эффективно выбирать на основе классических методов исследования периодических движений необходимые значения параметров используемых законов управления.
2. Методику прогнозирования уровня микроускорений на борту КА, что позволяет на всех этапах конструирования алгоритмов управления маховиками и магнитными актюаторами контролировать уровень микрогравитационных ускорений.
3. Законы управления режимом орбитальной ориентации КА, реализуемым с помощью гиросистемы. Предложенные в диссертации законы управления помимо поддержания заданной ориентации КА ограничивают накопление собственного кинетического момента гиросистемы.
4. Закон управления режимом солнечной ориентации КА, реализуемым с помощью гиросистемы, но с функциональным ограничением – жесткое закрепление солнечных батарей относительно корпуса КА.
5. Режим солнечной ориентации КА, реализуемый системой магнитных



исполнительных органов при наличии постоянного гиросtatического момента.

6. Методику выбора геометрических параметров схемы расположения и физических характеристик двигателей-маховиков, обеспечивающих реализацию предложенных режимов углового движения КА.

7. Разработанный способ расчета и построения особых поверхностей систем гироскопов, основанным на методе продолжения по параметру.

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Результаты диссертационной работы были использованы при создании изделий ракетно-космической техники (КА и разгонных блоков) на профильных предприятиях отрасли - АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева» и частной компании ООО «Спутникс», о чем свидетельствуют полученные автором акты внедрения.

Полученные результаты диссертационной работы легли в основу дисциплины «Математическое моделирование систем гироскопических и электромагнитных органов управления угловым движением КА», которая читается автором студентам кафедры «Теоретическая механика» имени профессора Н.Е. Жуковского МГТУ имени Н.Э. Баумана по направлению подготовки «Механика и математическое моделирование». По результатам диссертационной работы в учебный процесс подготовки студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана внедрены программы для ЭВМ, созданные автором. Всего Игнатовым А.И. получено 6 актов о внедрении результатов диссертации.

### **Замечания к диссертационной работе и автореферату**

1. Стр.18 – О каком знаке вектора  $\dot{\mathbf{K}}$  идет речь, если минимизируется квадрат его модуля?
2. Стр.46 – Не учитывается в модели упругость панелей солнечных батарей, микроускорения от деформации которых, обсуждались в тексте.
3. Стр.58 – Отсутствуют обоснование корректности аппроксимации квазипериодических решений набором периодических решений и оценка точности такой аппроксимации.
4. Стр.63 – утверждается, что в рамках модели МПЗ прямого диполя при изменении  $\Omega_G$  резонансов не возникает. Однако резонансы возникают не

при изменении параметра, их причина в близости собственных частот и частот изменения внешнего магнитного момента. Выбрав магнитный параметр КА ( $l_0$  в обозначениях автора) вблизи бифуркационной кривой, резонанс обнаружится и в рамках модели прямого диполя (см.[11]).

5. Стр.153 – При переходе от (4.27) к (4.28) отброшено слагаемое, отражающее ограничение в реализации магнитного управления – невозможность создания механического момента вдоль вектора **В**, что превратило управление в вязкое трение. Тогда при чем здесь магнитное управление?
6. Стр.176 – Исчез управляющий гироскопический момент **Н** при переходе от (5.1) к (5.3).
7. В диссертационной работе имеются неprinципиальные опечатки (стр. 19, 43, 65, 125, 127, 277).

Отмеченные недостатки не снижают общего положительного впечатления от работы и не ставят под сомнение полученные результаты.

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

Диссертация Игнатова Александра Ивановича «Динамика и управление угловым движением космического аппарата, предназначенного для проведения длительных научных экспериментов» 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 - создать систему ориентации и стабилизации перспективного КА, предназначенного для проведения широкого спектра длительных научных исследований на околоземной орбите.

Тема исследования соответствует паспорту специальности 1.1.7 Теоретическая механика, динамика машин (технические науки), в частности, пунктам 2, 5, 6, 8, 10, 14 паспорта специальности.

Автореферат соответствует п. 25 «Положения о присуждении ученых



степеней» и полностью отражает содержание диссертации.

Основные научные результаты и выводы работы полностью отражены в 17 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Диссертация Игнатова А.И. является завершенной научной работой, обладающей внутренним единством, содержит новые научные положения и результаты, имеющие важное значение для развития ракетно-космической техники страны и свидетельствующие о крупном вкладе автора в науку.

Диссертация Игнатова А.И. «Динамика и управление угловым движением космического аппарата, предназначенного для проведения длительных научных экспериментов» удовлетворяет требованиям пунктов 9 - 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в редакции от 16.10.2024 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Автор диссертационной работы Игнатов А.И. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика и динамика машин (технические науки).

#### **Официальный оппонент:**

Главный научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), доктор физико-математических наук, профессор



Овчинников Михаил Юрьевич

«13» мая 2025 г.

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

Подпись Овчинникова Михаила Юрьевича заверяю.

Ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, кандидат физ.-мат. наук



Давыдов Александр Александрович

«13» мая 2025 г.