

УТВЕРЖДАЮ:

исполняющий обязанности директора, заместитель директора
Федерального государственного учреждения «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной математики им.
М.В. Келдыша Российской академии наук», член-корреспондент РАН
М.Б. Марков



» Июль 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Диссертация «Динамика космических аппаратов с активной магнитной системой ориентации» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», отдел № 7.

В период подготовки диссертации соискатель Ролдугин Дмитрий Сергеевич работал в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», отдел № 5, сектор 4 (по 2018 год), отдел № 7 (с 2018 года), младшим научным сотрудником (с 2012 года), научным сотрудником (с 2014 года), старшим научным сотрудником (с 2016 года).

В 2010 г. окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» по направлению «Прикладные математика и физика».

Ученая степень кандидата физико-математических наук присуждена 21 мая 2013 г., диплом Серия ДКН № 189889.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, профессор Овчинников Михаил Юрьевич, работает в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», отдел № 7, главный научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего отделом.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертация «Динамика космических аппаратов с активной магнитной системой ориентации» посвящена изучению управляемого движения космического аппарата на низкой околоземной орбите, причем основным, а зачастую единственным средством управления являются магнитные катушки. Данная задача является особенно актуальной для малых космических аппаратов, ежегодные запуски которых исчисляются сотнями. Будучи ограниченными в служебных системах, такие аппараты могут существенно расширить круг решаемых задач с помощью правильного построения управления с применением магнитной системой ориентации. Практическая значимость работы подтверждается участием соискателя в производственных работах с ведущими предприятиями отечественной промышленности и инновационным фирмами, в том числе в работах с реальными космическими аппаратами Чибис-М, ТаблетСат-Аврора, СХВН-2, Зоркий, СириусСат, WormSail.

В диссертации автором рассмотрены следующие режимы движения аппарата и получены новые результаты:

1. Гашение угловой скорости. Для переходного режима с помощью эволюционных уравнений изучена зависимость времени демпфирования скорости от наклона орбиты и начальной ориентации вектора кинетического момента, получены первые интегралы усредненных уравнений. В установившемся режиме определен характер движения, на которое выходит аппарат.
2. Переориентация аппарата, оснащенного тангажным маховиком. В переходном режиме получены выражения для поправок к характеристическим показателям,

характеризующие время переходного процесса. Проведено сравнение нескольких алгоритмов демпфирования. В установившемся режиме предложен алгоритм разворота аппарата по углу тангажа и разработана численно-аналитическая методика поиска периодических колебаний на приполярной орбите. Для аппарата, быстро вращающегося вокруг касательной к орбите, и оснащенного соосным ротором, предложен алгоритм управления и показана устойчивость требуемого режима движения. При движении на низкой орбите с учетом восстанавливающего аэродинамического момента получено приближенное решение уравнений движения.

3. Управляемое движение аппарата, стабилизируемого вращением. Исследована эффективность работы связки трех алгоритмов стабилизации в переходных процессах. Получены приближенные решения для движения оси вращения вблизи требуемой ориентации. Изучен алгоритм стабилизации, основанный на рассогласовании текущей и потребной скорости аппарата. Получены оценки величины нутационных колебаний, возникающих из-за недиагональных элементов тензора инерции. Изучено влияние на них алгоритма демпфирования и получено выражение для неустранимой остаточной величины колебаний.

4. Стабилизация на Солнце. Получено решение эволюционных уравнений движения аппарата под действием алгоритма Sdot вблизи требуемого режима движения с использованием новых эволюционных переменных. Предложены два подхода по доработке алгоритма управления, обеспечивающие однозначность направления ориентации и поддержание скорости вращения.

5. Стабилизация в заданном положении в инерциальной или орбитальной системах координат. Исследовано движение аппарата под действием управления с обратной связью, построенного на основе функции Ляпунова. Разработана методика поиска коэффициентов усиления управления. Предложен метод управления на основе скользящего режима. Проведено сравнение различных алгоритмов управления.

Материалы диссертации достаточно полно представлены в работах, опубликованных соискателем. Количество публикаций, в которых излагаются

основные научные результаты диссертации, в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ – 36.

В том числе 35 статей в изданиях, входящих в базы данных Web of Science или Scopus, из них 15 публикаций в изданиях, входящих в первый квартиль Web of Science. Получен патент. Выпущена монография.

Список публикаций в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Ovchinnikov M.Y., Roldugin D.S. A survey on active magnetic attitude control algorithms for small satellites // Progress in Aerospace Sciences. 2019. Vol. 109. Paper 100546.
2. Иванов Д.С., Овчинников М.Ю., Ролдугин Д.С., Ткачев С.С., Трофимов С.П., Шестаков С.А., Ширококов М.Г. Программный комплекс для моделирования орбитального и углового движения спутников // Математическое моделирование. 2019. Т. 31, № 12. с. 44–56.
3. Ovchinnikov M.Y., Penkov V.I., Roldugin D.S., Pichuzhkina A.V. Geomagnetic field models for satellite angular motion studies // Acta Astronautica. 2018. Vol. 144. P. 171–180.
4. Ovchinnikov M.Y., Roldugin D.S., Tkachev S.S., Penkov V.I. B-dot algorithm steady-state motion performance // Acta Astronautica. 2018. Vol. 146. P. 66–72.
5. Roldugin D.S., Ovchinnikov M.Y., Ivanov D.S., Shachkov M.O., Koptev M.D., Pantsyrnyi O.A., Fedorov I.O. Saving mission yet to be launched: Tight schedule for an unexpected project // Advances in the Astronautical Sciences. 2018. Vol. 163. P. 377–391.
6. Ovchinnikov M.Y., Ivanov D.S., Ivlev N.A., Karpenko S.O., Roldugin D.S., Tkachev S.S. Development, integrated investigation, laboratory and in-flight testing of Chibis-M microsatellite ADCS // Acta Astronautica. 2014. Vol. 93. P. 23–33.
7. Иванов Д.С., Ивлев Н.А., Карпенко С.О., Овчинников М.Ю., Ролдугин Д.С., Ткачев С.С. Результаты летных испытаний системы ориентации

микроспутника Чибис-М // Космические исследования. 2014. Т. 52, № 3. с. 218–228.

8. Овчинников М.Ю., Ролдугин Д.С., Карпенко С.О., Пеньков В.И. Исследование быстродействия алгоритма активного магнитного демпфирования // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 2. с. 176–183.

9. Иванов Д.С., Карпенко С.О., Овчинников М.Ю., Ролдугин Д.С., Ткачев С.С. Испытания алгоритмов управления ориентацией микроспутника “Чибис-М” на лабораторном стенде // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 1. с. 118–137.

10. Глухов В.И., Макеич С.Г., Нехамкин Л.И., Овчинников М.Ю., Ролдугин Д.С., Рябиков В.С., Туманов М.В. Способ ориентации космического аппарата и устройство для реализации способа. Патент № 2618664. РФ, 2016.

11. Ovchinnikov M.Y., Roldugin D.S. Magnetic attitude control and periodic motion for the in-orbit rotation of a dual-spin satellite // Acta Astronautica. 2021. Vol. 186. P. 203–210.

12. Ovchinnikov M.Y., Penkov V.I., Roldugin D.S., Tkachev S.S. Single axis stabilization of a fast rotating satellite in the orbital frame using magnetorquers and a rotor // Acta Astronautica. 2020. Vol. 173. P. 195–201.

13. Ovchinnikov M.Y., Roldugin D.S. Comparison of two magnetic damping laws for the attitude acquisition of a dual spin satellite // International Journal of Space Science and Engineering. 2019. Vol. 5, № 4. P. 369–383.

14. Овчинников М.Ю., Ролдугин Д.С., Пеньков В.И., Варатарео Р., Рябиков В.С. Движение спутника, оснащенного тангажным маховиком и магнитными катушками, в гравитационном поле // Космические исследования. 2017. Т. 55, № 3. с. 218–225.

15. Ролдугин Д.С. Устойчивость стабилизации космического аппарата в направлении Солнца магнитными исполнительными органами на солнечно-синхронной орбите // Космические исследования. 2023. Т. 61, № 2. с. 1–9.

16. Roldugin D.S., Ovchinnikov M.Y. Wobble of a spin stabilized satellite with cross products of inertia and magnetic attitude control // *Advances in Space Research*. 2023. Vol. 71, № 1. P. 408–419.
17. Roldugin D.S., Testani P. Spin-stabilized satellite magnetic attitude control scheme without initial detumbling // *Acta Astronautica*. 2014. Vol. 94, № 1. P. 446–454.
18. Ovchinnikov M.Y., Roldugin D.S., Penkov V.I. Asymptotic study of a complete magnetic attitude control cycle providing a single-axis orientation // *Acta Astronautica*. 2012. Vol. 77. P. 48–60.
19. Овчинников М.Ю., Ролдугин Д.С., Пеньков В.И. Исследование связи трех алгоритмов магнитного управления угловой скоростью и ориентацией спутника, стабилизируемого вращением // *Космические исследования*. 2012. Т. 50, № 4. с. 326–334.
20. Roldugin D.S., Testani P. Active magnetic attitude control system for sun-pointing of a spin-stabilized satellite without initial detumbling // *Advances in the Astronautical Sciences*. 2012. Vol. 145. P. 669–688.
21. Roldugin D.S., Ovchinnikov M.Yu. Terminal one axis stabilization properties of a spinning satellite employing simple magnetic attitude control // *Mathematics*. 2023. Vol. 11, № 6. Paper 1530.
22. Ovchinnikov M.Y., Roldugin D.S., Tkachev S.S., Karpenko S.O. New one-axis one-sensor magnetic attitude control theoretical and in-flight performance // *Acta Astronautica*. 2014. Vol. 105, № 1. P. 12–16.
23. Karpenko S.O., Ovchinnikov M.Y., Roldugin D.S., Tkachev S.S. One-axis attitude of arbitrary satellite using magnetorquers only // *Cosmic Research*. 2013. Vol. 51, № 6. P. 478–484.
24. Ролдугин Д.С. Моделирование сценариев однозначной магнитной стабилизации космического аппарата на Солнце по данным солнечных датчиков // *Математическое моделирование*. 2023. Т. 35, № 3. с. 20–34.
25. Roldugin D., Tkachev S., Ovchinnikov M. Asymptotic motion of a satellite under the action of sdot magnetic attitude control // *Aerospace*. 2022. Vol. 9, № 11. Paper 639.

26. Roldugin D.S., Tkachev S.S., Ovchinnikov M.Y. Satellite angular motion under the action of Sdot magnetic one axis sun acquisition algorithm // *Cosmic Research*. 2021. Vol. 59, № 6. P. 529–536.

27. Овчинников М.Ю., Ролдугин Д.С., Боргес Р.А., Каппелетти Ш., Баттистини С. Моделирование движения макета космического аппарата на аэродинамическом подвесе для отработки режима одноосной стабилизации магнитными катушками // *Математическое моделирование*. 2019. Т. 31, № 11. с. 36–46.

28. Roldugin D.S., Ivanov D.S., Tkachev S.S., Zharkih R.N., Kudryavtsev A. Flight experimentation with magnetic attitude control system of SitiuSat-1&2 nanosatellites // *Advances in the Astronautical Sciences*. 2020. Vol. 173. P. 449–462.

29. Roldugin D.S., Guerman A.D., Ivanov D.S., Ovchinnikov M.Y. Three-axis magnetic control for a nanosatellite: practical limitations due to a residual dipole moment // *Advances in the Astronautical Sciences*. 2020. Vol. 173. P. 427–436.

30. Guerman A.D., Ivanov D.S., Roldugin D.S., Tkachev S.S., Okhitina A.S. Infante maritime surveillance satellite // *Advances in the Astronautical Sciences*. 2020. Vol. 173. P. 617–623.

31. Ivanov D.S., Ovchinnikov M.Yu., Roldugin D.S. Three-axis attitude determination using magnetorquers // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2018. Vol. 41, № 11. P. 2455–2462.

32. Ivanov D.S., Ovchinnikov M.Y., Penkov V.I., Roldugin D.S., Doronin D.M., Ovchinnikov A.V. Advanced numerical study of the three-axis magnetic attitude control and determination with uncertainties // *Acta Astronautica*. 2017. Vol. 132. P. 103–110.

33. Ovchinnikov M.Y., Roldugin D.S., Penkov V.I., Tkachev S.S., Mashtakov Y.V. Fully magnetic sliding mode control for acquiring three-axis attitude // *Acta Astronautica*. 2016. Vol. 121. P. 59–62.

34. Ovchinnikov M.Y., Penkov V.I., Roldugin D.S., Guerman A.D. Active magnetic attitude control system providing three-axis inertial attitude // *Advances in the Astronautical Sciences*. 2015. Vol. 153. P. 2569–272.

35. Ovchinnikov M.Y., Roldugin D.S., Ivanov D.S., Penkov V.I. Choosing control parameters for three axis magnetic stabilization in orbital frame // Acta Astronautica. 2015. Vol. 116. P. 74–77.

36. Ovchinnikov M.Y., Roldugin D.S., Penkov V.I. Three-axis active magnetic attitude control asymptotical study // Acta Astronautica. 2015. Vol. 110. P. 279–286.

Монография:

М.Ю. Овчинников, В.И. Пеньков, Д.С. Ролдугин, Д.С. Иванов, Магнитные системы ориентации малых спутников, М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016, 368 с. ISBN: 978-5-98354-028-6.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обоснована применением современных методов теоретической механики, теории устойчивости, методов усреднения и розыска поправок к характеристическим показателям, численных методов. Достоверность подтверждена согласованностью теоретических результатов, численного моделирования и летных испытаний, сравнением с результатами других авторов. Основные результаты докладывались на ведущих отечественных и зарубежных конференциях:

- XXXV (2011), XXXVI (2012), XXXVII (2013), XXXIX (2015), XL (2016), XLI (2017), XLIII (2019), XLIV (2020), XLV (2021), XLVI (2022), XLVII (2023) Чтения по космонавтике, Москва;
- Первый российский симпозиум RusNanoSat-2015, Самара, 2015;
- XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 2015;
- Первая международная конференция «Проблемы механики и управления», Махачкала, 2018;
- Третий Российский симпозиум по наноспутникам, Самара, 2019;
- Вторая всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов», Таруса, 2010;
- XLIV чтения, посвященные разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, Калуга, 2009;

- VI (2008), VII (2009) Научно-практическая конференция «Микротехнологии в авиации и космонавтике», Москва.
- Ежегодная научная конференция МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук».
- 73rd (Paris, 2022), 72nd (Dubai, 2021), 71st (Online, 2020), 70th (Washington, 2019), 66th (Jerusalem, 2015), 65th (Toronto, 2014), 63rd (Naples, 2012), 62nd (Cape Town, 2011) International Astronautical Congress;
- 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Istanbul, 2019;
- 1st (Porto, 2012), 2nd (Roma, 2014), 3rd (Moscow, 2017) IAA Conference on dynamics and control of space systems;
- 2nd (Roma, 2013), 3rd (Roma, 2015), 4th (Roma, 2017), 5th (Roma, 2020) IAA Conference on University Satellites Missions and CubeSat Winter Workshop;
- 9th (Berlin, 2013), 10th (Berlin, 2015) IAA Symposium "Small satellites for Earth observation";
- 6th European Cubesat Symposium, Estavayer-le-Lac, 2014;
- 10th (2016), 11th (2018) International workshop and advanced school «Spaceflight dynamics and control», Covilha;
- XIII (2019), XI (2017), IX (2015), VII (2013) The International Summer School «Computer Technologies of Engineering Mechanical Problems», Институт механики МГУ, Москва;
- XV Summer Space School, Самара, 2019.

Диссертационное исследование обсуждалось на следующих семинарах:

- Семинар «Механика и управление движением» отдела № 5 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, руководитель Ю.Ф. Голубев;
- Семинар по теории управления и динамике систем Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, руководитель Ф.Л. Черноусько;
- Семинар «Механика и управление движением космических аппаратов» Баллистического центра ИПМ им. М.В. Келдыша, руководитель А.Г. Тучин;

- Семинар кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, руководитель Г.А. Щеглов;
- Секция теоретической механики Санкт-Петербургского Дома Ученых, председатель М.П. Юшков;
- Семинар по прикладной механике и управлению НИИ механики МГУ, руководители В.В. Александров, Н.А. Парусников, Ю.В. Болотин;
- Семинар ИПМ им. М.В. Келдыша, руководители Б.Н. Четверушкин и А.И. Аптекарев;
- Семинар «Динамические системы и механика» Московского авиационного института, руководитель Б.С. Бардин;
- Заседание Президиума Национального методического совета по теоретической механике, руководитель В.А. Самсонов.

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Все приведенные в диссертации результаты получены автором лично, за исключением вспомогательных сведений относительно устойчивости движения аппарата под управлением алгоритма Sdot, приведенных в разделе 5.1 для полноты описания динамики в этом режиме; реализации фильтра Калмана в разделе 6.1; и результатов работы одного алгоритма трехосной магнитной ориентации в рамках сравнения различных подходов в разделе 6.3. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад соискателя был определяющим.

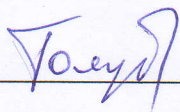
Диссертация Ролдугина Дмитрия Сергеевича обладает внутренним единством, содержит новые ценные научные результаты и положения и свидетельствует о большом личном вкладе соискателя в науку. Совокупность результатов диссертации можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение. Диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к диссертации доктора физико-математических наук по специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин. В частности,

исследования, проведенные в диссертации, удовлетворяют пп. 1, 2, 3, 5, 6, 10 направлений исследований по паспорту специальности.

Диссертация «Динамика космических аппаратов с активной магнитной системой ориентации» Ролдугина Дмитрия Сергеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин.

Заключение принято на заседании семинара «Механика и управление движением». Присутствовало на заседании 20 чел, в том числе 7 докторов наук по специальности, соответствующей тематике диссертации. Выступили с положительной оценкой диссертации: Ю.Ф. Голубев, М.Ю. Овчинников, В.В. Ивашкин, В.В. Сидоренко, А.В. Грушевский, В.А. Карташев.

Результаты голосования: "за" - 20 чел., "против" - 0 чел., "воздержалось" - 0 чел., протокол № 60 от 22 июня 2023 г.



Ю.Ф. Голубев, д.ф.-м.н., профессор,
г.н.с. отдела № 5, и.о. заведующего отделом,
руководитель семинара

29 июня 2023 г.