

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Игнатова Александра Ивановича

«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».

Актуальность темы исследований

Диссертационная работа посвящена вопросам теории и практики создания системы ориентации современного космического аппарата, предназначенного для проведения длительных научных экспериментов. Теоретическая часть предполагает исследование законов управления угловым движением КА, прогнозирование и оценка минимально возможного уровня квазистатических микроускорений на борту КА, численное моделирование углового движения при разработанных режимах управления. Практическая часть нацелена на выбор приборного состава и исполнительных органов системы управления угловым движением КА, задания параметров управления, обеспечивающих нужные характеристики движения, нацелена на описание методов реализации управлением КА.

Таким образом, актуальность темы исследований не вызывает сомнений.

Практическая значимость и реализация результатов работы

Результаты диссертации положены в основу создания КА, предназначенного для проведения длительных научных экспериментов на орбите Земли. Они позволяют значительно сократить время и затраты на создание системы управления угловым движением КА на этапе эскизного проектирования.

Результаты 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». На основе полученных результатов создан курс «Математическое моделирование систем гироскопических и электро-магнитных

органов управления угловым движением космических аппаратов», который читается студентам кафедры «Теоретическая механика» МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Краткий анализ содержания работы

Во введении описана постановка задачи, кратко изложена структура диссертации.

Первая глава имеет вводный характер. Она посвящена описанию строгой постановки задачи: введению систем координат и их взаимосвязи друг с другом, модели магнитного поля (IGRF, прямой диполь), вывода уравнений движения КА, состоящих из уравнений движения центра масс и вращений вокруг центра масс и дополненных кинематическими соотношениями Пуассона. Описываются моменты внешних сил, воздействующих на КА – гравитационные, аэродинамические, магнитные, – описываются разные типы орбит в движении центра масс КА, определяются микроускорения на орбитальной станции, схема проведения спектрального анализа данных.

Вторая глава посвящена исследованию углового движения осесимметричного КА с постоянным магнитом, который приводит к появлению дополнительного внешнего момента, воздействующих на КА со стороны магнитного поля Земли. Рассматривается случай большой величины магнитного момента так, что уравнения вращений будут содержать большой параметр.

Численно построены установившиеся движения КА, когда его продольная ось симметрии составляет малый угол с вектором напряженности с МПЗ как при наличии демпфирования, так и при отсутствии демпфирования. Далее, предложен способ аппроксимации установившегося движения посредством набора периодических решений уравнений. Показана законность такой аппроксимации на основе близости базисных частот. Исследуется устойчивость аппроксимационных периодических движений с помощью теории Флоке-Ляпунова.

В третьей главе дается оценка минимального уровня микроускорений на борту космического аппарата с целью проведения физических экспериментов, установки научной аппаратуры в местах измерений. Рассмотрен случай управления КА с помощью маховиков (КА -- гиростат). Показано, что наиболее приемлемым режимом углового движения КА для проведения длительных экспериментов является режим пассивной орбитальной ориентации, близкой к гравитационно устойчивой. Исходные уравнения вращения КА содержат такие движения в качестве порождающих, поэтому решения этих уравнений будут находиться вблизи указанных стационаров. Однако режим пассивной гравитационной ориентации является неустойчивым. Поэтому рассмотрена система стабилизации с помощью управляющего момента от гиросистемы, получена асимптотическая устойчивость орбитальной ориентации, медленное накопление гиросtatического момента. Проведены расчеты микроускорений в режиме орбитальной ориентации КА при использовании указанного закона управления. Показано, что вариация ускорений принадлежит допустимому диапазону, является «эталонной». Однако предложенная система управления тяжело реализуема на практике.

В четвертой главе продолжается исследование управления и стабилизации КА в окрестности стационарных движений, являющихся равновесием в орбитальной системе координат, при этом требуется, чтобы не было накопления гиросtatического момента. Записаны уравнения движения КА - гиростата с учетом гравитационных и аэродинамических моментов. Исследуется управление КА с демпфированием (гиродемпфированием) равновесным режимом КА - гиростата, совпадающим (в смысле ориентации) с гравитационным равновесием, либо расположенным близко к нему. С помощью второго метода Ляпунова получены достаточные условия асимптотической устойчивости этого равновесия. Найдены параметры системы управления, обеспечивающие асимптотическую устойчивость, проведено матмоделирование режима демпфирования. Рассмотрены также различные модификации управления в окрестности устойчивого (и неустойчивого) гравитационного равновесия. Показано, что устойчивый режим гравитационной ориентации КА можно обеспечить с помощью управления

электромагнитами, демпфирующими угловые скорости КА, обеспечивающими более точную гравитационную ориентацию. Показано также, что условия на борту КА являются приемлемыми для проведения продолжительных космических экспериментов.

В **пятой главе** исследуется задача управления солнечной ориентацией КА. Особенность задачи – быстрое накопление собственного кинетического момента гиросистемы. Рассмотрена управление, при котором ориентация на Солнце является стационарным режимом, асимптотически устойчивым в отсутствии возмущающих моментов. Однако гиросtatический момент возрастает. Поэтому поставлена задача управления углом поворота вокруг оси, направленной на Солнце, ограничивающее накопление кинетического момента. Расчеты показали, что такое управление эффективно только в случае, когда угол между направлением на Солнце и плоскостью орбиты не превышает 75 градусов. Для больших углов наклона предложен переход в режим орбитальной ориентации с последующим возвращением в режим солнечной ориентации.

Рассмотрены модификации системы управления с помощью электромагнитной системы управления. Предложен закон управления электромагнитами, учитывающий требование сохранения гиросtatического момента КА в связанных осях. Численное моделирование показало эффективность управления, проведено также исследование устойчивости установившегося движения КА.

В **шестой главе** рассмотрены различные системы управления вращением КА с помощью гиросистемы: используя управляющие двигатели – маховики, либо гиродины. Анализируются условия функционирования гиросистемы, состоящей из нескольких маховиков или гиродинов. Исследуются схемы расположения двигателей–маховиков в виде пирамиды, а для гиродинов – в виде «3-SPE». Аналитически выбираются значения параметров, при которых реализуются программные развороты, в частности, для солнечной ориентации КА указаны значения соответствующих параметров двигателей маховиков. Для

систем двухстепенных гироскопов (гиродинов) предложен и обоснован способ расчета и построения особых поверхностей, основанный на методе продолжения по параметру. Формализованы достаточные условия, позволяющие определить тип особых поверхностей.

Новизна результатов исследований, их достоверность

Научная новизна связана с детальным исследованием законов управления вращательным движением КА при наличии управления и функциональных ограничений и обеспечивающих функционирование системы в течение долгого времени.

Новизна диссертации обусловлена также оценкой величины микроускорений в зависимости от начальных параметров орбиты центра масс КА, описанием процедуры математического моделирования выбора параметров систем управления, устойчивости ориентированного движения КА, в выборе схем расположения элементов управления ориентацией станции.

Результаты исследований являются достоверными вследствие корректности использованных моделей, достоверности математических методов исследования и численных расчетов, вследствие наличия актов о внедрении результатов работы в АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева» и в ООО «Спутникс».

Соответствие автореферата диссертации

Основные результаты и выводы представлены в автореферате. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Замечания

1. Описание резонансов на стр. 64-70 не убедительное. Вывод о наличии резонансов делается на основе увеличения амплитуды колебаний при некоторых значениях l_0 . Однако, здесь необходим анализ частотного спектра с указанием целочисленных соотношений между частотами. Его нет. Резонансы характеризуются не только возрастанием амплитуды колебаний, но и качественным изменением картины колебаний, требующей, подчас, изменения методов исследования. Соответствующий анализ отсутствует.

2. На стр. 106 диссертации указано, что среднее от $U(t)$ на интервале $[0, T]$ соответствует l_0 , доставляющей минимум функционалу (3.8). Из теоретических рассуждений это утверждение не следует. Этот вывод является результатом численных исследований, то это надо объяснить, ссылаясь на результаты вычислений и их иллюстрации.

3. Вывод об устойчивости при $k_\Omega = 0$ некоторых периодических режимов вращения в линейном приближении (стр. 69) является необоснованным. Дело в том, что среди мультипликаторов периодического решения есть кратные, равные единице. Но кратные мультипликаторы приводят, как правило, к неустойчивости, так как они порождают решения, содержащие члены, подобные секулярным. Равновесие может быть устойчивым, если элементарные делители простые. Итак, необходим отдельный анализ этого случая.

Указанные замечания не являются критическими, поэтому не ставят под сомнение значимость результатов диссертации и положительную оценку диссертации А.И. Игнатова.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней».

Представленная диссертация А.И. Игнатова соответствует паспорту специальности 1.1.7 «Теоретическая механика, динамика машин». Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научная проблема, имеющая важное народно-хозяйственное значение. Разработаны методологические основы проектирования системы управления вращательным движением КА на больших интервалах времени, методология вычисления уровня микроускорений на борту КА, обоснованы новые структурные схемы управления с использованием гиросистем, предложены новые конструкторские решения.

Диссертация А.И. Игнатова выполнена на высоком научном уровне. По актуальности темы, степени обоснованности основных научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверности и новизне, а также ценности для науки

и практике диссертация соответствует критериям, в том числе – требованиям п. 9–14, п. 23 и критериям, установленным Положением ВАК о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, с изменениями, которые утверждены Постановлением Правительства РФ от 20.03.21 № 426, а автор диссертации, Александр Иванович Игнатов, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук, профессор,
проф. каф. 802 «Мехатроника и теоретическая механика»,
институт № 8 «Компьютерные науки и прикладная математика», Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет)»

Красильников Павел Сергеевич

Свое 06.06.25

Контактные данные:

Тел. 8-903-687-9171, e-mail: krasil06@rambler.ru

Специальность, по которой защищена докторская диссертация: 01.02.01

Адрес места работы:

Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993,

Телефон: 8-499-158-44-66, e-mail: mai@mai.ru

Подпись сотрудника МАИ

П.С. Красильникова удостоверяю:

Зам. начальника управления по работе

с персоналом МАИ



Иванов М.А.