



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ КОРПОРАЦИЯ
«ЭНЕРГИЯ» ИМЕНИ С.П. КОРОЛЁВА»
(ПАО «РКК «ЭНЕРГИЯ»)

Ленина ул., д. 4А, г. Королёв, МО, 141070
Тел. +7 (495) 513-86-55, факс +7 (495) 513-86-20
e-mail: post@rsce.ru; http://www.energia.ru
ОКПО 07530238; ОГРН 1025002032538
ИНН/КПП 5018033937/997450001

_____ № _____

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор -

заместитель генерального

директора ПАО «РКК «Энергия»,

академик РАН, д.т.н., профессор



/В.А. Соловьев/

« 09 » апреля 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» 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. Уникальные условия космического пространства, несмотря на ряд сложностей существования в нем для человеческого организма и различных технических систем, предоставляют, вместе с тем, множество возможностей, недоступных на поверхности Земли. В частности, отсутствие атмосферы и космический вакуум открывают возможность детального исследования других космических объектов. Различного рода космические излучения до их поглощения атмосферой позволяют приоткрыть тайны возникновения Вселенной. Одним из уникальных явлений, длительное существование которого невозможно получить на поверхности Земли, является

микрогравитация. В связи с этим, одной из задач практической космонавтики является исследование и использование этих уникальных космических условий. В указанных целях, еще со времен первых космических миссий, планируются и проводятся различные научные космические эксперименты. Опыт, полученный в ходе их проведения, обобщается и масштабируется, что неизбежно приводит к развитию различных отраслей науки и промышленности. В связи с этим, заявленная тема диссертации является актуальной

Огромным толчком к возможности проведения космических экспериментов явилось появление орбитальных станций. Постоянное присутствие человека в космосе позволяет оперативно планировать и проводить одновременно множество экспериментов в различных областях науки: медицины, материаловедения, астрофизики, наблюдения Земли из космоса и т.д. Международная космическая станция (МКС) в настоящее время является уникальной космической лабораторией, обеспечивающей оптимальные условия для проведения научных исследований в различных областях. Однако, в связи с достаточно большими размерами станции и месторасположением российского сегмента, проводить исследования, связанные с использованием микрогравитации на его борту, затруднительно. Это обусловлено тем, что на результаты таких экспериментов значительное влияние будут оказывать возмущающие ускорения в широком спектре частот, вызванные упругими колебаниями конструкции, удаленностью российского сегмента станции от центра масс МКС и другими факторами.

Наиболее целесообразным представляется создание специализированных космических аппаратов (КА), предназначенных для исследования и практического использования условий микрогравитации. Таким КА может быть, как некий отдельный аппарат, так и аппарат, основное время существования летающий автономно, но при этом периодически стыкующийся с орбитальной станцией (типа автономного орбитального модуля). Стыковка осуществляется в целях пополнения запасов топлива, загрузки материалов, необходимых для проведения таких экспериментов, перемещения на борт станции их результатов и обслуживания различного оборудования. В частности, существует проект такого модуля в рамках разрабатываемой в настоящее время в ПАО «РКК «Энергия» Российской

орбитальной станции. Одним из преимуществ этого подхода служит то, что конструкция и режимы функционирования такого КА будут учитывать все необходимые условия для проведения самого широкого спектра космических экспериментов.

Ввиду необходимости длительного автономного полета такого КА большую практическую и научную ценность представляет заявленная в диссертационной работе Игнатова А.И. цель: 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.

Поставленная цель подразумевает разработку и исследование законов управления угловым движением КА, прогнозирование условий проведения экспериментов на борту КА, исследование установившегося углового движения КА с целью выбора параметров законов управления, обеспечивающих заданные характеристики движения, а также обоснованный выбор исполнительных органов системы управления угловым движением КА.

Необходимо отметить, что решение заявленных в диссертации задач, позволит использовать эти наработки при проектировании и разработке системы управления угловым движением КА, предназначенного для проведения длительных научных экспериментов. Все вышеперечисленное определяет актуальность диссертационной работы Игнатова А.И. как с точки зрения научной ценности так 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, который состоит из 172 наименований, а также одно приложение с копиями шести актов о внедрении результатов диссертационной работы.

Во введении приведена общая характеристика работы. Обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, приведен обзор основных достижений в области управления угловым движением

космических аппаратов и обеспечения приемлемого уровня микроускорений в процессе проведения экспериментов на орбите Земли. Обосновываются научная новизна и практическая значимость работы. Приведены сведения о достоверности, об апробации работы и публикациях. Завершается введение результатами, выносимыми на защиту.

Первая глава является вспомогательной, в ней вводятся используемые системы координат, уравнения движения КА, а также начальные параметры орбит и значения массово-инерционных характеристик, используемые при численном моделировании движения КА. Рассмотрены модели магнитного поля Земли (МПЗ) и действующих на КА внешних моментов. Вводится понятие микроускорений. Приведен вывод формулы для расчета микроускорений, а также описана схема проведения спектрального анализа данных, используемых в данной диссертационной работе.

Во второй главе предлагается методика исследования установившегося ориентированного движения КА. В качестве примера использования такой методики рассматривается хорошо известная задача исследования углового движения осесимметричного КА с постоянным магнитом под действием механического момента, создаваемого влиянием на магнит магнитного поля Земли (МПЗ). В качестве модели МПЗ используется модель IGRF (разложение геомагнитного потенциала в ряд по шаровым функциям), описание которой приводится в первой главе.

В третьей главе предложена методика оценки и прогноза минимального уровня микроускорений на борту КА. Прогноз проводится с учетом конкретной орбиты и режима углового движения КА для заданной точки борта. Положение исследуемой точки выбирается в пределах внутреннего рабочего отсека КА на максимальном удалении от центра масс КА. Следует уточнить, что в диссертации речь идет только о квазистатических (низкочастотных) микроускорениях, поскольку именно их влияние оказывается наиболее чувствительным для проведения ряда экспериментов на околоземной орбите.

В четвертой главе диссертации рассматривается поддержание достаточно точной орбитальной ориентации КА с уровнем микроускорений, сопоставимым с

минимальным значением, полученным в главе 3. Рассматриваются два варианта реализации поддержания орбитальной ориентации КА – с помощью гиросистемы или с помощью электромагнитных исполнительных органов системы управления. С помощью методики, предложенной в главе 2, проведено исследование установившегося углового движения КА с целью выбора параметров законов управления при использовании электромагнитных исполнительных органов.

В пятой главе исследовано поддержание в течение длительного времени режима солнечной ориентации КА на низкой околоземной орбите с помощью гиросистемы или с помощью электромагнитных исполнительных органов при наличии постоянного гиросtatического момента. Дополнительным функциональным ограничением, накладываемым на управление КА, является наличие неповоротных панелей солнечных батарей, закрепленных на корпусе КА. Для выбора параметров законов управления было проведено исследование установившегося углового движения КА. Ввиду того что предлагается, в том числе, использовать электромагнитные исполнительные органы, исследование углового движения проводилось с использованием методики из главы 2.

В шестой главе диссертации предложена методика выбора геометрических параметров схемы расположения и физических характеристик гироскопических органов управления (двигателей-маховиков или гиродинов), обеспечивающих реализацию предложенных в главах 4 и 5 режимов углового движения КА.

Научная новизна работы определяется следующими полученными в ней новыми научными результатами:

1. Новой методикой прогнозирования и оценки уровня микроускорений на борту КА в зависимости от начальных параметров целевой орбиты и реализуемого режима углового движения КА.
2. Новой методикой численного параметрического исследования устойчивости установившегося ориентированного движения КА, центр масс которого движется по околоземной орбите, близкой к круговой. Указанная методика позволила выявить существование ранее неизвестных резонансных эффектов между вращением вектора индукции МПЗ вдоль орбиты и колебаниями продольной оси

симметрии КА относительно этого вектора при управлении движением КА с использованием магнитной системы ориентации.

3. Новыми разработанными законами управления угловым движением КА при наличии функциональных ограничений и в течение длительных интервалов времени.

4. Новой методикой выбора параметров схем расположения и характеристик гироскопических органов системы управления КА, обеспечивающих реализацию предложенных законов управления различными режимами углового движения КА.

Достоверность результатов работы подтверждается соответствием результатов теоретических исследований, численного моделирования, а также сравнением с результатами, опубликованными другими авторами по схожим проблемам.

Практическая значимость работы определяется:

1. Разработанной методикой численного параметрического исследования устойчивости установившихся режимов угловых движений КА, близких к периодическим, основанная на аппроксимации таких движений последовательностью периодических решений модифицированных уравнений движения. Указанная методика позволяет эффективно выбирать необходимые значения параметров используемых законов управления угловым движением КА.

2. Разработанной методикой прогнозирования и оценки минимального уровня микроускорений в заданной точке борта для режима орбитальной ориентации КА. С помощью разработанной методики получены оценки уровня микроускорений для КА в режиме его орбитальной ориентации близкой к гравитационно устойчивой.

3. Построенными законами управления режимом орбитальной ориентации КА реализуемыми с помощью системы гироскопических исполнительных органов. Построенные законы помимо поддержания заданной ориентации КА ограничивают накопление собственного кинетического момента гиросистемы. Предложена численно-аналитическая методика выбора параметров законов

управления.

4. Построенным законом управления режимом солнечной ориентации КА, реализуемым с помощью системы гироскопических исполнительных органов в условиях ограничения накопления гиросtatического момента и отсутствия возможности изменения положения солнечных батарей относительно корпуса КА. Такой закон управления позволяет не только поддерживать солнечную ориентацию КА на длительных интервалах времени, но и проводить разгрузку накопленного кинетического момента гиросистемы.

5. Разработанным режимом солнечной ориентации КА, реализуемым системой магнитных исполнительных органов при наличии постоянного гиросtatического момента и отсутствии возможности изменения положения солнечных батарей относительно корпуса КА.

6. Разработанной методикой выбора геометрических параметров схемы расположения и физических характеристик двигателей-маховиков, обеспечивающих реализацию предложенных режимов углового движения КА. Получены аналитические зависимости для выбора геометрических параметров системы двигателей-маховиков, расположенных по схеме «четырехугольная пирамида» при реализации режима программных разворотов КА, а также для поддержания орбитальной и солнечной ориентации КА.

7. Предложенным и обоснованным способом расчета и построения особых поверхностей систем гиродинов, основанным на методе продолжения по параметру. Реализован соответствующий программно-математический комплекс, используемый при выборе геометрических параметров схемы расположения гиродинов.

Реализация и внедрение результатов работы.

Результаты проведенных в диссертации исследований использовались на этапах эскизного проектирования при разработке систем ориентации различных КА и разгонных блоков, как уже созданных, так и вновь создаваемых в АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева» и в ООО «Спутникс».

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». В учебный процесс подготовки студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках дисциплин «Математическое моделирование систем гироскопических и электромагнитных органов управления угловым движением КА» и «Электромеханические исполнительные органы систем управления КА» внедрены программы для ЭВМ созданные автором по результатам диссертации. Внедрение полученных Игнатовым А.И. результатов подтверждается 6 актами.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Результаты диссертационной работы Игнатова А.И. используются при разработке КА в АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», ООО «Спутникс» и, в том числе могут быть использованы в ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королева» при разработке системы управления модулей Российской космической станции. Полученные в диссертации результаты также рекомендуются к применению во всех организациях, занимающихся разработкой КА и разгонных блоков, таких как АО «РКЦ «Прогресс», АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева, АО «НПО Лавочкина», АО «ВПК «НПО машиностроения» и др.

Для использования можно рекомендовать следующие результаты:

1. Методику численного параметрического исследования устойчивости установившихся режимов угловых движений КА, близких к периодическим. Указанная методика позволяет эффективно выбирать необходимые значения параметров используемых законов управления угловым движением КА.

2. Методику прогнозирования и оценки минимального уровня микроускорений в заданной точке борта для режима орбитальной ориентации КА.

3. Законы управления режимом орбитальной ориентации КА реализуемые с помощью системы гироскопических исполнительных органов, ограничивающие накопление собственного кинетического момента гиросистемы.

4. Закон управления режимом солнечной ориентации КА, реализуемый с

помощью системы гироскопических исполнительных органов в условиях ограничения накопления гиросtatического момента и отсутствия возможности изменения положения солнечных батарей относительно корпуса КА.

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

6. Способ расчета и построения особых поверхностей систем гиродинов, основанным на методе продолжения по параметру.

Замечания по диссертационной работе.

1. В главе «Введение» приводится формула (В.1) для расчета микроускорений, а также приводятся некоторые численные оценки уровня микроускорений на борту КА серий «Фотон» и «Бион». При этом определение, что называется микроускорением, приводится в диссертации ниже по тексту в разделе 1.5 главы 1.

2. В разделе 1.1 «Системы координат» главы 1 вводятся 6 систем координат и приводится описание двух наборов углов, задающих взаимное положение осей систем координат. При этом в описании углов приводится только последовательность поворотов, но не указано их направление. Рисунки в данной главе также отсутствуют, что в целом вносит некоторую неоднозначность в понимание углов ориентации.

3. В разделе 2.2 главы 2 приводится выражение (2.2) для функционала, а описание переменных входящих в этот функционал приводится ниже по тексту только через 2 абзаца.

4. В главе 2 диссертации описывается построение аппроксимирующего периодического движения, и сказано, что «построенная аппроксимация оказалась достаточно точной». Полезно было бы привести в диссертации численные оценки точности построенной аппроксимации.

5. В главе 4, в некоторых случаях, обеспечение асимптотической устойчивости выполняется путем выбора кратных действительных корней характеристического полинома, что не всегда эффективно.

6. В разделе 6.4 главы 6 не приведен алгоритм построения особых

поверхностей систем гироскопов методом продолжения по параметру, хотя автором была реализована «программа расчета и визуализации сингулярных состояний силовых гироскопических комплексов (гироскопов)». Полезно было бы привести в приложении к диссертации блок-схему или листинг разработанной прикладной программы.

7. Крайне неудобным является выбор формы представления материала работы, когда вначале идет описательная часть, а в конце главы следуют результаты в виде графического материала. Предпочтительно приводить графические материалы после их первого упоминания в тексте работы.

8. В работе имеются отдельные стилистические и редакционные погрешности: несогласованные окончания и пропущенные буквы. В частности, на стр. 13 присутствует фраза «задача исследования углового движения осесимметричного КА», на стр 21 фраза «в большинстве случаев будет происходить еще с большей скоростью» на стр. 151 фраза «к ним надо добавит соотношения» и т.д.

Приведенные выше замечания не снижают общей ценности выполненного исследования и полученных результатов и, безусловно, не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

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», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук является научно-квалификационной работой, в которой сформулирована и решена научная проблема, имеющая важное значение для развития теоретических и практических методов проектирования систем ориентации и стабилизации КА. Внедрение полученных результатов позволит значительно сократить стоимость и время разработки указанных систем, что имеет важное хозяйственное значение при создании современных КА различного назначения.

Диссертация по области исследования соответствует паспорту специальности 1.1.7 Теоретическая механика, динамика машин (технические науки), а именно пунктам 2, 3, 5, 6, 8, 10, 14 паспорта специальности.

Диссертация хорошо структурирована, обладает внутренним единством и написана грамотным научным языком. Автореферат и список публикаций полностью отражают содержание диссертации. Основные результаты работы отражены в 17 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Из них 11 научных статей в российских периодических изданиях, англоязычные версии которых индексируются в базах Web of Sciences и Scopus. Автором оформлено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и получено 6 актов о внедрении результатов диссертации. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на более чем 30 всероссийских и международных научных конференциях и семинарах.

Диссертация «Динамика и управление угловым движением космического аппарата, предназначенного для проведения длительных научных экспериментов» соответствует требованиям пунктов 9 - 14, 25 «Положения о порядке присуждении 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)».

Отзыв подготовлен доктором технических наук Сумароковым А.В.

Отзыв на диссертационную работу и автореферат обсужден и одобрен на расширенном заседании секции «Бортовые и наземные комплексы управления и радиотехнические системы» Научно-технического совета ПАО «РКК «Энергия», протокол №240 от 31 марта 2025 года. Выписка из протокола расширенного

