

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
федерального государственного  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования

«Санкт-Петербургский  
государственный университет»  
Микушев Сергей Владимирович



2023 г.

### **Отзыв ведущей организации**

федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский  
государственный университет» о диссертации

**РОЛДУГИНА Дмитрия Сергеевича**

**«ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С АКТИВНОЙ МАГНИТНОЙ  
СИСТЕМОЙ ОРИЕНТАЦИИ», представленной на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук по специальности 1.1.7 – «Теоретическая  
механика, динамика машин».**

Диссертационная работа Д.С. Ролдугина посвящена решению ряда новых научных проблем, связанных с исследованием динамики управляемого движения космического аппарата (КА) с магнитной системой управления (МСУ). Специфика упомянутых проблем, имеющих не только теоретический, но и практический интерес, обусловлена разнообразием востребованных режимов угловой ориентации КА. Как известно, МСУ обладают рядом важных достоинств (простота, надежность, компактность), обусловивших ее широкое распространение вначале в пассивном, а затем и в активном вариантах исполнения. Если к тому же учесть, что МСУ обладают низкой стоимостью и низким энергопотреблением, то становится понятным резко выросший в последние 30 лет интерес к использованию МСУ при проектировании малых КА и, особенно, группировок малых КА, способных решать принципиально иной по сравнению с одиночными КА круг задач. В связи с вышеизложенным, не вызывает сомнения **актуальность** и своевременность появления данной диссертационной работы, нацеленной на сокращение стоимости и времени разработки МСУ при создании современных спутниковых систем.

Перейдем к общей характеристике диссертационной работы Д.С. Ролдугина, имеющей 272 страницы и содержащей введение, шесть глав, заключение, список литературы и приложение с основными обозначениями. По существу, диссертационная работа Д.С. Ролдугина представляет собой всестороннее систематическое исследование

ряда актуальных проблемы использования МСУ с учетом специфики миссий, разработанных для малых КА. При этом теоретические результаты диссертации и построенные в ней алгоритмы применимы, естественно, при проектировании не только малых, но и других КА, для которых использование МСУ является целесообразным. Поэтому они вносят существенный вклад в теорию управляемого движения КА. Важной особенностью диссертации является то, что апробация почти всех полученных в ней новых результатов прошла не только на конференциях и семинарах, но и в условиях многочисленных реальных космических летных испытаний на конкретных КА («Чибис-М» (2012), «ТаблетСат-Аврора» (2014), «СХВН-2» (2017), «СириусСат-1» (2017), «СириусСат-2» (2017), «Зоркий» (2021)), запущенных в целях решения актуальных задач, выдвинутых запросами практики освоения околоземного пространства.

По сути, автор диссертационной работы решил целый комплекс **практически важных** задач, объединенных единой тематикой и общей направленностью на выявление качественных свойств и установление количественных характеристик управляемого движения КА с МСУ для различных режимов углового движения КА и для различных программных ориентаций. К их числу относятся: погашение угловой скорости КА, одноосная стабилизация КА, трехосная стабилизация КА, одноосная стабилизация КА в режиме вращения, стабилизация КА в направлении на Солнце. Все указанные варианты постановок задач тщательно проанализированы в соответствующих разделах диссертации, что позволило получить общее представление о зависимости свойств движения КА от параметров КА и от параметров управления. Как теоретические, так и практические результаты диссертации являются **новыми**. Совокупность этих результатов можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение.

Во-первых, исследована динамика КА с МСУ в режиме гашения угловой скорости. Решение эволюционных уравнений, описывающих переходный процесс, получено в квадратурах. Установлена экспоненциальная зависимость времени переходных процессов от наклона орбиты КА. Изучена зависимость времени переходного процесса от начальной ориентации вектора кинетического момента КА. Получена оценка отклонения оси вращения КА от нормали к плоскости орбиты.

Во-вторых, исследована динамика КА с МСУ при наличии тангажного маховика. Проведено сравнение трех основных алгоритмов демпфирования угловой скорости КА. Показано, что алгоритм  $-B\dot{\theta}$ , обычно наименее эффективный, в данной задаче является предпочтительным. Разработана численно-аналитическая методика поиска амплитуд периодических колебаний для установившегося движения КА в плоскости полярной орбиты и устойчивых движений, рождающихся из плоских, на орбитах, близких к полярной.

В-третьих, исследована динамика КА с МСУ в режиме вращения корпуса КА вокруг касательной к орбите. Для быстровращающегося КА с ротором, компенсирующим кинетический момент корпуса, предложено управление, обеспечивающее устойчивость данного режима движения КА. Для КА на низких орбитах учтено влияние восстанавливающего аэродинамического момента.

В-четвертых, для КА, стабилизируемого вращением, исследованы переходные процессы при использовании трех алгоритмов активной магнитной ориентации:

гашения нутационных колебаний КА, поддержания угловой скорости вращения КА и переориентации оси вращения КА в инерциальном пространстве. Эволюционные уравнения решены в квадратурах. Изучено движение вблизи программного режима. Проанализировано влияние магнитного демпфирования. Получены выражения для эволюции амплитуд нутационных колебаний КА и оценка для остаточных неустранимых колебаний.

В-пятых, исследована динамика КА с МСУ в режиме стабилизации на Солнце. Введены новые эволюционные переменные, свободные от вырождения в данном режиме движения и включающие в себя амплитуды колебаний оси максимального момента инерции относительно вектора кинетического момента. Получено решение усредненных эволюционных уравнений в квадратурах.

В-шестых, исследована динамика КА с МСУ в режиме трехосной стабилизации под управлением алгоритма с обратной связью. Показано, что устойчивая стабилизация КА возможна как в инерциальном пространстве, так и в орбитальной системе координат. Предложена конструктивная численно-аналитическая методика выбора параметров управления. Разработан алгоритм управления на основе скользящего режима, обеспечивающий переориентацию КА по траектории, на которой управляющий момент практически перпендикулярен вектору геомагнитной индукции.

Все упомянутые исследования потребовали от автора не только применения аналитических методов исследования линейных и нелинейных дифференциальных систем, но и разработки алгоритмов и составления программ, позволивших выполнить численно-аналитические исследования. Существенно, что каждый из полученных приближенных результатов был проверен диссертантом с помощью математического моделирования на базе более сложной дифференциальной системы, учитывающей различные возмущающие факторы. Поэтому достоверность и обоснованность полученных результатов не вызывает сомнений.

В целом диссертационная работа Д.С. Ролдугина имеет существенное значение для космодинамики. Результаты, полученные в диссертационной работе, могут служить основой для математического моделирования, последующего динамического анализа, а также в практике разработки и конструирования КА при планировании новых космических миссий.

Все утверждения диссертации строго обоснованы, каких-либо пробелов в доказательствах не обнаружено. Тема диссертации соответствует специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика».

Основные результаты диссертации своевременно опубликованы в 36 рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК (из них 35 статей в журналах, входящих в базы данных Scopus, WoS и патент), докладывались на конференциях и семинарах и правильно отражены в автореферате.

Диссертация написана достаточно аккуратно. В качестве недостатков можно отметить, например, следующие:

1. В разделе «системы координат» главы 1 вводятся 8 различных систем координат. При этом в данном разделе нет ни одной иллюстрации. В последующих главах диссертации имеются некоторые иллюстрации для систем координат. Однако, первоначальное восприятие материала в 1-й главе было бы более легким при наличии иллюстраций.

2. В разделе «уравнения движения» главы 1 вводятся самолетные углы с указанием лишь последовательности поворотов. В то же время известно, что для однозначности понимания «самолетных» углов одной лишь последовательности поворотов недостаточно. Должны быть указаны еще и направления поворотов. Избежать указанной неоднозначности в понимании углов конечного поворота можно было бы с помощью иллюстрации, которая, к сожалению, отсутствует.

3. На с. 48, в процессе вывода аэродинамического момента делается предположение о том, что атмосфера статична и не вращается вместе с Землей. Обоснованность такого предположения не проанализирована.

4. Во 2-й главе, на с. 54 имеется фраза «В результате имеем зависимость модуля вектора кинетического момента спутника от наклона орбиты  $i$ », понимание которой сильно усложнено тем, что ни одна из формул, приведенных с начала этой главы, не содержит наклон  $i$  в явном виде. Лишь вернувшись на 18 страниц назад можно обнаружить безымянную формулу, которая проясняет утверждение автора. То же самое относится и к анализу влияния наклона орбиты на величину кинетического момента на с. 56, 57, 58.

Из замечаний редакционного характера отметим следующие:

1. На с.9 после формулы (2) дважды встречаются выражения, включающие слово «скорость». Этот термин требует уточнения для ясности понимания того, о какой скорости идет речь, или что именно изменяется с той или иной скоростью. Тот же самый недостаток встречается и в других местах диссертации. Например, во 2-м абзаце на с.10, в последнем абзаце на с. 28, в последнем абзаце на с. 50, в первом абзаце раздела 2.2.

2. На с.9 в последнем абзаце имеется опечатка: «при воздействием вихревых токов».

3. На с.21 выражение «Суммарная точность стабилизации (отклонение опорной траектории от заданной ориентации и ошибка отслеживания этой траектории) оказывается существенно выше» представляется неудачным. Поскольку понятия «точность» и «ошибка» являются антагонистичными, то «выше» может быть что-то одно из двух – либо точность, либо ошибка.

4. Начиная со с.33 и далее в работе неоднократно упоминается диполь, в частности, «наклонный диполь» и «прямой диполь». Поскольку в физике термин «диполь» является многозначным (электрический диполь, магнитный диполь), то было бы более корректно использовать термин «магнитный диполь», который как раз и подразумевается в контексте данной работы. То же самое относится к многозначному термину «индукция». На с.34 и далее, включая сводную таблицу обозначений на с. 269, следовало бы пояснить, что речь идет не об электромагнитной индукции и не об электростатической индукции, а о магнитной индукции.

5. На с.34 выражение «угловая скорость вращения Земли» допускает неоднозначность трактовки ввиду отсутствия указания на систему координат, в которой эта угловая скорость наблюдается. Следовало бы заменить это выражение более точным и однозначно понимаемым: «угловая скорость суточного вращения Земли».

6. На с.47 в последнем абзаце имеется опечатка: «аэродинамический момент представления собой».

7. На с.52 во 2-м абзаце имеется опечатка: «Поскольку интересуется представляет».

8. На с.58 в последней строке имеется опечатка: «по сравнению в ...».

9. На с.83 в первом абзаце имеется опечатка: «на основе приближенных выражения».

Отмеченные недостатки не влияют на общее положительное впечатление о диссертационной работе. Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, имеющую важное хозяйственное значение, в которой исследование актуальной проблемы теоретической механики и космодинамики доведено до получения новых и важных результатов.

Результаты диссертации могут быть использованы в научных исследованиях, проводимых в МГУ им. М.В.Ломоносова, СПбГУ, МГТУ им. Н.Э.Баумана, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, ФИЦ ИУ РАН, ИПМех РАН и в других организациях.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет требованиям пп. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённому Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (с изм. от 26.05.2020, ред. от 11.09.2021), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а ее автор Ролдугин Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин».

Отзыв заслушан, обсужден и одобрен 25 сентября 2023 г. на заседании кафедры Теоретической и прикладной механики математико-механического факультета СПбГУ (протокол № 44/8/19-02-6 от 25.09.2023). Отзыв составил профессор кафедры теоретической и прикладной механики математико-механического факультета СПбГУ Тихонов Алексей Александрович.

И.О. Заведующего кафедрой Теоретической и прикладной механики математико-механического факультета СПбГУ, доктор физико-математических наук, профессор

С.Б. Филиппов

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры Теоретической и прикладной механики математико-механического факультета СПбГУ

А.А. Тихонов



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», СПбГУ  
Адрес: 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9.  
Тел: +7 (812) 328-20-00. Эл. почта: [spbu@spbu.ru](mailto:spbu@spbu.ru) Сайт: [spbu.ru](http://spbu.ru)