

Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
 Russian Journal of Astrophysical Research. Series A
 Issued since 2013.
 E-ISSN: 2413-7499
 2025. 11(1): 9-13

DOI: 10.13187/rjar.2025.1.9

<https://rjar.cherkasgu.press>


Analysis of Methods for Passive Vibration Isolation of Precision Equipment on Spacecraft

Roman A. Chesnokov ^{a,*}, Kirill R. Bezzubtsev ^a

^aRyazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russian Federation

Abstract

The relevance of research in the field of spacecraft vibration isolation is driven by the need to develop modern and advanced space technologies. This paper examines the main methods of vibration protection for precision equipment and analyzes passive vibration isolation methods. The analysis revealed that creating a vibration isolation system requires consideration of numerous factors determined by mission requirements, and existing vibration protection methods are adequate for the task. However, given the promising development of composite and multi-component materials, their use in these technologies should be emphasized. This will significantly improve the performance of many devices (such as weight and wear resistance), which will further accelerate the development of the space industry.

Keywords: vibration isolation, spacecraft, passive vibration isolation, precession equipment.

1. Введение

Вибрация, или механические колебания, представляет собой повсеместно распространенное явление, играющее ключевую роль в самых различных областях – от фундаментальной физики и машиностроения до биологии и медицины. Под вибрацией понимают движение точки, тела или системы тел, при котором происходят периодические или квазипериодические отклонения от некоторого среднего положения во времени.

2. Обсуждение

Современные космические аппараты, особенно научные и технологические платформы, требуют обеспечения высокого уровня стабильности и точности функционирования. Такие миссии, как космические телескопы (например, "Джеймс Уэбб"), гравитационно-волновые обсерватории (LISA Pathfinder), критичны к уровню механических колебаний, поскольку требуют достаточно точной юстировки (Герасимчук и др., 2018). Кроме того, вибрации оказывают большое значение на точность гироскопических приборов (Кузнецов, 2025) и другого прецизионного бортового оборудования (Жуков и др., 2021).

Источники вибраций многообразны и действуют как на этапе выведения (высокоамплитудные, широкополосные нагрузки от работы двигателей и аэродинамических возмущений), так и на орбите (низкоамплитудные, но постоянные возмущения от работы двигателей-маховиков, насосов, систем терморегулирования и разворачиваемых механизмов).

* Corresponding author

E-mail addresses: ra.chesnokov@yandex.ru (R.A. Chesnokov)

Воздействие этих вибраций приводит к деградации характеристик оптических систем, снижению точности научных измерений, накоплению усталостных повреждений конструкции и, в конечном счете, к сокращению срока активного существования космических аппаратов. В отдельных случаях вибрации даже влияют на баллистические параметры космического аппарата (Ростовский и др., 2021). В связи с этим, разработка эффективных систем виброизоляции является актуальной научно-технической задачей, решение которой напрямую влияет на успех космических миссий (Тестоедов и др., 2010).

В настоящее время проблема виброзащиты решается либо путем расчетов (Макаров, 2001), либо в ходе наземной отработки агрегатов и узлов (Ефанов, Кузнецов, 2017).

3. Результаты

Виброизоляция в космических аппаратах направлена на ослабление передачи вибрационной энергии от источника (например, платформы или ракеты-носителя) к защищаемому объекту (полезной нагрузке). Различают следующие виды виброизоляции.

Пассивная виброизоляция. Данный метод основан на использовании упругодемпфирующих элементов без внешнего источника энергии. К пассивным системам относятся: пружинные и эластомерные демпферы, метод инерционной изоляции (использование промежуточной инерционной массы), структуры с высоким внутренним демпфированием (применение композитных материалов с интегрированными демпфирующими прослойками для рассеивания вибрационной энергии в самой конструкции).

Активная виброизоляция. Активные системы используют внешний источник энергии для генерации управляющего силового воздействия, компенсирующего вибрацию. Активная виброизоляция способна эффективно подавлять низкочастотные вибрации (менее 100 Гц), что является их ключевым преимуществом перед пассивными системами. Однако они сложнее, дороже, потребляют энергию и требуют высокой надежности системы управления.

Гибридная виброизоляция. Гибридные системы комбинируют пассивные и активные элементы, стремясь объединить их достоинства.

На данный момент пассивная виброизоляция остается доминирующим и наиболее популярным видом защиты прецессионного оборудования от вибраций в первую очередь благодаря своей надежности и отказоустойчивости. Наряду с надежностью, решающую роль играют простота конструкции и технологическая отработанность (Жуков и др., 2021). Общая работа устройств виброизоляции представлена на Рисунке 1.



Рис. 1. Общее устройство работы виброизоляции

Первостепенно, при создании полноценной пассивной виброизоляционной системы необходимо учитывать принципы конструкционного демпфирования, то есть способность самих космических аппаратов гасить вибрации. Для этого применяется метод нормирования зазоров и люфтов. Этот метод примется, например, в узлах соединения раскрываемых элементов, таких как панели солнечных батарей, после их приведения в рабочее положение. Результаты экспериментов, представлены в виде зависимостей логарифмического декремента затухания от амплитуды, наглядно продемонстрировали эффективность метода. Было установлено, что при введении зазоров в замках порядка $0,25 \cdot 10^{-3}$ м и люфта в подкосе $0,5 \cdot 10^{-3}$ м коэффициент демпфирования δ возрастал более чем в 10 раз — с 0,05 до 0,55. Анализ показал, что демпфирование колебаний с использованием люфтов и зазоров является наиболее эффективным в области значительных амплитуд, превышающих $5,0 \cdot 10^{-3}$ м. На Рисунке 2 представлены зависимости коэффициентов демпфирования при разных постановках зазоров (Телепнев и др., 2019).

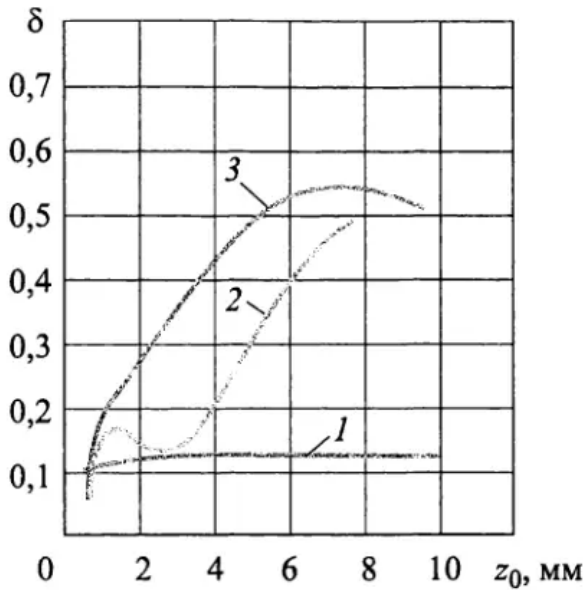


Рис. 2. Зависимость коэффициентов демпфирования от постановки зазоров:

1 – без установки зазоров, 2 – установка зазоров в замках, 3 – установка зазоров на стержнях

После создания виброизоляционной основы, необходимо делать упор на защиту конкретного оборудования, определёнными классами пассивной виброизоляции.

Наиболее распространенным классом являются виброизоляторы на основе упругих элементов. К ним относятся металлические пружины и эластомерные демпферы.

Пружинные виброизоляторы характеризуются линейной жесткостной характеристикой и высокой стабильностью параметров в условиях вакуума и температурных перепадов. Однако они обладают недостаточным внутренним демпфированием, что требует применения дополнительных демпфирующих элементов.

Эластомерные демпферы, основанные на явлении внутреннего трения в полимерных материалах, обеспечивают комплексное решение задач виброизоляции и демпфирования. К их недостаткам следует отнести релаксационные процессы в материале и ограниченный температурный диапазон эксплуатации.

Так же особый класс составляют виброизоляторы сухого трения, к которым относятся проволочные сеточные демпферы и металлорезиновые элементы. Их рабочий механизм основан на диссипации энергии за счет фрикционного взаимодействия структурных элементов. Проволочные сеточные демпферы демонстрируют высокую стабильность характеристик в экстремальных условиях и эффективное демпфирование в широком частотном диапазоне.

Металлорезиновые элементы, представляющие собой объемные структуры из спрессованной металлической проволоки, сочетают упругие свойства с нелинейным демпфированием, что обуславливает их устойчивость к терморadiационному воздействию.

Для особо ответственных применений, требующих обеспечения микрогравитационных условий, применяются пневматические и гидропневматические системы. Их работа основана на использовании сжимаемости газообразных рабочих сред в сочетании с жидкостным демпфированием. Данные системы позволяют достигать высокой степени виброизоляции на инфранизких частотах, однако их конструктивная сложность и потенциальная вероятность утечек ограничивают область применения.

4. Заключение

Анализ средств показывает, что для создания виброизоляционной системы необходимо учитывать множество факторов, определяемых требованиями миссий. На наш взгляд, существующие способы виброзащиты справляются с поставленными им задачами. Однако, учитывая перспективы развития композитных, многосоставных материалов следует делать упор в их применении в данных технологиях. Это позволит значительно

улучшить характеристики многих устройств (такие как масса, износостойкость), что в дальнейшем приведёт к ускорению развития космической сферы.

Литература

Герасимчук и др., 2018 – Герасимчук В.В. и др. Обеспечение точности юстировки современных космических телескопов на стенде прецизионной сборки и испытаний // *Космонавтика и ракетостроение*. 2018. № 5 (104). С. 130-138.

Ефанов, Кузнецов, 2017 – Ефанов В.В., Кузнецов Д.А. Методический аппарат обеспечения виброзащиты космических конструкций / *Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований*. М.: НПО Лавочкина, 2017. С. 279-284.

Жуков и др., 2021 – Жуков Ю.А. и др. Виброзащита прецизионного оборудования космических аппаратов от внутренних источников возмущений // *Космические аппараты и технологии*. 2021. Т. 5. № 4 (38). С. 217-226.

Кузнецов, 2025 – Кузнецов Д.А. К вопросу лабораторных исследований по созданию системы виброизоляции бортовых гироскопических устройств / *Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований*. М.: НПО им. С.А. Лавочкина, 2015. С. 200-203.

Макаров, 2001 – Макаров С.С. Моделирование поведения летательного аппарата на пусковом столе // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2001. № 1. С. 45-47.

Ростовский и др., 2021 – Ростовский В.В. и др. Способ оценки и уменьшения влияния колебаний нежестких конструкций на ориентацию космического аппарата / *Решетневские чтения: Материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева*. В 2-х частях. Красноярск, 2021. С. 50-51.

Телепнев и др., 2019 – Телепнев П.П. и др. Основы проектирования виброзащиты космических аппаратов: учебное пособие / Под ред. В.В. Ефанова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 102 с.

Тестоедов и др., 2010 – Тестоедов Н.А. и др. Комплексный подход к механическим испытаниям агрегатов исполнительной автоматики космических аппаратов // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва*. 2010. № 1 (21). С. 97-102.

References

Efanov, Kuznetsov, 2017 – Efanov, V.V., Kuznetsov, D.A. (2017) Metodicheskii apparat obespecheniya vibrozashchity kosmicheskikh konstrukttsii [Methodological apparatus for ensuring vibration protection of space structures]. *Aktual'nye voprosy proektirovaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamental'nykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy*. M.: NPO Lavochkina. Pp. 279-284. [in Russian]

Gerasimchuk i dr., 2018 – Gerasimchuk, V.V. i dr. (2018). Obespechenie tochnosti yustirovki sovremennykh kosmicheskikh teleskopov na stende pretsizionnoi sborki i ispytaniy [Ensuring the accuracy of alignment of modern space telescopes on a precision assembly and test rig]. *Kosmonavtika i raketostroenie*. 5(104): 130-138. [in Russian]

Kuznetsov, 2025 – Kuznetsov D.A. (2015). K voprosu laboratornykh issledovaniy po sozdaniyu sistemy vibroizolyatsii bortovykh giroskopicheskikh ustroystv [On the issue of laboratory research on the development of a vibration isolation system for onboard gyroscopic devices]. *Aktual'nye voprosy proektirovaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamental'nykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy*. M.: NPO im. S.A. Lavochkina. Pp. 200-203. [in Russian]

Makarov, 2001 – Makarov, S.S. (2001). Modelirovanie povedeniya letatel'nogo apparata na puskovom stole [Modeling of aircraft behavior on the launch pad]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 1: 45-47. [in Russian]

Rostovsky i dr., 2021 – Rostovsky, V.V. i dr. (2021) Sposob otsenki i umen'sheniya vliyaniya kolebaniy nezhestkikh konstrukttsii na orientatsiyu kosmicheskogo apparata [A method for assessing and reducing the impact of non-rigid structure oscillations on spacecraft orientation]. *Reshetnevskie chteniya: Materialy XXV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*,

posvyashchenoi pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva. V 2-kh chastyakh. Krasnoyarsk. Pp. 50-51. [in Russian]

[Telepnev i dr., 2019](#) – *Telepnev, P.P. i dr. (2019). Osnovy proektirovaniya vibrozashchity kosmicheskikh apparatov [Fundamentals of Spacecraft Vibration Protection Design]. Pod red. V.V. Efanova. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana. 102 p. [in Russian]*

[Testoyedov i dr., 2010](#) – *Testoyedov, N.A. i dr. (2010) Kompleksnyi podkhod k mekhanicheskim ispytaniyam agregatov ispolnitel'noi avtomatiki kosmicheskikh apparatov [An integrated approach to mechanical testing of spacecraft automatic control units]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva. 1(21): 97-102. [in Russian]*

[Zhukov i dr., 2021](#) – *Zhukov, Yu.A. i dr. (2021) Vibrozashchita pretsizionnogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov ot vnutrennikh istochnikov vozmushchenii [Vibration Protection of Precision Spacecraft Equipment from Internal Sources of Disturbances]. Kosmicheskie apparaty i tekhnologii. 5(4): 217-226. [in Russian]*

Анализ способов пассивной виброизоляции прецизионного оборудования космических аппаратов

Роман Анатольевич Чесноков ^{a, *}, Кирилл Романович Беззубцев ^a

^a Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Российская Федерация

Аннотация. Актуальность исследований в области виброизоляции космических аппаратов обусловлена необходимостью развития современных и перспективных космических технологий. В ходе выполнения работы рассмотрены основные способы виброзащиты прецессионного оборудования, и произведён анализ методов пассивной виброизоляции. Анализ показал, что для создания виброизоляционной системы необходимо учитывать множество факторов, определяемых требованиями миссий, а существующие способы виброзащиты вполне справляются с поставленными задачами. Однако, учитывая перспективны развития композитных, многосоставных материалов следует делать упор в их применении в данных технологиях. Это позволит значительно улучшить характеристики многих устройств (такие как масса, износостойкость), что в дальнейшем приведёт к ускорению развития космической сферы.

Ключевые слова: виброизоляция, космический аппараты, пассивная виброизоляция, прецессионное оборудование.

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: ra.chesnokov@yandex.ru (Р.А. Чесноков)