

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Красильникова Павла Сергеевича на диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук Ролдугина Дмитрия Сергеевича на тему «Динамика космических аппаратов с активной магнитной системой ориентации» по специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин»

Актуальность темы исследований

Диссертационная работа посвящена исследованию вращательных движений искусственного спутника Земли, управляемого с помощью активной магнитной системы ориентации. Система ориентации состоит из трех магнитных катушек, создающих необходимый дипольный момент. Взаимодействуя с внешним магнитным полем Земли, дипольный момент создает управляющий механический момент. Основное направление исследований – построение управления, реализующего востребованные режимы ориентации, исследование динамики КА с активным магнитным управлением. Практическая значимость диссертации – применение результатов исследований при создании малых космических аппаратов с учетом ограниченности их ресурсов и стоимости. Диссертация Ролдугина Д.С. упрощает этап проектирования космических аппаратов, при котором создатели КА переходят от гироскопических систем управления к системам с магнитным управлением. Автор дает практические рекомендации по использованию различных методов управления, описывает эффективные режимы работы системы управления в зависимости от основных параметров аппарата – масс-инерционных характеристик, размера, наклона и высоты орбиты.

Таким образом, тема исследования и результаты, полученные соискателем, являются актуальными.

Краткий анализ содержания работы

Во введении обоснована актуальность темы исследований, описана постановка задачи, кратко изложена структура диссертации.

Первая глава посвящена описанию используемых систем координат, различным моделям геомагнитного поля, уравнениям вращательных движений

КА, описанию моделей моментов \dot{M} , действующих на КА: управляющих моментов, гравитационных, аэродинамических

Следующие пять глав содержат описание результатов исследований, сгруппированных по типу изучаемых движений.

Во **второй главе** изучается наиболее простой режим движения – гашение угловой скорости. Сначала изучается зависимость времени переходного процесса от наклона орбиты и от начальной ориентации вектора кинетического момента относительно вектора геомагнитной индукции. Далее получено приближенное выражение для остаточной величины скорости при применении грубого алгоритма демпфирования. В частности, оказалось, что остаточная скорость немного ниже, чем можно было бы ожидать из общих соображений. Описан алгоритм демпфирования \dot{M} и его модификации.

В **третьей главе** магнитные катушки усиливаются одним ротором. Рассмотрены два режима вращения КА. Для первого режима, ротор, имея большой кинетический момент, обеспечивает устойчивость по Ляпунову оси маховика, ориентированной по нормали к плоскости орбиты, при этом корпус спутника не вращается. Вводится магнитное демпфирование, обеспечивающее асимптотическую устойчивость такой ориентации. Связка «катушки-ротор» изучается в диссертации количественно, в линейном приближении: проводится поиск поправок к характеристическим показателям линейных уравнений с периодическими коэффициентами, проведена оценка времени переходных процессов. При этом сравнивается эффективность нескольких алгоритмов гашения скорости. Рассмотрен поворот в плоскости орбиты вокруг удерживаемого маховиком направления, исследовано плоское движение на полярной орбите. Далее исследуется второй режим вращения, когда КА быстро вращается вокруг вектора линейной скорости его центра масс, направленного по касательной к орбите аппарата. Ротор компенсирует кинетический момент корпуса, а магнитная система фактически устраняет суммарный кинетический момент и ориентирует ось вращения.

Четвертая глава посвящена аппаратам, стабилизируемым быстрым вращением вокруг оси симметрии, имеющим, как следствие, существенный кинетический момент, сохраняющийся в инерциальном пространстве. Изучается эффективность магнитной системы управления в поддержании этого режима, нарушаемого действием возмущающих факторов. А именно, рассмотрено три

алгоритма управления: алгоритм \dot{V} с одной катушкой, демпфирующий нутационные колебания, алгоритм раскрутки вокруг оси симметрии до заданного значения угловой скорости, и алгоритм переориентации оси вращения в заданном направлении в инерциальном пространстве.

Во всех трех случаях получены усредненные эволюционные уравнения вращения КА, построены их первые интегралы, проведен качественный анализ быстрогодействия гашения нутационных колебаний, показано, что есть определенный уровень нутационных колебаний, который не удастся погасить, если колебания вызваны малым отклонением строительной оси КА – вокруг которой требуется поддержать вращение – от оси максимального момента инерции. Показано, что выбор большего наклона является предпочтительным. Указанные алгоритмы управления вращением КА используются в задаче об осмотре небесной сферы, когда ось вращения равномерно вращается в пространстве.

Отдельно рассмотрена задача о малых колебаниях оси закрученного спутника в окрестности заданного режима ориентации. Получены эволюционные уравнения движений, описан закон убывания амплитуды колебаний по угловым скоростям в первом (и в улучшенном первом) приближении метода усреднения. Показано, что по угловым переменным существует асимптотически устойчивый стационарный режим.

Описан алгоритм одноосной стабилизации КА, когда вектор угловой скорости совпадает с направлением на Солнце и с нормалью к плоскости солнечных панелей. Получены усредненные уравнения вращений на орбите, близкой к солнечно-синхронной. Описаны равновесные решения этих уравнений, исследована их устойчивость, как следствие, получены условия эффективного управления КА.

Рассмотрено влияние недиагональных элементов тензора инерции на точность ориентации строительной оси КА. Показано, что рассогласование в ориентации системы строительных осей и главных осей инерции спутника является одной из причин нутационных колебаний. Описана – при условии постоянства вектора геомагнитной индукции – скорость демпфирования этих колебаний, их амплитуда.

Пятая глава в каком-то смысле продолжает четвертую. В ней рассматрива

ется задача поддержание ориентации на Солнце с помощью управления, использующего показания лишь солнечного датчика. Спутник имеет небольшую угловую скорость вращения, при этом система управления стабилизирует вектор кинетического момента в направлении на Солнце. Исследуются движения в окрестности требуемой ориентации. Несмотря на то, что информацию о скорости вращения вокруг направления на Солнце получить с помощью солнечных датчиков нельзя, предложена методика управления, которая практически всегда позволяет ориентировать аппарат для поддержания заряда батарей.

В шестой главе изучается наиболее общая задача – некоторая трехосная ориентация аппарата. Как и следовало ожидать, без использования специальных режимов движения, позволяющих «лабиринговать» и избежать проблемы с направлением управляющего момента, точность ориентации оказывается невысокой. Однако в переходном процессе предложен интересный подход к управлению на скользящем режиме, когда строится траектория углового поворота в требуемое положение таким образом, что возникающий управляющий момент практически перпендикулярен вектору геомагнитной индукции.

Новизна результатов исследований, их достоверность

Новизна диссертации состоит в получении новых результатов в исследовании динамики вращательных движений КА на околоземных орбитах под управлением активной магнитной системы ориентации:

исследовано гашение угловой скорости вращения при разных магнитных системах управления, оценка значений остаточной угловой скорости

описана стабилизация одноосного вращения вокруг нормали к плоскости орбиты спутника и вокруг вектора скорости центра масс КА, когда система управления состоит из связи «магнитная катушка-ротор»

исследована стабилизация одноосного вращения вокруг оси симметрии аппарата в режиме быстрого вращения, когда система управления демпфирует нутационные колебания, осуществляет раскрутку вокруг оси симметрии и переориентацию оси вращения в заданном направлении

исследована одноосная стабилизация, когда вектор угловой скорости КА совпадает с направлением на Солнце и с нормалью к плоскости солнечных панелей.

получены выражения для точностных и временных характеристик движения
исследована задача трехосной ориентации аппарата с использованием

управления со скользящим режимом, при котором управляющий момент перпендикулярен вектору геомагнитной индукции

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Полученные результаты и выводы являются обоснованными вследствие корректности использованных моделей, достоверности математических методов исследования и многочисленных верификационных расчетов, подтверждающих достоверность используемых уравнений и методов приближенного анализа, а также в результате сопоставления результатов моделирования с результатами исследований других авторов.

Соответствие автореферата диссертации

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

Результаты диссертации успешно прошли апробацию на ведущих тематических конференциях и семинарах профильных организаций. Полнота представления результатов работы в открытой печати не вызывает сомнения. Опубликовано 36 работ в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Замечания

1. В главе V имеем дело со случаем, когда угол прецессии становится неопределенным, что ведет к вырождению уравнений движения. Для устранения этого вырождения автор исследований меняет ориентацию декартовой системы координат, накладывая на эту ориентацию (неявно) искусственные ограничения. Такая процедура вызывает сомнения. Здесь надо проводить регуляризацию уравнений вращений, используя замену переменных, описанную в препринте Лидов М.Л., Нейштадт А.И. «Метод канонических преобразований в задачах о вращении небесных тел и законы Кассини» Препринт № 9 М.: ИПМ АН СССР, 1973

2. Исследуя многочастотные уравнения (2.1.5) методом усреднения, автор исключает резонансы. Однако не учитывается, что частоты в этих уравнениях являются переменными величинами, зависящими от медленной координаты θ . Необходимо следить за тем, чтобы решения усредненной системы не были захвачены в резонанс $m\eta_\varphi \cos\theta + n\eta_\psi = 0$, где m, n – целые числа.

3. Автор диссертации, используя методы приближенно-аналитических исследований, пренебрегает явными оценками точности приближений. Такие оценки существуют для метода малого параметра, для метода усреднения в

стандартных по Боголюбову системах, для процедур линеаризации, их надо использовать.

4. Законы управления для переориентации оси быстро вращающегося аппарата в Разделах 4.1 и 4.2 разные. Следовало бы объяснить отличие и указать, какой из законов предпочтительен.

Заключение

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация Ролдугина Д.С. на тему «Динамика космических аппаратов с активной магнитной системой ориентации» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является законченной научной работой, имеющая важное хозяйственное значение. Автором получены новые теоретические результаты, которые можно квалифицировать как новое научное достижение. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин» (по физико-математическим наукам), отвечает требованиям Положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям (пункт 9).

Считаю, что соискатель Ролдугин Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин».

Официальный оппонент:

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

Красильников Павел Сергеевич

С.С.К. 23.10.23

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: 8-499-158-43-95, e-mail: mai@mai.ru

Подпись сотрудника МАИ

П.С. Красильникова удостоверяю:

Зам. начальника управления по работе

с персоналом МАИ



Иванов М.А.