

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора Морозова Виктора Михайловича 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

Задачи управления движением космического аппарата (КА) относительно центра масс достаточно разнообразны и представляют большой интерес как в теоретическом, так и в прикладном отношении. Широкий класс задач управления ориентацией спутников – управление при помощи магнитных моментов различной природы. Диссертационная работа Д.С. Ролдугина посвящена исследованию движения космического аппарата, оснащенного магнитной системой ориентации. Управляющий момент является функцией геомагнитного поля, индукция которого изменяется в процессе движения КА по орбите вокруг Земли. В работе предполагается, что орбита спутника – круговая, а математические модели рассматриваемых задач представляют собой дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами.

Актуальность такого исследования неразрывно связана с особенностью объекта, к которому прилагается управление. Это малые космические аппараты, весьма стесненные по доступным средствам управления. Если ограничиться использованием только магнитных катушек на малых и сверхмалых, массой в несколько килограмм, аппаратах, то высвободятся ресурсы – масса, объем, электропитание – для других систем, и в первую очередь полезной нагрузки. Здесь имеется, однако, существенная проблема, связанная с природой управляющего момента. А именно, нет возможности создать момент в направлении вектора геомагнитной индукции. При этом система на самом деле является управляемой, что было показано в нескольких работах. Несмотря на это, в практическом плане построения управления для конкретных космических аппаратов возникают определенные трудности. Наиболее серьезные проблемы связаны с обеспечением любой требуемой ориентации аппарата, что подробно рассмотрено автором в шестой главе диссертации. Здесь нужная ориентация в принципе обеспечивается, но точность при этом оказывается малоприспособленной для реальных запросов полезной нагрузки. Причем не только управление, предложенное автором диссертации, но и некоторые другие подходы, рассмотренные в работе, оказываются не лишенными различных недостатков.

Поэтому в других главах работы автором выделены несколько практически значимых режимов движения и проведены соответствующие исследования динамики космического аппарата. В этих режимах возможна довольно точная ориентация или стабилизация космического аппарата. Круг решаемых космическими аппаратами в этих режимах задач несколько ограничен, но охватывает существенную часть современных запросов.

Всего **работа содержит** 272 страницы, включающие введение, шесть глав, заключение, список литературы и приложение с основными обозначениями.

Первая глава является вспомогательной. В ней вводятся системы координат, модели геомагнитного поля, уравнения движения и модели моментов, действующих на аппарат. Проводится довольно подробный анализ упрощенной модели геомагнитного поля, используемой в работе в ситуациях, когда качественный результат анализа динамики является достаточным, и его точность не столь принципиальна.

Во *второй главе* исследуется движение аппарата в режиме гашения угловой скорости. При этом сначала рассматривается типичная постановка быстро вращающегося КА, когда его угловая скорость много больше орбитальной. В этом случае действием гравитационного момента можно пренебречь. Несмотря на то, что такая задача уже многократно исследовалась, в основном в другой постановке наличия вихревых токов, автору удалось получить новые результаты, в том числе интегралы эволюционных уравнений. Особый интерес представляет вопрос о конечной скорости аппарата после завершения процесса демпфирования. Эта задача также уже рассматривалась другими авторами, но соискателю удалось найти новое компактное приближенное решение для движения на приполярной орбите.

Третья глава посвящена движению аппарата, содержащего симметричный ротор, вращающийся с постоянной скоростью вокруг одной из главных центральных осей инерции. Конечно, в такой ситуации расширяется элементный состав системы управления. Тем не менее, установка одного маховика с постоянной скоростью вращения все еще представляется существенной экономией по сравнению с полноценным блоком двигателей-маховиков. При этом качественно расширяются возможности системы ориентации. Сначала автор рассматривает классическую постановку. Движение изучается в окрестности положения относительного равновесия спутника на полярной орбите, когда ось вращения маховика расположена по нормали к плоскости орбиты. Для формирования управляющего магнитного момента используется алгоритм гашения угловой скорости. Линеаризованные уравнения движения спутника с ротором представляют собой линейные уравнения с периодическими

коэффициентами. Для них с помощью метода малого параметра определяются приближенные выражения для характеристических показателей, представленные через параметры спутника и системы управления. Сравнивается эффективность нескольких алгоритмов демпфирования и проведено численное моделирование движения. Далее в главе рассматривается управление, которое стабилизирует спутник в определенном положении в плоскости орбиты. Уравнение движения представляет собой уравнение второго порядка с периодическими коэффициентами, содержащее малый параметр. Это уравнение имеет асимптотически устойчивое установившееся решение. В двух последних разделах главы рассматривается задача стабилизации КА в следующем режиме движения: КА вращается с большой угловой скоростью вокруг касательной к круговой орбите. Такая задача возникает при зондировании поверхности Земли. Ротор служит для компенсации кинетического момента корпуса. Построено управление, обеспечивающее существование требуемого положения равновесия. Вводится дополнительное управление для обеспечения асимптотической устойчивости этого положения. Исследование устойчивости проводится численно на основе теории Флоке. Отдельно рассмотрен вопрос о реализации построенного управления.

В четвертой главе рассматривается управление движением аппарата, стабилизируемого вращением в трех режимах движения: гашения нутационных колебаний, поддержания скорости вращения вокруг оси симметрии, переориентации оси вращения. На первом этапе используется управление $\dot{B}$. Как и в главе 2, получена усредненная система уравнений движения, которая решена в квадратурах. На втором этапе исследование также проводится на основе эволюционных уравнений. Далее в главе рассматривается движение быстро вращающегося аппарата в окрестности требуемого режима. Как и ранее, гравитационный момент не учитывается и движение рассматривается только под действием управляющего магнитного момента двух типов. Исследовано движение оси симметрии спутника под воздействием «слабого» управления. Применяется метод разделения движений, численное моделирование показывает правомерность использования приближенных уравнений. В главе 4 также рассматривается одноосная стабилизация КА на основе требуемой величины угловой скорости вращения. Указан вид магнитного управления, обеспечивающего заданный режим движения. Исследование проводится также на основе эволюционных уравнений. В последнем разделе исследовано влияние недиагональных элементов тензора инерции на точность стабилизации вращающегося аппарата. Получены выражения, показывающие влияние указанных элементов на уровень нутационных колебаний в свободном движении.

В пятой главе рассматривается алгоритм стабилизации вектора кинетического момента в направлении Солнца и вращение КА вокруг оси

максимального момента инерции. Гравитационный момент не учитывается. Управляемое движение в окрестности требуемой ориентации исследуется при помощи эволюционных переменных. Получены усредненные уравнения для медленных переменных, включающих величину вектора кинетического момента, углы его ориентации в инерциальном пространстве и амплитуды колебаний оси максимального момента инерции относительно вектора кинетического момента. Далее в главе проводится моделирование движения КА при введении управления S_{dot} и дополнительных алгоритмов, использующих показания магнитометра. Также исследована задача обеспечения однозначной стабилизации КА при использовании только информации, доставляемой солнечным датчиком. При моделировании управляемого движения представлен ряд сценариев, в которых рассматривались различные комбинации тензора инерции, типа орбиты и ее ориентации.

В шестой главе рассматривается обеспечение трехосной ориентации с помощью магнитной системы управления. Стабилизирующее управление строится в виде обратной связи по координатам и скоростям космического аппарата. Выбор параметров управления основывается на методе функции Ляпунова в случае, когда гравитационный момент не учитывается. В линейном приближении уравнения расщепляются на три независимых уравнения, описывающие затухающие колебания. Проведен параметрический анализ условий устойчивости. Далее в главе исследуется положение относительного равновесия в орбитальной системе координат при учете гравитационного момента. Линеаризованная система является системой с периодическими коэффициентами и поиск параметров усиления осуществляется численно. Далее в главе управление строится на основе скользящего режима. Оно формируется в два этапа. Сначала строится поверхность в фазовом пространстве, по которой должен двигаться вектор состояния. Затем строится управление, обеспечивающее движение по этой поверхности. В конце главы проводится сравнение различных подходов к построению управления с обратной связью.

В Заключение приводятся основные полученные и выносимые на защиту результаты, завершает работу краткое приложение, в котором собраны основные обозначения.

Таким образом, в диссертационной работе рассмотрен ряд **практически значимых** режимов движения космического аппарата, обеспечивающих – хотя и с разной точностью – основные запросы по ориентации со стороны полезной нагрузки КА. Объединяющим в исследованиях разных режимов является получение конкретных выражений, характеризующих эффективность работы системы ориентации в зависимости от параметров аппарата. Полученные в диссертации результаты были применены на нескольких отечественных и

зарубежных аппаратах. Как теоретические, так и практические результаты диссертации являются **новыми**, их совокупность можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение.

Достоверность и обоснованность полученных результатов не вызывает сомнений. В диссертационном исследовании применяются хорошо зарекомендовавшие себя методы анализа линейных и нелинейных систем. Каждый полученный теоретический приближенный результат проверяется с помощью математического моделирования более сложной системы, учитывающей различные возмущающие факторы. Работа прошла серьезную **апробацию**, результаты были доложены на ведущих отечественных и зарубежных конференциях. Диссертационное исследование в совокупности обсуждалось на семинарах ведущих отечественных организаций. Изложенные в диссертации исследования **опубликованы** в 36 рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК (из них 35 статей в журналах, входящих в базы данных WoS, Scopus, 1 патент). Результаты, полученные в диссертации и выносимые на защиту, получены автором **лично**. Также для полноты изложения материала приведено несколько результатов, полученных совместно с другими авторами, о чем явно указано в тексте диссертации. **Автореферат** достаточно полно отражает содержание диссертации.

К работе имеется ряд замечаний:

1. Во многих разделах отсутствует четкая постановка задачи. Не указано, какие внешние моменты учитываются (в первую очередь это касается гравитационного момента), какая модель геомагнитного поля используется. Приходится выяснять эти вопросы по виду уравнений движения, иногда — опосредованно уже по виду решения. В результате значительно затрудняется восприятие материала.

2. В большинстве случаев не объясняется, почему выбираются рассматриваемые законы управления. Из каких соображений они формируются, почему рассматриваются именно эти, а не другие алгоритмы.

3. Довольно часто автор говорит об устойчивости системы уравнений, хотя при этом подразумевается устойчивость конкретного исследуемого решения.

4. Стр. 194. Угол ψ меняется равномерно только в порождающем решении, когда величина кинетического момента аппарата постоянна. В тексте же говорится о равномерном изменении в возмущенных уравнениях движения.

5. Стр. 114. Суждение об устойчивости требуемого решения сделано существенно раньше исследования устойчивости. Кроме того сказано, что «уравнения 3.4.15 показывают асимптотическую устойчивость», хотя устойчивость исследуется далее с помощью уравнений 3.4.17. Это вызывает некоторую путаницу.

6. Ссылаясь на исходные уравнения движения, автор везде приводит уравнения 1.3.2 или 1.3.3. В этих уравнениях, среди прочего, присутствует момент, создаваемый ротором. При этом ротор используется лишь в одной главе диссертации. Аналогичное замечание, дополняющее сделанное выше Замечание 1, можно сделать по поводу возмущающих моментов в правой части. В уравнениях 1.3.2 и 1.3.3 приведены все моменты, которые могут быть учтены в работе. При конкретных ссылках не указывается, какие именно моменты следует учитывать в данной конкретной ситуации.

Приведенные замечания не снижают общего положительного впечатления о работе. Диссертация Ролдугина Дмитрия Сергеевича «Динамика космических аппаратов с активной магнитной системой ориентации» представляется завершенной научно-квалификационной работой, имеющей важное хозяйственное значение. Работа **соответствует паспорту** специальности 1.1.7 в пунктах 2, 3, 5, 10, 14 и **удовлетворяет требованиям пункта 9** Положения о присуждении ученых степеней. Автор диссертации 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 (01.02.01 Теоретическая механика),
профессор Морозов Виктор Михайлович

главный научный сотрудник Лаборатории 302 навигации и управления

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт механики

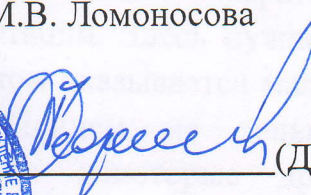
119192, Москва, Мичуринский просп., 1, НИИ механики МГУ, лаб. 302, к. 306

Электронная почта moroz@imes.msu.ru, тел. +7 980 180-81-15, +7 495 939-31-10

Подпись Виктора Михайловича Морозова заверяю

и.о. директора НИИ Механики МГУ имени М.В. Ломоносова



 (Д.В. Георгиевский)

« 26 » октября 2023 г.