

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. В. Седельников, А. С. Танеева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева,
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

В работе представлена методика проектирования малого космического аппарата для выполнения задач реализации технологических процессов в условиях околоземного космического пространства. При проектировании такого малого космического аппарата предполагается, что он будет оснащён микрогравитационной платформой для выполнения требований по микроускорениям. Методика основана на принципах индивидуальности, достижимости и контролируемости. Они гарантируют максимально возможный учёт особенностей реализуемого гравитационно-чувствительного процесса, в том числе выполнение требований по ограничению модуля микроускорений в рабочей зоне технологического оборудования и эффективный контроль этого выполнения. Разработанная методика может быть использована при проектировании малого космического аппарата технологического назначения.

Ключевые слова: методика проектирования, микроускорения, гравитационно-чувствительные процессы, микрогравитационная платформа, малый космический аппарат, технологическое назначение, виброзащитное устройство.

Введение

Вопросы проектирования, производства и эксплуатации малого космического аппарата (МКА) технологического назначения (ТН) являются важными и актуальными. Быстрая реализация космических проектов МКА, а также их сравнительно низкая стоимость дают неоспоримые преимущества и способствуют расширению области возможного применения МКА [1–3]. Однако МКА имеют свои особенности по сравнению с космическими аппаратами (КА) других классов. Одной из таких особенностей является существенно более высокая доля массы упругой части конструкции МКА в общей его массе [4–6]. Данная особенность существенно осложняет использование МКА в области космических технологий, поскольку для реализации гравитационно-чувствительных процессов требуется выполнение требований по микроускорениям [7–9].

Одним из возможных путей решения проблемы обеспечения условий по микроускорениям во внутренней среде МКА является установка на его борту микрогравитационной платформы [10–12], которая является одним из наиболее перспективных направлений удовлетворения требований по микроускорениям. В защищённой зоне этих платформ размещалось технологическое оборудование. Одной из первых таких платформ была создана и испытана Microgravity Isolation Mount (MIM) [8]. Испытания MIM на борту орбитального комплекса «Мир» показали, что при её штатной работе колебания в защищённой зоне платформы существенно ниже, чем вне защищённой зоны (более чем на порядок). Позднее на базе MIM была разработана Vibration Isolation Mounting System [8]. Она стала базой для Microgravity Vibration Isolation Subsystem (MVIS), являющейся частью минилаборатории Fluid Science Laboratory. Минилаборатория функциони-

рует в составе лабораторного модуля «Columbus» на Международной космической станции. По экспериментальным оценкам с помощью MVIS удалось снизить максимальные значения микроускорений с 227 мкм/с^2 до 40 мкм/с^2 .

Таким образом, было обозначено направление по обеспечению требований по микроускорениям для орбитальных космических станций, в состав которых входят специализированные лабораторные модули («Кристалл», «Columbus», «KIBO»), а также лабораторий класса орбитальных космических станций («Tiangong»). Этот же подход применим и для МКА ТН.

Начав своё развитие с механических виброзащитных устройств [13–15], современные микрогравитационные платформы основаны на магнитном принципе работы [16–18]. Магнитная микрогравитационная платформа представляет собой бесконтактную систему виброизоляции, оснащённую позиционно-чувствительными датчиками, электростатическими акселерометрами и электромагнитными приводами. Защищённая часть этой платформы не имеет механического контакта и управляется электромагнитными силами [19]. В 1990-х гг. была создана и испытана система подавления ускорения с помощью левитации STABLE [20], которая впервые была успешно применена в качестве активной микрогравитационной платформы на миссии STS-93 [19]. С тех пор было создано достаточное количество бесконтактных активных микрогравитационных платформ, таких как MGIM [21], g-Limit [22], система активной виброизоляции в условиях микрогравитации MAIS [23].

Есть идеи реализации двухконтурных платформ, сочетающих в себе магнитный и механический принципы действия [19]. Авторы [19], основываясь на упрощённой линеаризованной модели управления подвижной частью двухконтурной микрогра-

витационной платформы, используют регулятор обратного хода для подавления вибрации с определенными параметрами. Результаты вычислительного эксперимента, представленные в [19], показывают, что метод обратного хода эффективно улучшает показатели виброизоляции в диапазоне частот колебаний от 1 Гц до 100 Гц примерно на 19 дБ.

Сегодня виброзащитные устройства имеют широкий спектр применения, не ограничиваясь космическими технологиями. Например, для виброзащиты высокочувствительной целевой аппаратуры [24, 25]. Анализ [26] показал, что собственные колебания панелей солнечных батарей телескопа Хаббл повлияли на точность его наведения. В результате чего появилось значимое дрожание линии визирования телескопа [26]. В другом примере микровибрации, вызванные непрерывной работой двигателя-маховика КА ZY-3, запущенного в 2012 г., снизили решающую способность оптической системы с расчетного значения 0,4 м до фактического значения от 2,5 до 7,5 м [26]. Кроме того, микровибрации, создаваемые на орбитальных КА, могут оказывать большое влияние на качество изображения оптической полезной нагрузки. Опубликованные результаты показывают, что ошибка в 10 мкрад в оптической настройке камеры может привести к ошибке позиционирования в 500 км на Земле [26]. Поэтому микрогравитационная платформа находит активное применение при решении данного спектра задач.

Концептуальная модель МКА ТН с микрогравитационной платформой представлена в работе [27]. В этой связи актуальна разработка методики проектирования такого МКА, в основании которой лежит концептуальная модель [27].

Принципы проектирования мало космического аппарата технологического назначения

Для разработки методики проектирования МКА ТН на основе концептуальной модели [27] сформулируем принципы проектирования МКА. Они будут отличаться от известных принципов в силу того, что специфика МКА ТН и концепция его создания под определённый гравитационно-чувствительный процесс с максимальным учётом основных особенностей этого процесса играют решающую роль при формулировке принципов проектирования МКА. Действительно, принцип унификации виброзащитных устройств, который сформулирован в [24] для механических и в [10] для магнитных микрогравитационных платформ, не представляется рациональным для проектируемого МКА ТН. Наоборот, отсутствие многозадачности при реализации одного гравитационно-чувствительного процесса, который является единственной целевой задачей, позволяет сформулировать принцип *индивидуальности*, противоположный принципу унификации [10, 24]. Он заключается в более полном учёте основных требований гравитационно-чувствительного процесса путём использования за счёт проектно-конструкторских решений. В рамках принципа индивидуальности предполагается решение задач:

- формирование технического облика МКА и выбора типа микрогравитационной платформы;
- выбор их основных проектных параметров;
- компоновка микрогравитационной платформы с технологическим оборудованием во внутренней среде МКА ТН.

Таким образом, принцип индивидуальности при проектировании МКА ТН не является широко используемым принципом, как в силу специфики выполняемых целевых задач, так и принятой концепции проектирования МКА ТН [27], предполагающей использование микрогравитационной платформы. Более того, он является обратным часто применяемому принципу универсальности при одновременном решении многих целевых задач. Следует отметить в этой связи, что принцип универсальности применяется на КА ТН других классов. Поскольку нерационально использовать КА ТН среднего класса (например, КА ТН серии «Фотон» [28–30]) для реализации одного гравитационно-чувствительного процесса. На этих КА отрабатываются серии принципиально различных технологических процессов с разными и порой противоречивыми требованиями. Поэтому принцип индивидуальности здесь совершенно неприменим.

Следующим важным принципом при проектировании МКА ТН является принцип *достижимости*. Он состоит в обеспечении как конструктивными методами и проектно-конструкторскими решениями, так и алгоритмами управления требуемых значений модуля вектора микроускорений, превышение которых делает решение целевой задачи невозможным. В рамках принципа достижимости предполагается решение задач:

- оптимальная компоновка обеспечивающей аппаратуры во внутренней среде МКА ТН;
- выбор режимов функционирования целевой и обеспечивающей аппаратуры, при которых будут соблюдаться ограничения по микроускорениям;
- формирование алгоритмов управления исполнительными органами системы ориентации и управления движением МКА ТН, способствующих соблюдению ограничений по микроускорениям;
- формирование алгоритмов управления исполнительными органами системы управления относительным движением защищённой части микрогравитационной платформы, способствующих соблюдению ограничений по микроускорениям.

Принцип достижимости является специфическим принципом, способствующим эффективно выполнению задач по реализации гравитационно-чувствительных процессов на борту МКА ТН. Для решения большинства других целевых задач он не играет важной роли и может не рассматриваться в перечне важных принципов проектирования.

Сформулированный выше принцип достижимости должен быть дополнен принципом *контролируемости*. Он необходим для контроля поля микроускорений в защищённой зоне микрогравитационной платформы и заключается в подтверждении выполнения требований по ограничению микроускорений с заданной точностью. В рамках этого принципа контролируемости предполагается решение задач:

- проектирование информационно-измерительной системы контроля микроускорений;
- подбор номенклатуры и состава средств измерений, используемых для контроля микроускорений;
- компоновка информационно-измерительной системы во внутренней среде МКА ТН, в том числе и в защищённой зоне микрогравитационной платформы;
- разработка методики обработки измерительных данных, обеспечивающей требуемую точность оценки модуля вектора микроускорений.

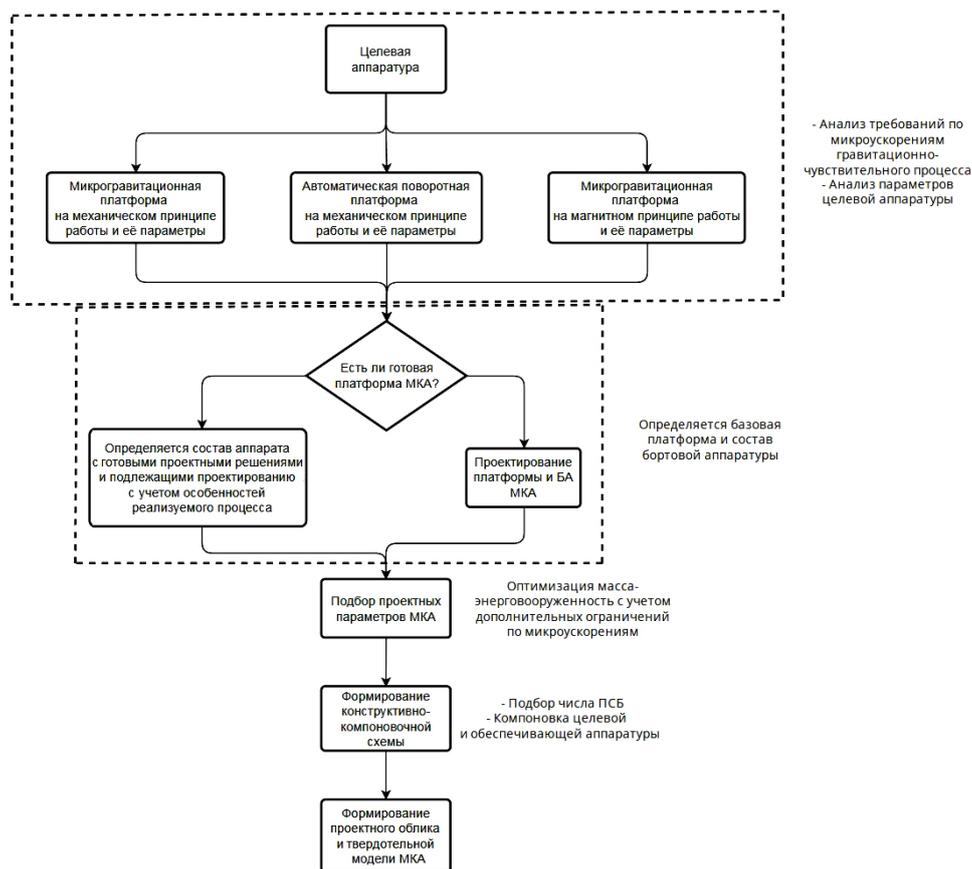


Рис. 1. Блок-схема алгоритма методики проектирования МКА ТН с микрогравитационной платформой

Fig. 1. Block diagram of the algorithm of the design methodology for a small technological spacecraft with a microgravity platform

Оригинальность сформулированных принципов проектирования требует разработки новой эффективной методики проектирования МКА ТН, которая будет рассмотрена в следующем разделе работы.

Методика проектирования малого космического аппарата технологического назначения с микрогравитационной платформой

На базе концепции проектирования МКА ТН [27] с учётом изложенных в предыдущем разделе принципов проектирования МКА ТН в настоящей работе представлена методика проектирования МКА ТН с использованием микрогравитационной платформы.

Методика содержит пять основных пунктов:

— на основе ограничений модуля микроускорений в защищённой зоне микрогравитационной платформы и массогабаритных параметров технологического оборудования выбирается тип и основные проектные параметры платформы;

— на основе решаемой целевой задачи подбирается базовая платформа МКА ТН, а также состав обеспечивающей аппаратуры и выделяется та часть этой аппаратуры, которую необходимо спроектировать с учётом требований реализуемого на МКА ТН гравитационно-чувствительного процесса;

— на основе номенклатуры выбранной обеспечивающей аппаратуры осуществляется двухкритериальная оптимизация (масса-энерговооруженность) с дополнительными ограничениями по модулю микроускорений и проводится выбор основных проектных параметров МКА ТН;

— на основе выбранных основных проектных параметров формируется конструктивно-компоновочная схема МКА ТН, обеспечивающая минимальное влияние микроускорений от внутренних возмущающих факторов на технологическое оборудование;

— на основе конструктивно-компоновочной схемы создаётся проектный облик и твердотельная модель МКА ТН.

Разработанная методика показана в виде алгоритма, приведённого на рис. 1.

Методика позволила создать проектный облик МКА ТН на базе платформы «Аист-2» с использованием автоматической поворотной виброзащитной платформы (АПВП) «Флюгер» и целевой аппаратуры «Ростовая установка» для реализации гравитационно-чувствительных процессов по направленной кристаллизации. Проектный облик МКА ТН представлен на рис. 2.

Особенностью процесса направленной кристаллизации является его нечувствительность к микроускорениям, параллельным направлению фронта кристаллизации. Именно эта особенность и позволила применить в проектном облике МКА ТН на рис. 2 АПВП «Флюгер», поскольку эта платформа ориентирует полезную нагрузку так, чтобы вектор микроускорений совпадал с направлением фронта кристаллизации. По двум другим осям, согласно данным [9], компоненты вектора микроускорений не превышали 3 мкм/с^2 . Таким образом, был реализован принцип индивидуальности при использовании предложенной методики проектирования МКА ТН.

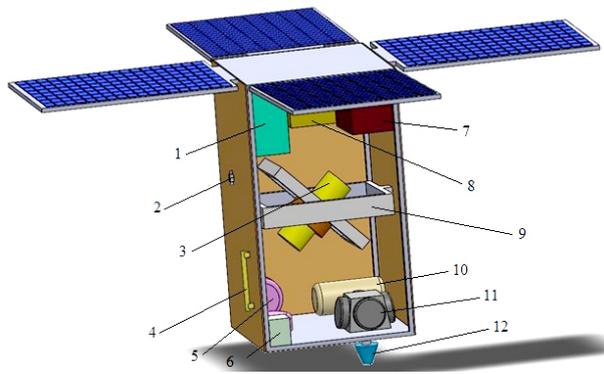


Рис. 2. Проектный облик МКА ТН, созданный на основе разработанной методики проектирования:
 1 — бортовая система контроля и управления (БСКУ);
 2 — электротермический микродвигатель; 3 — научная аппаратура «Ростовская установка»; 4 — антенное приемное устройство БСКУ; 5 — двигатель маховик;
 6 — аккумуляторная батарея; 7 — универсальная многофункциональная вычислительная система (УМВС);
 8 — блок автоматики, контроля, управления и регулирования (БАКУР); 9 — АПВП «Флюгер»;
 10 — топливный бак; 11 — одноосный измеритель угловой скорости (ОИУС); 12 — антенное передающее устройство БСКУ

Fig. 2. The design image of the small technological spacecraft, created on the basis of the developed design methodology:
 1 — on-board monitoring and control system (OMCS);
 2 — electrothermal microdrive; 3 — scientific equipment «Growth setup»; 4 — antenna receiver of OMCS;
 5 — flywheel motor; 6 — rechargeable battery;
 7 — universal multifunctional computing system;
 8 — automation, control, control unit and regulation;
 9 — automatic rotating vibration-proof platform «Flyuger»;
 10 — fuel tank; 11 — uniaxial angular velocity meter (OIUS);
 12 — antenna transmitting device of OMCS

Выводы и заключение

Разработанная методика позволяет при проектировании МКА ТН учесть основные особенности реализуемого гравитационно-чувствительного процесса путём применения различных проектно-конструкторских решений, касающихся как внешнего вида МКА ТН, состава обеспечивающей аппаратуры и системы управления движением, компоновки МКА ТН, так и выбора типа микрогравитационной платформы, обеспечивающей выполнение требований по микроускорениям. Это способствует созданию проектного облика МКА ТН для реализации конкретного гравитационно-чувствительного процесса, а также использованию МКА для проведения экспериментов в области космического материаловедения, расширяя сферу применения космической техники.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Проект FSSS-2023-0007).

Список источников

1. Райкунов Г. Г., Ежов С. А., Гусев Л. И. Современные тенденции в развитии космического приборостроения и космических информационных систем // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2014. Т. 1. № 1. С. 3–12. EDN: THSWPD.

2. Седелников А. В., Еськина Е. В., Танеева А. С., Хнырева Е. С., Матвеева Е. С. Проблема обеспечения и контроля требований по микроускорениям на борту малого космического аппарата технологического назначения // Омский научный вестник. Серия авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 2. С. 90–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-90-98. EDN: YNTNVQ.

3. Клименко Н. Н. Смена парадигмы: создание и применение псевдокосмических аппаратов как составная часть «новой космической революции» и «новой беспилотной революции» // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2023. № 3 (61). С. 3–18. DOI: 10.26162/LS.2023.61.3.001.

4. Асланов В. С., Юдинцев В. В. Выбор параметров системы увода космического мусора с упругими элементами посредством тросовой буксировки // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25, № 1. С. 7–17. EDN: YSPCOF.

5. Седелников А. В., Танеева А. С. Моделирование поля микроускорений в защищенной зоне виброзащитных устройств для реализации гравитационно-чувствительных процессов на борту малого космического аппарата технологического назначения // Омский научный вестник. Серия авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 2. С. 65–72. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-65-72. EDN: AJCGPU.

6. Седелников А. В., Моляк Д. П., Хнырева Е. С. О снижении управляемости космического аппарата при проведении активного контроля микроускорений на стадии эксплуатации // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 4. С. 25–34. EDN: YUONUD.

7. Лобыкин А. А. Методы улучшения микрогравитационной обстановки на борту автоматического космического аппарата, предназначенного для микрогравитационных исследований // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 2. С. 84–91. EDN: JVSLCD.

8. Седелников А. В. Контроль микроускорений как важнейшей характеристики космической лаборатории специализированного технологического назначения конструктивными методами // Контроль. Диагностика. 2014. № 7. С. 57–63. DOI: 10.14489/td.2014.07.pp.057-063. EDN: SGPIKR.

9. Ёлкин К. С., Иванов А. И., Незнамова Л. О., Прудкогляд В. О. Перспективы создания вакуумных и гравитационно-чувствительных технологий, использующих условия космического полета на околоземных орбитах. Исследование гравитационно-чувствительных явлений на борту отечественных космических аппаратов / под общ. ред. К. С. Ёлкина. Москва: ЗАО НИИ ЭНЦИТЕХ, 2013. 306 с.

10. Wu Q., Liu B., Cui N. [et al.] Tracking Control of a Maglev Vibration Isolation System Based on a High-Precision Relative Position and Attitude Model // Sensors. 2019. Vol. 19. 3375. DOI: 10.3390/s19153375.

11. Liu J., Li Y., Zhang Y. [et al.] Dynamics and control of a parallel mechanism for active vibration isolation in space station // Nonlinear Dynamics. 2014. Vol. 76, № 3. P. 1737–1751. DOI: 10.1007/s11071-014-1242-3.

12. Борисов А. Е., Емельянов Г. А., Никитин С. А. Параметрическая оптимизация системы управления автоматической поворотной виброзащитной платформы для микрогравитационных исследований // Космонавтика и ракетостроение. 2013. № 3(72). С. 147–155. EDN: RECYIT.

13. Zhu T., Cazzolato B., Robertson W. S. P. [et al.] Vibration isolation using six degree-of-freedom quasi-zero stiffness magnetic levitation // Journal of Sound and Vibration. 2015. Vol. 358. P. 48–73. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.07.013.

14. Grodinsky C. M., Whorton M. S. A Survey of Active Vibration Isolation Systems for Microgravity Applications // Journal of Spacecraft and Rockets. 2000. Vol. 37, № 5. P. 586–596. DOI: 10.2514/2.3631.

15. Liu C., Jing X., Daley S. Recent advances in micro-vibration isolation // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. Vol. 56–57. P. 55–80. DOI: 10.1016/j.ymssp.2014.10.007.

16. Wang S., Hou L., Meng Q. [et al.] Three-magnet-ring quasi-zero stiffness isolator for low-frequency vibration isolation // *International Journal of Mechanical System Dynamics*. 2024. Vol. 4, № 2. P. 153–170. DOI: 10.1002/msd2.12107.
17. Xie D., Zheng Z., Zhu Y. Design of a two-degree-of-freedom magnetic levitation vibration energy harvester for bridge vibration response analysis // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, № 4. e26000. DOI:10.1016/j.heliyon.2024.e26000.
18. Ming C., Xing J., Chen Z. [et al.] Design, analysis and experimental investigation on the whole-spacecraft vibration isolation platform with magnetorheological dampers // *Smart Materials and Structures*. 2019. Vol. 28, № 7. 075016. DOI: 10.1088/1361-665X/ab0ebe.
19. Wang A., Wang S., Xia H. [et al.]. Dynamic Modeling and Control for a Double-State Microgravity Vibration Isolation System // *Microgravity Science and Technology*. 2023. Vol. 35, № 1. 9. DOI: 10.1007/s12217-022-10027-8.
20. Edberg D., Boucher R., Nurre G. S. [et al.] Performance assessment of the STABLE Microgravity Vibration Isolation Flight Demonstration // *38th Conference Structures, Structural Dynamics, and Materials*. 1997. DOI: 10.2514/6.1997-1202.
21. Jones D. I., Owens R. G., Owen A. R. A microgravity isolation mount // *Acta Astronautica*. 1987. Vol. 15, № 6–7. P. 441–448.
22. Whorton M. S. g-LIMIT — A microgravity vibration isolation system for the International Space Station // *Conference and Exhibit on International Space Station Utilization*. 2001. DOI: 10.2514/6.2001-5090.
23. Dong W., Duan W., Liu W. [et al.] Microgravity disturbance analysis on Chinese space laboratory // *npj Microgravity*. 2019. Vol. 5, № 1. DOI: 10.1038/s41526-019-0078-z.
24. Qian Y., Xie Y., Jia J. [et al.] Development of Active Microvibration Isolation System for Precision Space Payload // *Applied Science*. 2022. Vol. 12. 4548. DOI: 10.3390/app12094548.
25. Kim Y., Kim S., Park K. Magnetic force driven six degree-of-freedom active vibration isolation system using a phase compensated velocity sensor // *Review of Scientific Instruments*. 2009. Vol. 80. 045108. DOI: 10.1063/1.3117462.
26. Zhongxiang Y., Zhengguang Zh., Lizhan Z. [et al.]. Microvibration isolation in sensitive payloads: methodology and design // *Nonlinear Dynamics*. 2023. Vol. 111, № 21. P. 1–49. DOI: 10.1007/s11071-023-08943-4.
27. Седельников А. В., Танеева А. С. Концептуальная модель малого космического аппарата технологического назначения // *Вестник Московского авиационного института*. 2024. Т. 31, № 2. С. 44–55. EDN: WVCFSZ.
28. Сазонов В. В., Чебуков С. Ю., Абрашкин В. И. [и др.] Анализ низкочастотных микроускорений на борту ИСЗ ФОТОН-11 // *Космические исследования*. 2001. Т. 39, № 4. С. 419–435. EDN: OUWKOJ.
29. Абрашкин В. И., Богоявленский Н. Л., Воронов К. Е. [и др.] Неуправляемое движение спутника Фотон М-2 и квазистатические микроускорения на его борту // *Космические исследования*. 2007. Т. 45, № 5. С. 450–471. EDN: IAQRJV.
30. Абрашкин В. И., Воронов К. Е., Пияков И. В. [и др.] Вращательное движение спутника Фотон М-4 // *Космические исследования*. 2016. Т. 54, № 4. С. 315–322. DOI: 10.7868/s0023420616040014. EDN: WDORML.

СЕДЕЛЬНИКОВ Андрей Валерьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры космического машиностроения Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева (Самарский университет), г. Самара.
SPIN-код: 3987-6997
AuthorID (SCOPUS): 23013232300
ORCID: 0000-0003-2698-1348
ResearcherID: G-4444-2017

ТАНЕЕВА Анастасия Сергеевна, аспирант кафедры космического машиностроения, инженер НИИ-219 (Научно-исследовательский институт космического машиностроения), инженер и ассистент кафедры космического машиностроения Самарского университета, г. Самара.
SPIN-код: 8816-1930
AuthorID (SCOPUS): 57205365815
ORCID: 0000-0002-8531-760X

Для цитирования

Седельников А. В., Танеева А. С. Методика проектирования малого космического аппарата технологического назначения // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2024. Т. 8, № 4. С. 73–79. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-73-79.

Статья поступила в редакцию 06.08.2024 г.
© А. В. Седельников, А. С. Танеева

METHODOLOGY OF DESIGNING A SMALL SPACECRAFT FOR TECHNOLOGICAL PURPOSES

A. V. Sedelnikov, A. S. Taneeva

Samara National Research University,
Russia, Samara, Moskovskoye sh., 34, 443086

The paper presents a methodology for designing a small spacecraft to perform the tasks of technological processes in near-Earth space. When designing such a small spacecraft, it is assumed that it will be equipped with a microgravity platform to meet the requirements for micro-accelerations. The methodology is based on the principles of individuality, attainability and controllability. They guarantee the maximum possible consideration of the features of the gravity-sensitive process being implemented, including compliance with the requirements for limiting the micro-acceleration module in the working area of technological equipment and effective control of this implementation. The developed technique can be used in the design of a small spacecraft for technological purposes.

Keywords: design methodology, micro-acceleration, gravity-sensitive processes, microgravity platform, small spacecraft, technological purpose, vibration protection device.

Acknowledgments

The work is carried out within the framework of the State task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FSSS-2023-0007).

References

1. Raykunov G. G., Ezhov S. A., Gusev L. I. Sovremennyye tendentsii v razvitií kosmicheskogo priborostroyeniya i kosmicheskikh informatsionnykh sistem [Current trends in growth of space device engineering and space information systems] // *Raketno-kosmicheskoye priborostroyeniye i informatsionnyye sistemy. Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2014. Vol. 1, no. 1. P. 3–12. EDN: THSWPD. (In Russ.).
2. Sedelnikov A. V., Eskina E. V., Taneyeva A. S., Khnyreva E. S., Matveyeva E. S. Problema obespecheniya i kontrolya trebovaniy po mikrouskorenyam na bortu malogo kosmicheskogo apparata tekhnologicheskogo naznacheniya [The problem of ensuring requirements for microaccelerations on board of small spacecraft] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 2. P. 90–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-90-98. EDN: YNTNVQ. (In Russ.).
3. Klimenko N. N. Smena paradigmy: sozdaniye i primeneniye psevdokosmicheskikh apparatov kak sostavnaya chast' «novoy kosmicheskoy revolyutsii» i «novoy bespilotnoy revolyutsii» [Paradigm shift: development and deployment of high altitude pseudosatellites as a complementary part of «new space revolution» and «new drone revolution»] // *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina. Vestnik NPO IM. S. A. Lavochkina*. 2023. No. 3 (61). P. 3–18. DOI: 10.26162/LS.2023.61.3.001. (In Russ.).
4. Aslanov V. S., Yudinsev V. V. Vybor parametrov sistemy uvoda kosmicheskogo musora s uprugimi elementami posredstvom trosovoy buksirovki [Parameters selection of space debris removal system with elastic elements by cable towing] // *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta. Aerospace MAI Journal*. 2018. Vol. 25, no. 1. P. 7–17. EDN: YSPCOF. (In Russ.).
5. Sedelnikov A. V., Taneyeva A. S. Modelirovaniye polya mikrouskoreniy v zashchishchennoy zone vibrozashchitnykh ustroystv dlya realizatsii gravitatsionno-chuvstvitel'nykh protsessov na bortu malogo kosmicheskogo apparata tekhnologicheskogo naznacheniya [Modeling the micro-acceleration field in the protected zone of vibration-proof devices for implementation of gravity-sensitive processes on board a small technological spacecraft] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 2. P. 65–72. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-65-72. EDN: AJCGPU. (In Russ.).
6. Sedelnikov A. V., Molyavko D. P., Khnyreva E. S. O snizhenii upravlyayemosti kosmicheskogo apparata pri provedenii aktivnogo kontrolya mikrouskoreniy na stadii ekspluatatsii [About decrease in controllability of spacecraft when carrying out active control microaccelerations at the operation stage] // *Aviakosmicheskoye priborostroyeniye. Aerospace Instrument-Making*. 2017. No. 4. P. 25–34. EDN: YUONUD. (In Russ.).
7. Lobykin A. A. Metody uluchsheniya mikrogravitatsionnoy obstanovki na bortu avtomaticheskogo kosmicheskogo apparata, prednaznachennogo dlya mikrogravitatsionnykh issledovaniy [Enhancement of Microgravity Environment on a Board of Automatic Spacecraft for Microgravity Investigations] // *Poverkhnost'. Rentgenovskiy, sinkhrotronnyy i neytronnyy issledovaniya. Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2009. No. 2. P. 84–91. EDN: JVSCLD. (In Russ.).
8. Sedelnikov A. V. Kontrol' mikrouskoreniy kak vazhneyshey kharakteristiki kosmicheskoy laboratorii spetsializirovannogo tekhnologicheskogo naznacheniya konstruktivnymi metodami [Control of microaccelerations as the major characteristics of space laboratory of specialized technological appointment as constructive methods] // *Kontrol'. Diagnostika. Testing. Diagnostics*. 2014. No. 7. P. 57–63. DOI: 10.14489/td.2014.07.pp.057-063. EDN: SGPIKR. (In Russ.).
9. Elkin K. S., Ivanov A. I., Neznamova L. O., Prudkoglyad V. O. Perspektivy sozdaniya vakuumnnykh i gravitatsionno-chuvstvitel'nykh tekhnologiy, ispol'zuyushchikh usloviya kosmicheskogo poleta na okolozemnykh orbitakh. Issledovaniye gravitatsionno-chuvstvitel'nykh yavleniy na bortu otechestvennykh kosmicheskikh apparatov [Prospects for creation of vacuum and gravity-sensitive technologies using space flight conditions in near-Earth orbits. Investigation of gravity-sensitive phenomena on

board domestic spacecrafts] / By ed. K. S. Elkina. Moscow, 2013. 306 p. (In Russ.).

10. Wu Q., Liu B., Cui N. [et al.] Tracking Control of a Maglev Vibration Isolation System Based on a High-Precision Relative Position and Attitude Model // *Sensors*. 2019. Vol. 19. 3375. DOI: 10.3390/s19153375. (In Engl.).

11. Liu J., Li Y., Zhang Y. [et al.] Dynamics and control of a parallel mechanism for active vibration isolation in space station // *Nonlinear Dynamics*. 2014. Vol. 76, no. 3. P. 1737–1751. DOI: 10.1007/s11071-014-1242-3. (In Engl.).

12. Borisov A. E., Emel'yanov G. A., Nikitin S. A. Parametricheskaya optimizatsiya sistemy upravleniya avtomaticheskoy povorotnoy vibrozashchitnoy platformy dlya mikrogravitatsionnykh issledovaniy [Parametric system optimization of the management of an automatic rotary vibration-proof platform for the microgravity research] // *Kosmonavtika i raketostroyeniye. Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2013. No. 3 (72). P. 147–155. EDN: RECYIT. (In Russ.).

13. Zhu T., Cazzolato B., Robertson W. S. P. [et al.] Vibration isolation using six degree-of-freedom quasi-zero stiffness magnetic levitation // *Journal of Sound and Vibration*. 2015. Vol. 358. P. 48–73. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.07.013. (In Engl.).

14. Grodinsky C. M., Whorton M. S. A Survey of Active Vibration Isolation Systems for Microgravity Applications // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2000. Vol. 37, no. 5. P. 586–596. DOI: 10.2514/2.3631. (In Engl.).

15. Liu C., Jing X., Daley S. Recent advances in microvibration isolation // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 56–57. P. 55–80. DOI: 10.1016/j.ymsp.2014.10.007. (In Engl.).

16. Wang S., Hou L., Meng Q. [et al.] Three-magnet-ring quasi-zero stiffness isolator for low-frequency vibration isolation // *International Journal of Mechanical System Dynamics*. 2024. Vol. 4, no. 2. P. 153–170. DOI: 10.1002/msd2.12107. (In Engl.).

17. Xie D., Zheng Z., Zhu Y. Design of a two-degree-of-freedom magnetic levitation vibration energy harvester for bridge vibration response analysis // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, no. 4. e26000. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26000. (In Engl.).

18. Ming C., Xing J., Chen Z. [et al.] Design, analysis and experimental investigation on the whole-spacecraft vibration isolation platform with magnetorheological dampers // *Smart Materials and Structures*. 2019. Vol. 28, no. 7. 075016. DOI: 10.1088/1361-665X/ab0ebe. (In Engl.).

19. Wang A., Wang S., Xia H. [et al.]. Dynamic Modeling and Control for a Double-State Microgravity Vibration Isolation System // *Microgravity Science and Technology*. 2023. Vol. 35, no. 1. 9. DOI: 10.1007/s12217-022-10027-8. (In Engl.).

20. Edberg D., Boucher R., Nurre G. S. [et al.] Performance assessment of the STABLE Microgravity Vibration Isolation Flight Demonstration // *38th Conference Structures, Structural Dynamics, and Materials*. 1997. DOI: 10.2514/6.1997-1202. (In Engl.).

21. Jones D. I., Owens R. G., Owen A. R. A microgravity isolation mount // *Acta Astronautica*. 1987. Vol. 15, no. 6–7. P. 441–448. (In Engl.).

22. Whorton M. S. g-LIMIT — A microgravity vibration isolation system for the International Space Station // *Conference and Exhibit on International Space Station Utilization*. 2001. DOI: 10.2514/6.2001-5090. (In Engl.).

23. Dong W., Duan W., Liu W. [et al.] Microgravity disturbance analysis on Chinese space laboratory // *npj Microgravity*. 2019. Vol. 5, no. 1. DOI: 10.1038/s41526-019-0078-z. (In Engl.).

24. Qian Y., Xie Y., Jia J. [et al.] Development of Active Microvibration Isolation System for Precision Space Payload // *Applied Science*. 2022. Vol. 12. 4548. DOI: 10.3390/app12094548. (In Engl.).

25. Kim Y., Kim S., Park K. Magnetic force driven six degree-of-freedom active vibration isolation system using a phase compensated velocity sensor // *Review of Scientific Instruments*. 2009. Vol. 80. 045108. DOI: 10.1063/1.3117462. (In Engl.).

26. Zhongxiang Y., Zhengguang Zh., Lizhan Z. [et al.]. Microvibration isolation in sensitive payloads: methodology and design // *Nonlinear Dynamics*. 2023. Vol. 111, no. 21. P. 1–49. DOI: 10.1007/s11071-023-08943-4. (In Engl.).

27. Sedelnikov A. V., Taneyeva A. S. Kontseptual'naya model' malogo kosmicheskogo apparata tekhnologicheskogo naznacheniya [Conceptual model of a technological purpose small spacecraft] // *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. Aerospace MAI Journal*. 2024. Vol. 31, no. 2. P. 44–55. EDN: WVCFSZ. (In Russ.).

28. Sazonov V. V., Chebukov S. Yu., Abrashkin V. I. [et al.] Analiz nizkochastotnykh mikrouskoreniy na borte ISZ FOTON-11 [Low-frequency microaccelerations onboard the foton-11 satellite] // *Kosmicheskiye issledovaniya. Cosmic Research*. 2001. Vol. 39, no. 4. P. 419–435. EDN: OUWKOJ. (In Russ.).

29. Abrashkin V. I., Bogoyavlenskiy N. L., Voronov K. E. [et al.] Nepravlyayemoye dvizheniye sputnika Foton M-2 i kvazistaticheskoye mikrouskoreniya na ego borte [Uncontrolled motion of the Foton M-2 satellite and quasistatic microaccelerations on its board] // *Kosmicheskiye issledovaniya. Cosmic Research*. 2007. Vol. 45, no. 5. P. 450–471. EDN: IAQPJV. (In Russ.).

30. Abrashkin V. I., Voronov K. E., Piyakov I. V. [et al.] Vrashchatel'noye dvizheniye sputnika FOTON M-4 [Rotational motion of Foton M-4] // *Kosmicheskiye issledovaniya. Cosmic Research*. 2016. Vol. 54, no. 4. P. 315–322. DOI: 10.7868/s0023420616040014. EDN: WDORML. (In Russ.).

SEDELNIKOV Andrey Valeryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Space Engineering Department, Samara National Research University (Samara University), Samara

SPIN-code: 3987-6997

AuthorID (SCOPUS): 23013232300

ORCID: 0000-0003-2698-1348

ResearcherID: G-4444-2017

TANEEVA Anastasiya Sergeevna, Graduate Student of Space Engineering Department, Engineer of NII-219 (Research Institute of Space Engineering), Engineer and Assistant of Space Engineering Department, Samara University, Samara.

SPIN-code: 8816-1930

AuthorID (SCOPUS): 57205365815

ORCID: 0000-0002-8531-760X

For citations

Sedelnikov A. V., Taneeva A. S. Methodology of designing a small spacecraft for technological purposes // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, No. 4. P. 73–79. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-73-79.

Received August 06, 2024.

© A. V. Sedelnikov, A. S. Taneeva