

Снижение уровня виброактивности применением демпфирующего покрытия с подкрепляющим слоем

Герасимчук В.В.*, Телепнев П.П.**

*Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина,
ул. Ленинградская, 24, Химки, Московская область, 141400, Россия*

**e-mail: gerasimchuk@laspance.ru*

***e-mail: telepnev@laspance.ru*

Статья поступила 30.06.2021

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментальных исследований эффективности применения демпфирующего покрытия для снижения виброактивности исполнительных органов. При работе таких механизмов, кроме управляющих воздействий системы ориентации, возникают негативные силы и моменты, передаваемые по конструкции космического аппарата на прецизионную аппаратуру, вызывая её ненадлежащее функционирование. Экспериментально установлено, что применение демпфирующего покрытия позволяет (до 7%) снизить уровень вибронегруженности конструкции космического аппарата во всем частотном диапазоне работы электромеханических исполнительных механизмов. А в пиковых областях высокочастотных колебаний возможно значительно (до 15%) уменьшить уровень амплитуды резонансных частот за счёт большего поглощения энергии подкрепляющего слоя подвергающегося циклическим деформациям демпфирующего материала. Применение демпфирующего покрытия может позволить снизить уровень виброактивности уменьшением амплитуды резонансных частот пика конкретной

формы колебаний. Предложены рекомендации по выбору мест установки демпфирующего покрытия с подкрепляющим слоем.

Ключевые слова: вибрация, демпфирующее покрытие, космический аппарат.

Проблема снижения вредных воздействий, вызываемых колебаниями электромеханических исполнительных органов (ЭМИО), на исправную работу высокоточного прецизионного оборудования [1] космических аппаратов (КА) обусловлена требованиями реализации всех преимуществ орбитальных телескопов – необходимости стабилизировать во время наблюдений их угловое положение с очень высокой точностью – меньше радиуса дифракционного изображения, иногда составляющего доли угловой секунды [2].

На примере ЭМИО системы ориентации исследована возможность снижения вибронагруженности прецизионного оборудования КА посредством применения демпфирующего покрытия [3]. В качестве исполнительных механизмов системы ориентации широкое распространение получили управляемые ЭМИО [4], представляющие собой электродвигатели, на валу которых установлен маховик, а управление ориентацией КА осуществляется в соответствии с законом сохранения кинетического момента [5]:

$$M_{\text{уп}} = \frac{dH}{dt} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt},$$

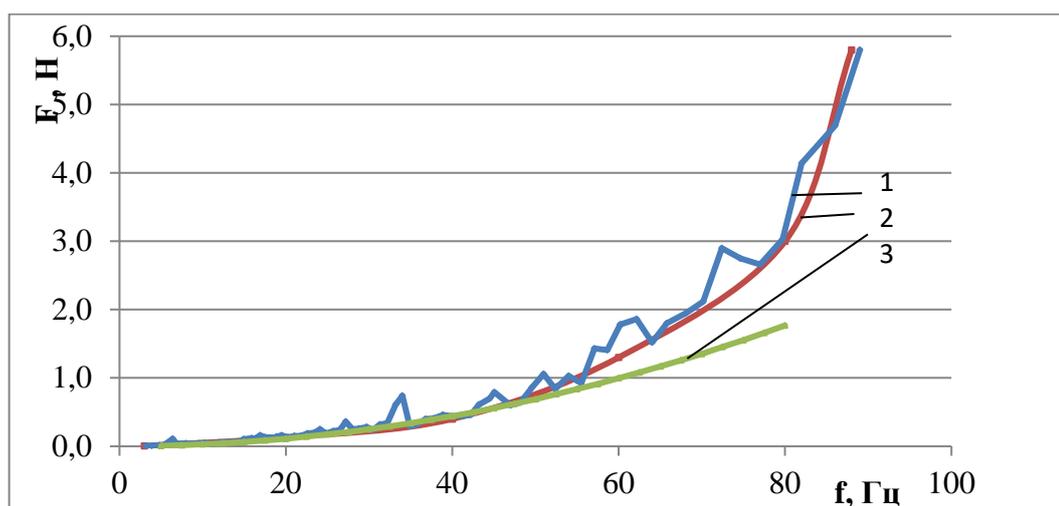
где H – кинетический момент ЭМИО;

J – момент инерции ротора;

Ω – угловая скорость вращения ротора.

При работе данных механизмов, кроме управляющих воздействий системы ориентации, возникают негативные силы и моменты, передаваемые по конструкции КА на прецизионную аппаратуру, вызывая её ненадлежащее функционирование [6].

Возникает актуальная научно-техническая задача обеспечения допустимого уровня вибронагруженности прецизионного оборудования КА при работе ЭМИО в сложных условиях нагружения (рис.1), когда возмущения, имея низкий амплитудный уровень, обладают плотным низкочастотным спектром, создавая значительные силомоментные воздействия [7].



1 – реального ЭМИО; 2 – идеализированная; 3 – требуемый уровень вибронейтральной нагрузки

Рисунок 1. Вибрационная характеристика ЭМИО

Многослойные демпфирующие покрытия с подкрепляющими слоями часто используются для повышения демпфирующих свойств конструкции [8]. Устройства поверхностного демпфирования относятся к классическому способу демпфирования колебаний со свободным слоем, зависящих от характера преобладающих деформаций в демпфирующем слое (по международной классификации, FLD – Free Layer

Damping [9]). В соответствии с этим способом демпфирующий слой из вязкоупругого материала неподвижно соединяется с демпфируемой тонкостенной конструкцией с одной или двух сторон. Изгиб элемента конструкции при поперечных колебаниях вызывает в демпфирующем слое циклические деформации растяжения-сжатия и соответствующие им демпфирующие силы.

В качестве демпфирующего покрытия исследовалось вибропоглощающее самоклеющееся покрытие (ВИП) СКЛГ-6020 (основные характеристики приведены в таблице), представляющее собой многослойный листовый материал из алюминиевой фольги и полимерных прослоек на основе каучуков.

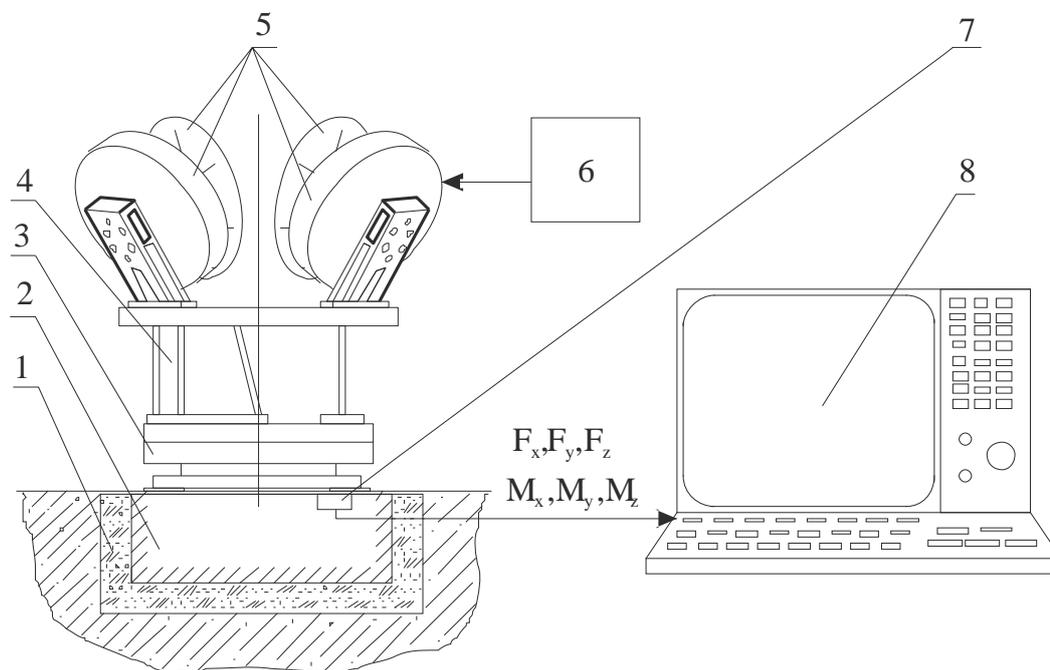
Т а б л и ц а

Основные характеристики СКЛГ-6020

характеристика, единица измерения	значение
Температурный интервал эффективности, °С	-50. . .+100
Коэффициент потерь	0,09
Масса 1 м ² , кг	1,2. . .1,3
Толщина однослойного покрытия, мм	1,1

Экспериментальная установка (рис.2) состояла из многокомпонентной измерительной платформы [10], на которой закреплялась рама с 4 ЭМИО (3 массо-инерционных макета и один штатный). Рама представляла из себя силовую алюминиевую пространственную конструкцию из вертикальных ребер с опорными пятками и верхней горизонтальной плиты с четырьмя кронштейнами под крепление ЭМИО [11]. Вибропоглощающее самоклеющееся покрытие закреплялось на поверхности рамы. Силомоментные реакции и возникающие виброускорения, с акселерометров, дополнительно установленных на кронштейнах крепления и верхней

пластине рамы, обрабатывались в системе приема, регистрации и обработки информации со специальным программным обеспечением [12].



1 – сейсморазвязанный фундамент; 2 – плита силоизмерительной платформы; 3 – силоизмерительный стенд; 4 – рама; 5 – ЭМИО; 6 – управляющая аппаратура; 7 – датчики силомоментные; 8 – система приема, регистрации и обработки информации

Рисунок 2. Блок-схема испытательного стенда

Анализ влияния применения демпфирующего материала проводился путём сравнения силомоментных реакций и виброускорений от воздействий, создаваемых ЭМИО на места крепления рамы к силомоментному стенду для вариантов «без» и «с» применением демпфирующего материала (рис.3). В процессе испытаний регистрировались силы и моменты, создаваемые ЭМИО в режиме «выбега» при различных скоростях вращения ротора (до 6000 об/мин). Также была произведена непрерывная запись в файлы значений сил и моментов [13], создаваемых работой ЭМИО, в режиме разгона от нулевого значения частоты вращения ротора ЭМИО до

6000 об/мин и в режиме торможения от 6000 об/мин до нулевого значения частоты вращения ротора ЭМИО [14].

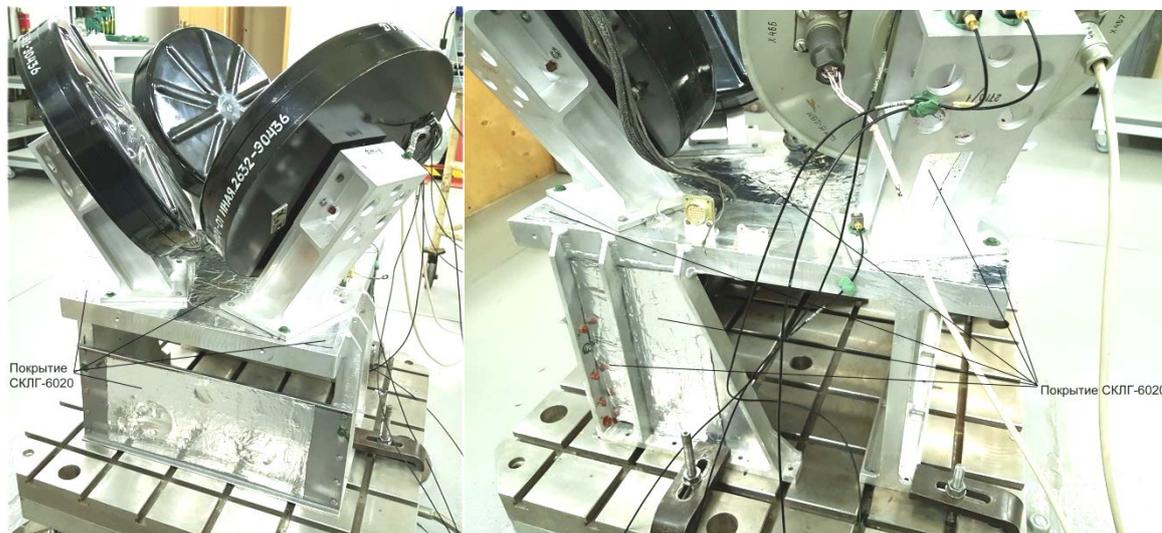


Рисунок 3. Установка ЭМИО с демпфирующим покрытием

Сравнительный анализ выявил, что применение демпфирующего покрытия способно незначительно (до 5...7%) снизить уровень вибронагруженности от ЭМИО, передаваемый с рамы на конструкцию КА. График на рисунке 4 демонстрирует сравнительную АЧХ по оси X для режима 1000об/мин [15]. Вместе с этим установлено значительное снижение передаваемых виброускорений в полосе частот 1200...1700 Гц, которая явилась «антирезонансной» полосой, когда применение демпфирующего покрытия позволило «срезать» амплитуды резонансных частот, а покрытие продемонстрировало (рис.5) эффективность и способность обеспечить демпфирование для конкретной формы колебаний [16].

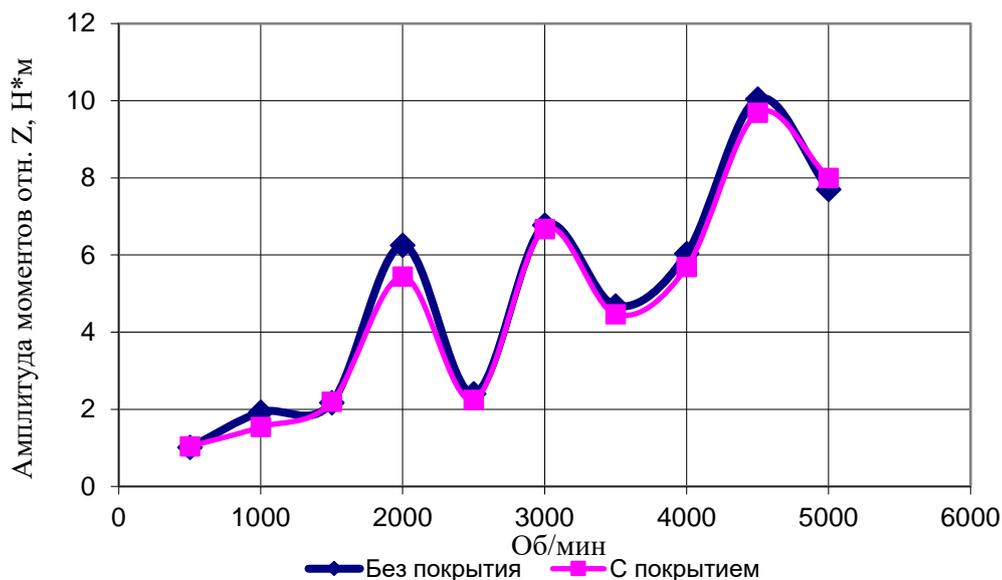


Рисунок 4. АЧХ моментов в зависимости от применения демпфирующего покрытия

Таким образом, экспериментальное исследование эффективности применения демпфирующего покрытия для снижения вибронгруженности от исполнительных органов позволило сделать ряд выводов.

Демпфирующее покрытие следует крепить в местах максимальных напряжений при колебаниях [17]. В этом случае подвергающийся циклическим деформациям демпфирующий материал имеет большие амплитуды деформаций, которые приводят к большему поглощению энергии в материале, что в свою очередь вызывает рост его температуры, поэтому оба эффекта - температурный и амплитудный – проявляются одновременно [18]. Однако в переходной области, где модуль упругости и коэффициент потерь изменяются в зависимости от температуры относительно медленно, влияние температуры становится вторичным по сравнению с влиянием амплитуды динамических деформаций [19]. Зависимость модуля упругости от амплитуды динамических деформаций определяется структурой

материала и характеризуется нелинейностью из-за релаксации на точечных дефектах при перестройке внутренней структуры материала [20].

Следует иметь в виду, что у разных форм колебаний при широкополосном спектре частот возмущений, будет определенная форма и частота, в которую внешние силы и моменты «перекачивают» основную энергию воздействия, и именно эта форма будем оптимальной для обеспечения максимального снижения вибронагруженности.

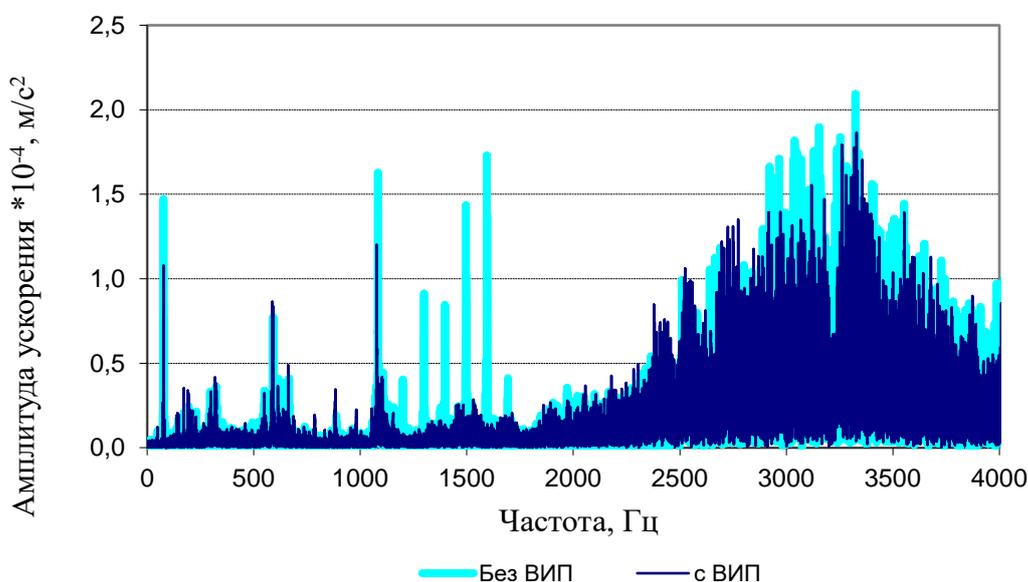


Рисунок 5. Амплитуды ускорений в зависимости от применения виброизолирующего покрытия (ВИП)

Работоспособность демпфирующего покрытия напрямую зависит от качества крепления и правильности покрытия поверхности конструкции (важно оптимальное расположение демпфирующего покрытия от формы поверхности). Поэтому для определения мест возникновения максимальных напряжений изгибных колебаний необходимо знание представляющих интерес форм колебаний [21].

Библиографический список

1. Токовинин А.А. Орбитальные оптические телескопы. - М.: Знание, 1986. - 64 с.
2. Герасимчук В.В., Герасимчук Л.В., Ермаков В.Ю., Ефанов В.В., Карчаев Х.Ж., Кузнецов Д.А., Телепнев П.П., Цыплаков А.Е. Обеспечение точности юстировки современных космических телескопов на стенде прецизионной сборки и испытаний // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 5. С. 130 - 138.
3. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний. - М.: Мир, 1988. - 448 с.
4. Ермаков В.Ю. Применение магнитожидкостного эффекта для снижения статического и динамического дисбаланса от подвижных масс приводных устройств // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105679>
5. Фролов К.В. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти томах. Защита от вибраций и ударов. – М.: Машиностроение, 1985. Т. 6. - 456 с.
6. Воронцов В.А., Карчаев Х.Ж., Мартынов М.Б., Примаков П.В. Программа исследования Венеры и международное сотрудничество // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=65702>
7. Герасимчук В.В., Ефанов В.В., Ермаков В.Ю., Лоханов И.В. и др. Решение задачи обеспечения допустимых уровней вибронагруженности исполнительных органов системы ориентации космического аппарата // Полёт. 2018. № 8. С. 33 - 38.
8. Машиностроение. Энциклопедия. Т. 1-3. Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин / Под ред. К.С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1994. Кн. 1. - 534 с.

9. ASTM E756-05. Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials, USA, ASTM International, 2017, 14 p.
10. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. – М.: Машиностроение, 2007. - 256 p.
11. Амирьянц Г.А., Малютин В.А. Об экспериментальном определении жесткостных характеристик авиационных конструкций // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100600>
12. Фирсанов В.В., Фам В.Т. Напряженно-деформированное состояние сферической оболочки на основе уточненной теории // Труды МАИ. 2019. № 105. URL <http://trudymai.ru/published.php?ID=104174>
13. Деменко О.Г., Бирюков А.С., Зверев М.А. Использование ударных испытаний для оценки несущей способности элементов основной силовой конструкции космических аппаратов, выполненных из композитных материалов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2020. № 3. С. 38 - 45.
14. Архангелов А.Г., Рулёв С.В., Ермаков В.Ю., Герасимчук В.В. Программа управления магнитожидкостной системой виброзащиты. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616337, 2018.
15. Михалёв С.М. Адаптация аэрокосмической системы к выведению спутников на высокоэнергетические орбиты // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105690>
16. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. - М.: Мир, 1989. – 624 с.
17. Ross D. Mechanics of Underwater Noise. Oxford, Pergamon Press, 1976, 370 p.

18. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. - М.: Физматгиз, 1960. – 193 с.
19. Calucio A.C., Deu J.-F., Ohayon R. Finite Element Formulation of Viscoelastic Sandwich Beams Using Fractional Derivation Operators // Computational Mechanics, 2004, vol. 33, issue 4, pp. 282 - 291.
20. Паймушин В.Н. и др. Идентификация характеристик упругости и демпфирования мягких материалов на основе исследования затухающих изгибных колебаний тест-образцов // Механика композитных материалов. 2016. № 4. С. 615 - 644.
21. Stopin G., Tesse C. EP Patent 2474971 A1, 2010. URL: https://translationportal.epo.org/emtp/translate/?ACTION=abstract-retrieval&COUNTRY=EP&ENGINE=google&FORMAT=docdb&KIND=A1&LOCALE=en_EP&NUMBER=2474971&SRCLANG=en&TRGLANG=ru

Reducing vibration activity level by a damping coating with reinforcing layer

Gerasimchuk V.V.*, Telepnev P.P.**

*Lavochkin Research and Production Association, NPO Lavochkin,
24, Leningradskay str., Khimki, Moscow region, 141400, Russia*

*e-mail: gerasimchuk@laspacespace.ru

**e-mail: telepnev@laspacespace.ru

Abstract

The article deals with experimental studies on the vibration level reducing of spacecraft electromechanical actuators by increasing the structure damping properties by application of a multi-layer damping coating with reinforcing layer.

A vibration-absorbing self-adhesive coating made of multilayer aluminum foil and rubber-based polymer interlayers was being studied as a damping coating. A structural element bending at lateral vibrations causes cyclic tensile-compressive deformation in the damping layer and damping forces corresponding to them.

The tests were being performed on a force-measuring test-bench. A frame with a self-adhesive vibration-absorbing coating was fixed on a multicomponent measuring platform, on which electromechanical devices with moving masses were being installed. While these mechanisms operation, besides controlling impacts of the orientation system, negative forces and moments transferred over the spacecraft structure to the precise equipment occur causing its improper functioning. The force-moment reactions and vibration accelerations appearing herewith were being rasterized and processed by the special software.

The authors revealed experimentally that damping coating with a reinforcing layer application could reduce the vibration activity level of a structure in the entire frequency range of electromechanical devices with moving masses (up to 7 %) operation. The levels more meaningful at the vibration activity reduction (up to 15%) were being registered in the peak regions of the high-frequency vibrations.

The experimenters revealed that the damping coating operability directly depends on the fastening quality and correctness of the structure's surface coating. Preliminary shapes determining of the vibrations of interest is required to determine the places of maximum stresses of bending vibrations occurrence. The damping coating should be fixed in the places of maximum stresses occurring at vibrations, so that temperature effect of mechanical energy into heat energy converting, and amplitude-frequency effect of the vibrations damping by the reinforcing layer manifest simultaneously and with maximum effect.

At the authors' opinion, different modes of vibrations with a broadband spectrum of disturbance frequencies will have a certain shape and frequency, into which external forces and moments "pump over" the main energy of disturbance, and it is this shape that will be optimal to ensure maximum reduction in vibration loading. The article suggests recommendations for locations selection for the damping coating with reinforcing layer installing.

The test results may be applied to ensure the vibration loading level reduction of structural elements while a spacecraft design and pilot testing.

Keywords: vibration, damping coating, spacecraft.

References

1. Tokovinin A.A. *Orbital'nye opticheskie teleskopy* (Orbital optical telescopes), Moscow, Znanie, 1986, 64 p.
2. Gerasimchuk V.V., Gerasimchuk L.V., Ermakov V.Yu., Efanov V.V., Karchaev Kh.Zh., Kuznetsov D.A., Telepnev P.P., Tsyplakov A.E. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2018, no. 5, pp. 130 - 138.
3. Nashif A., Dzhouns D., Khenderson Dzh. *Dempfirovanie kolebanii* (Vibrations damping), Moscow, Mir, 1988, 448 p.
4. Ermakov V.Yu. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105679>
5. Frolov K.V. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik v 6-ti tomakh. Zashchita ot vibratsii i udarov* (Vibration and shock protection), Moscow, Mashinostroenie, 1985, vol. 6, 456 p.
6. Vorontsov V.A., Karchaev Kh.Zh., Martynov M.B., Primakov P.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 86. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=65702>
7. Gerasimchuk V.V., Efanov V.V., Ermakov V.Yu., Lokhanov I.V. et al. *Polet*, 2018, no. 8, pp. 33 - 38.
8. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. 1-3. Kniga 1. Dinamika i prochnost' mashin. Teoriya mekhanizmov i mashin* (Mechanical engineering. Encyclopedia. Vol. 1-3. Book 1. Dynamics and strength of machines. Theory of mechanisms and machines), Moscow, Mashinostroenie, 1994, 534 p.

9. ASTM E756-05. *Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials*, USA, ASTM International, 2017, 14 p.
10. Poduraev Yu.V. *Mekhatronika: osnovy, metody, primeneniye* (Mechatronics: fundamentals, methods and application), Moscow, Mashinostroenie, 2007, 256 p.
11. Amir'yants G.A., Malyutin V.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100600>
12. Firsanov V.V., Fam V.T. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104174>
13. Demenko O.G., Biryukov A.S., Zverev M.A. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2020, no. 3, pp. 38 - 45.
14. Arkhangelov A.G., Rulev S.V., Ermakov V.Yu., Gerasimchuk V.V. *Programma upravleniya magnitohidkostnoi sistemoi vibrozashchity. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2016616337*, 2018.
15. Mikhalev S.M. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105690>
16. Fu K., Gonsales R., Li K. *Robototekhnika* (Robotics), Moscow, Mir, 1989, 624 p.
17. Ross D. *Mechanics of Underwater Noise*, Oxford, Pergamon Press, 1976, 370 p.
18. Panovko Ya.G. *Vnutrennee trenie pri kolebaniyakh uprugikh system* (Internal friction during elastic systems vibrations), Moscow, Fizmatgiz, 1960. 193 p.
19. Calucio A.C., Deu J.-F., Ohayon R. Finite Element Formulation of Viscoelastic Sandwich Beams Using Fractional Derivation Operators, *Computational Mechanics*, 2004, vol. 33, issue 4, pp. 282 - 291.

20. Paimushin V.N. et al. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2016, no. 4, pp. 615 - 644.

21. Stopin G., Tesse C. EP Patent 2474971A1, 2010. URL:

[https://translationportal.epo.org/emtp/translate/?ACTION=abstract-](https://translationportal.epo.org/emtp/translate/?ACTION=abstract-retrieval&COUNTRY=EP&ENGINE=google&FORMAT=docdb&KIND=A1&LOCALE=en_EP&NUMBER=2474971&SRCLANG=en&TRGLANG=ru)

[retrieval&COUNTRY=EP&ENGINE=google&FORMAT=docdb&KIND=A1&LOCALE](https://translationportal.epo.org/emtp/translate/?ACTION=abstract-retrieval&COUNTRY=EP&ENGINE=google&FORMAT=docdb&KIND=A1&LOCALE=en_EP&NUMBER=2474971&SRCLANG=en&TRGLANG=ru)

[=en_EP&NUMBER=2474971&SRCLANG=en&TRGLANG=ru](https://translationportal.epo.org/emtp/translate/?ACTION=abstract-retrieval&COUNTRY=EP&ENGINE=google&FORMAT=docdb&KIND=A1&LOCALE=en_EP&NUMBER=2474971&SRCLANG=en&TRGLANG=ru)