

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Ивана Александровича Тимбая  
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

Диссертационная работа Д.С. Ролдугина посвящена исследованию движения малых космических аппаратов с активной магнитной системой управления на низких околокруговых орбитах. Работа существенно дополняет ряд исследований по магнитным системам ориентации, которые в нашей стране в основном были посвящены пассивной магнитной системе. Активная система имеет перед пассивной серьезные преимущества, так как позволяет реализовать требуемые полезной нагрузкой или служебными системами режимы движения. Задача построения ориентации с помощью магнитных катушек особенно актуальна в свете все ускоряющихся темпов запуска кубсатов в России. От единичных запусков мы перешли к десяткам пусков в год. Магнитная система управления особенно актуальна именно для кубсатов из-за их малого размера и низкой стоимости. Диссертационная работа содержит исследование управляемого движения аппарата в нескольких режимах движения, каждому из которых посвящена отдельная глава. Хотя эти режимы не покрывают всех возможных запросов создателей аппаратов, они позволяют подобрать подходящее решение в большинстве случаев. При этом в работе ищутся приближенные решения уравнения движения в явном виде, связи между параметрами аппарата и характеристиками работы системы управления. Этот подход имеет важное **практическое значение**, так как позволяет оперативно оценивать возможности системы управления при разработке сверхмалых аппаратов, иногда занимающей всего несколько месяцев от идеи до запуска.

**Содержание работы** выделяет пять востребованных режимов движения космического аппарата в отдельных главах, предваряясь первой главой. Первая глава является вспомогательной, в которой описываются необходимые в работе уравнения движения и модели, хотя также содержит описание нового набора эволюционных переменных.

Во *второй главе* изучается классическая задача демпфирования колебаний, которая в случае использования «асимптотического» алгоритма демпфирования практически идентична движению аппарата с вихревыми токами. Помимо изучения времени переходного процесса, автор приводит оценку скорости, до которой возможно гашение колебаний с применением алгоритма  $\dot{V}$ , используемого практически на каждом низкоорбитальном космическом аппарате.

*Третья глава* несколько выделяется в работе тем, что в ней активная магнитная система ориентации дополняется ротором – маховиком с постоянной скоростью вращения. Здесь изучается переходный процесс, когда аппарат выходит на ориентацию осью установки маховика по нормали к плоскости орбиты. Сравнивается действие нескольких алгоритмов гашения скорости, и оказывается, что алгоритм  $\dot{V}$  является в данной задаче предпочтительным. Далее рассматривается поворот в плоскости орбиты на заданный угол с помощью предложенного автором управления. Существенно отличается вторая часть этой главы, где сам аппарат вращается очень быстро, а маховик нужен для создания нулевого общего кинетического момента. Предложено и исследовано магнитное управление, поддерживающее вращение со скоростью в несколько оборотов в минуту вокруг касательной к орбите.

В *четвертой главе* рассмотрен быстро вращающийся аппарат. Магнитное управление аппаратом, стабилизируемым вращением – один из классических подходов. Изучаются несколько алгоритмов управления, как отдельно влияющих на некоторые характеристики движения – нутационные колебания, скорость закрутки, направление оси вращения, так и позволяющих в одном компактном выражении задать все требуемые параметры. Завершается глава исследованием влияния недиагональных элементов тензора инерции на нутационные колебания.

*Пятая глава* является в некотором смысле продолжением четвертой. В ней изучается одноосная стабилизация в направлении Солнца с помощью закона управления  $\dot{S}$ . Хотя это управление не задает скорость вращения непосредственно, по ходу исследования становится понятно, что здесь также осуществляется закрутка аппарата. Предложено управление, которое позволяет поддерживать такую закрутку фактически без необходимой информации, имея лишь показания солнечных датчиков.

В *шестой главе* изучается наиболее общая задача – ориентация аппарата в требуемом трехосном положении. Однако параметры работы системы управления оказываются весьма низкими – точность ориентации колеблется в диапазоне 10-15 градусов, что связано с ограничением на направление управляющего момента, присущим магнитной системе управления.

Завершают текст диссертации заключение с выносимыми на защиту положениями, список литературы и приложение с обозначениями. Аналогичную диссертации структуру имеет и **автореферат**, достаточно полно дающий представление о работе.

**Новизна** работы заключается в полученных конкретных решениях для каждого из режимов, выделенных в отдельную главу. Во многих случаях исследование доведено до конкретных – хотя и приближенных – выражений, показывающих решение уравнений движения или важные параметры движения. Все эти решения получены автором **лично**. Решения, соотношения и выводы,

приведенные в работе и вынесенные на защиту, вполне достоверны и обоснованы. Автор применяет ряд хорошо известных приемов анализа уравнений движения, упрощая их с помощью разумных предположений. Затем полученные решения сравниваются с численным расчетом исходных уравнений движения.

Апробация работы была проведена на множестве конференций, а непосредственно единое диссертационное исследование было заслушано на специализированных научных семинарах. Все результаты работы приведены в 36 публикациях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

К работе возник ряд комментариев и замечаний:

1. Страница 28. В первом положении, выносимом на защиту, присутствует неудачная формулировка. Складывается впечатление, что все результаты положения верны для сферически-симметричного спутника, хотя на самом деле это требование относится только к первому описанному в положении результату.
2. Страница 31. Не помешал бы рисунок с инерциальными системами координат.
3. Страница 48. При введении аэродинамического момента допущен ряд неверных формулировок для параметров, входящих в выражение 1.3.21.
4. Страница 60. Проводится поиск приближенных выражений для характеристических показателей из-за громоздкости точных выражений. Однако, поскольку точные выражения найти можно, следовало непосредственно сравнить величины, получаемые по точным формулам – пусть и не приведенным в работе – и по приближенным.
5. Глава 3. В главе рассмотрены две принципиально разные задачи в движении аппарата с ротором. Было бы уместно выделить каждую в отдельную главу.
6. Раздел 3.3. Автор исследует управляемый поворот в плоскости орбиты и влияние на результирующий угол поворота гравитационного момента. Однако в данной ситуации аэродинамический момент может оказать существенное влияние.
7. Раздел 4.3. Исследование проведено для упрощающего предположения полярной орбиты и Солнца, лежащего в плоскости экватора. Полученные результаты сверяются с численным моделированием для аппарата на солнечно-синхронной орбите, что весьма близко к сделанным предположениям и успешно их подтверждает. Однако, интересно узнать, переносятся ли полученные результаты на орбиты, далекие от полярных.
8. Раздел 6.2. Для аппроксимации производной параметра поверхности скольжения используется простая разность двух значений на соседних тактах управления. Интересно, как сказывается на эффективности разработанной методики управления величина такта управления (шага численного моделирования).

Приведенные замечания и вопросы не умаляют качества представленной к защите работы. Диссертация Ролдугина Дмитрия Сергеевича «Динамика космических аппаратов с активной магнитной системой ориентации» – законченная научно-квалификационная работа. Ее можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение. Работа соответствует паспорту специальности 1.1.7, пп. 2, 3, 5, 10, 14 и удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней. Считаю, что 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 технических наук (01.02.01 Теоретическая механика), профессор

Иван Александрович Тимбай

профессор кафедры высшей математики

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет)

443086, Самара, ул. Московское шоссе, д. 34

Электронная почта [timbai@mail.ru](mailto:timbai@mail.ru)

Телефон +7 846 267 44 44

Тимбай (И.А. Тимбай)



Подпись <u>Тимбай И.А.</u> удостоверяю.
Начальник отдела сопровождения деятельности
научных советов Самарского университета
<u>Бояркина</u> Бояркина У.В.
<u>сентябрь</u> 20 <u>23</u> г.