

Применение пьезокерамики для подавления вибраций полезной нагрузки многорежимного космического аппарата

© В.Ю. Ермаков, А. Туфан, К.Н. Миланко, С.О. Фирсюк

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Россия

Современная тенденция проектирования космических аппаратов (КА) заключается в использовании больших сложных и легковесных космических конструкций для достижения повышенной функциональности при снижении затрат на запуск. Сочетание в конструкции крупных габаритов и небольшого веса приводит к тому, что получившиеся пространственные конструкции являются чрезвычайно гибкими и имеют низкочастотные основные режимы вибрации, которые могут быть задействованы в различных задачах, таких как поворот, маневры наведения и стыковка с другими КА. Эффективное подавление вибрации представляет собой сложную задачу для разработчиков КА. Один из перспективных методов ее решения — использование встроенных пьезоэлементов в качестве исполнительных механизмов. Представлен анализ различных систем управления встроенными пьезоэлементами для обеспечения виброзащиты полезной нагрузки. Проведены экспериментальные исследования этих систем по определению уровней коэффициента динамичности.

Ключевые слова: пьезокерамика, вибрации упругого тела, пассивное шумотупление, активное управление, пьезоэлемент

Введение. При проектировании космических аппаратов (КА) с прецизионной аппаратурой большое внимание уделяется повышению их функциональности при снижении затрат на запуск. Эти крупногабаритные и легковесные пространственные КА, являющиеся чрезвычайно гибкими, имеют низкочастотный спектр. Низкие частоты проявляются при таких операциях, как поворот, маневры наведения и стыковка с другими КА. Поэтому перед разработчиками КА стоит сложная задача — повысить их функциональные характеристики, а именно уменьшить время затухания колебаний при переориентациях КА и снизить статический и динамический дисбаланс, возникающий от элементов конструкций с подвижными массами (двигателей маховиков, гироскопов, вентиляторов системы терморегулирования и др.), применив системы виброзащиты для эффективного подавления этих вибровозмущений.

Новое направление в системах управляемой виброзащиты КА — применение пьезоэлементов различного назначения, свойства которых

позволяют использовать такие элементы в качестве виброизоляторов для снижения вибровозмущений, поступающих от устройств с подвижными массами. Особенности пьезоэлементов заключаются в том, что, во-первых, они деформируются под действием электрического поля, благодаря чему их можно использовать как возбудители механических колебаний, когда управляющим сигналом служит приложенное напряжение; во-вторых, при деформации они создают электрические напряжения, благодаря чему могут служить датчиками сил, усилий, давлений.

Цель данной работы — виброзащита полезной нагрузки многорежимного КА. В работе представлены результаты экспериментальных исследований виброизоляторов на основе пьезоэлементов с применением пассивного шунтирования и активного управления (в противофазе — синусоидального сигнала с определенной частотой; далее используется термин «частотная модуляция»).

Применение пьезоэлементов в виброзащите КА. Систему управления можно представить следующими управляющими факторами:

- положительной обратной связью;
- линейно-квадратичным гауссовым методом;
- пассивным шунтированием;
- активным управлением и др.

Система управления с положительной обратной связью эффективна при обеспечении высокого демпфирования для определенного режима и проста при эксплуатации.

Линейно-квадратичное управление гауссовым методом обеспечивает надлежащее демпфирование для ряда режимов, однако не может создать хорошее демпфирование во всем диапазоне частот. Его целесообразно использовать для выполнения конкретных требований, например, минимизации перемещения конца гибкой балки. При внедрении данной системы потребуются дополнительные затраты.

Пассивное шунтирование обеспечивается резистором, оптимально настроенным на конкретную резонансную частоту конструкции.

При активном управлении обычно применяют несколько пьезоэлементов, одни из которых выполняют функцию датчиков (от них сигнал проходит через контроллер), другие — служат актуаторами [1]. Пьезоэлементы таких российских производителей, как Научно-исследовательский институт «ЭЛПА» (г. Зеленоград), Южный федеральный университет «Институт высоких технологий» (г. Ростов-на-Дону), Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор» (г. Ростов-на-Дону) показаны на рис. 1.

Для анализа электромеханических систем в основном используются следующие понятия: передаточная функция; наблюдаемость; управляемость.



Рис. 1. Пьезоэлементы российских производителей

Передаточной функцией называют дробно-рациональную функцию, которая представляет собой соотношение преобразования Лапласа выходного сигнала к входному при нулевых начальных условиях и отсутствии внешних возмущений.

Наблюдаемость показывает, реально ли по выходному сигналу в полной мере восстановить все данные и системные состояния.

Управляемость описывает возможность перевода электромеханической системы из одного состояния в другое.

В случае применения системы с положительной обратной связью осуществляется подача координаты положения конструкции упругого элемента непосредственно в компенсатор (пьезоэлемент). При этом скалярное усиление возвращается обратно, обеспечивая быстрое демпфирование для определенного режима.

Наряду с системой с положительной обратной связью существует линейно-квадратичный гауссовский метод [2], управляющий вход которого предназначен для оптимизации взвешенной суммы квадратичных показателей энергии и производительности. Регулируя массу, структура линейно-квадратичного гауссовского расчета может соответствовать конкретным требованиям, например, уменьшать затухание гибкой конструкции для различных тонов колебаний. Управление с обратной связью по скорости деформации используется для активного демпфирования гибкой пространственной конструкции. При таком подходе сигналы с пьезоэлементов подаются обратно в компенсатор, а координаты размещенных пьезоэлементов преобразуются, умножаются на обратный коэффициент усиления и подаются обратно на электроды пьезоэлемента.

Одно из направлений исследований по применению пьезоэлектрических материалов в виброзащите КА связано с пассивным шумотированием пьезоэлементов, настроенных на определенную частоту.

Если конструкция упругого элемента КА имеет другие резонансные частоты, которые ограничивают и ухудшают функционирование КА, то пьезоэлементы могут быть соединены с внешним элементом системы управления. При этом сам пьезоэлемент может быть использован как исполнительный механизм системы управления. Через электроды пьезоэлемент шунтируется некоторым электрическим сопротивлением [3, 4]. Электрическое сопротивление выбирается таким, чтобы произошло поглощение электрической энергии, преобразованной из механической энергии, т. е. возникновение электрической поляризации в кристалле пьезоэлемента под действием механического напряжения.

Под пассивным действием при шунтировании понимается отсутствие источников электропитания в системе. При этом электрический импеданс, т. е. комплексное сопротивление между двумя узлами цепи, характеризуется сопротивлением R , индуктивностью L и емкостью C .

При проектировании и моделировании исполнительных устройств правильный выбор материала является определяющим фактором основных характеристик и функциональных возможностей пьезоэлементов, поэтому необходимо учитывать электромеханические взаимосвязи пьезоэлектрического материала, которые задаются уравнением термодинамического состояния Мэсона

$$\begin{Bmatrix} D \\ S \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon & d \\ d & s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E \\ T \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где D — вектор электрической индукции, Кл/м; S — тензор деформации, Н/м²; ε — диэлектрическая постоянная материала пьезоэлемента, Ф/м; d — пьезоэлектрические постоянные пьезомодуля, определяющие диапазон, в котором осуществляются перемещения исполнительного устройства, Кл/Н; s — коэффициент упругости при короткозамкнутых электродах, м/Н; E — вектор напряженности электрического поля, В/м; T — тензор механического напряжения Н/м².

Преобразуем уравнение (1) к виду

$$\begin{Bmatrix} D \\ T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon - dEp & dEp \\ -dEp & Ep \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E \\ S \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

Уравнение для потенциальной энергии примет вид

$$-U = \frac{1}{2} \int (-TS + DE) dV, \quad (3)$$

где TS — механическая энергия; DE — электрическая энергия.

Уравнения, описывающие работу схемы управления с положительной обратной связью, представлены в виде

$$\begin{cases} \xi(t) + 2\zeta_c\omega_s\xi(t) + \omega_s^2\xi(t) = G\omega_s^2\eta; \\ \eta(t) + 2\zeta_c\omega_c\eta(t) + \omega_c^2\eta(t) = G\omega_c^2\xi, \end{cases} \quad (4)$$

где ξ, η — координаты, описывающие смещение конструкции и конденсатора; ζ_c — коэффициент демпфирования конструкции; ω_s, ω_c — собственные частоты конструкции и компенсатора, с^{-1} ; G — коэффициент усиления обратной связи.

Для того чтобы свести к минимуму перемещение упругого тела, используется метод линейно-квадратичного управления по Гауссу, который относится к современным методам управления. Это — набор методов и математического аппарата теории управления для синтеза систем управления с отрицательной обратной связью для линейных систем с аддитивным гауссовским шумом. При этом шум (совокупность непериодических звуков различной интенсивности и частоты) объекта управления и шум измерения считаются белыми с гауссовым распределением, а управляющее напряжение для исполнительных механизмов определяется оптимальным решением задачи линейно-квадратичного регулятора системы. Решение сводит к минимуму показатель производительности и направлено на поиск компромисса между минимальной энергией и наилучшей производительностью [5, 6], которое задается уравнением

$$J = \int (x \cdot Qx + u \cdot Ru) dt, \quad (5)$$

где x — координата состояния, м; Q и R — весовые матрицы состояний и управляющих напряжений соответственно; u — управляющее напряжение, В.

Поскольку целью в этой задаче является сведение к минимуму смещения и вращения на конце упругого тела, значения веса, соответствующие этим состояниям, выбираются таким образом, чтобы управляющее входное электрическое напряжение на исполнительные механизмы (пьезоэлементы) находилось в пределах их ограничений (150 В).

В проводимых исследованиях по гашению вибрационных возмущений использовалась также шунтированная модель, которая в основном сводилась к выбору вариантов с различными схемами включения резистора. При резистивном шунтировании пьезоэлементов наблюдается частотная зависимость, схожая с той, которая имеет место у упруговязких материалов [7, 8]. Шунтирование с помощью резистора создает электрический резонанс, который может быть оптимально настроен на собственную частоту конструкции.

Свойства трансформации энергии пьезоэлемента устанавливаются коэффициентом электромеханической связи k .

Для одноосного напряжения в линейном приближении для описания обратного пьезоэффекта используется выражение

$$S_j = s_{ij}^E T_j + d_{ij} E_i, \quad (6)$$

а для прямого пьезоэффекта — выражение

$$D_i = d_{ij} T_j + \varepsilon_{ij}^T E_i, \quad (7)$$

где S_j — изменение формы и размеров пьезоэлемента в направлении j , связанное с их перемещением друг относительно друга за счет приложения усилия T_j , Н/м²; s_{ij}^E — коэффициент упругости пьезоэлемента при короткозамкнутых электродах, м/Н; T_j — механическое напряжение, Н/м²; d_{ij} — пьезоэлектрическая постоянная пьезоэлемента, в котором осуществляется перемещение исполнительного устройства, Кл/Н; E_i — напряженность электрического поля, В/м; D_i — электрическая индукция, Кл/м²; ε_{ij}^T — диэлектрическая постоянная материала пьезоэлемента, Ф/м.

Коэффициенты электромеханической связи k , k_{33} , k_{31} описывают способность пьезоэлемента преобразовывать энергию из электрической в механическую, и наоборот. Квадрат коэффициента электромеханической связи определяется отношением запасенной преобразованной энергии одного вида (механической или электрической) к входной энергии второго вида (электрической или механической). Индекс показывает относительные направления электрических и механических величин и вид колебаний. Они могут быть связаны с модой колебаний простого преобразователя определенной формы [9, 10].

Коэффициент электромеханической связи k — наиболее общая энергетическая характеристика пьезоэлемента. Полная энергия W деформированного пьезоэлемента определяется так:

$$W = DE + TS,$$

где DE — энергия электрического поля; TS — энергия, запасенная в механической форме. Коэффициент k показывает, какая часть общей энергии пьезоэлемента преобразуется в механическую TS или электрическую DE форму:

$$k = (TS/W)^{1/2} = (DE/W)^{1/2}.$$

Коэффициент электромеханической связи k зависит не только от свойств материала, но и от направлений, в которых может подводиться и сниматься энергия:

перпендикулярно оси вращения пьезоэлемента

$$k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{\varepsilon_{31}^T s_{11}^E}}, \quad (8)$$

где $d_{31} = 170 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н; $\frac{\varepsilon_{31}^T}{\varepsilon_0} = 1450$; $s_{11}^E = \frac{10^{10}}{7,6}$ м²/Н; $k_{31} = 0,33$;

по оси вращения пьезоэлемента

$$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^T s_{33}^E}}. \quad (9)$$

Здесь $d_{33} = 350 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н; $\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0} = 1750$; $s_{33}^E = \frac{10^{10}}{6,3}$ м²/Н; $k_{31} = 0,67$.

Представленная испытательная установка (рис. 2) состоит из акселерометров типа 4371 Брюль и Къер, полезной нагрузки, системы управления, вибростенда типа 4808 Брюль и Къер, шести пакетов пьезоэлементов ПП-12 (пьезопакет-12). Каждый пакет пьезоэлементов включает в себя девять пластин. Материал пьезоэлементов — ЦТС-19 (цирконат-титанат свинца) [11].

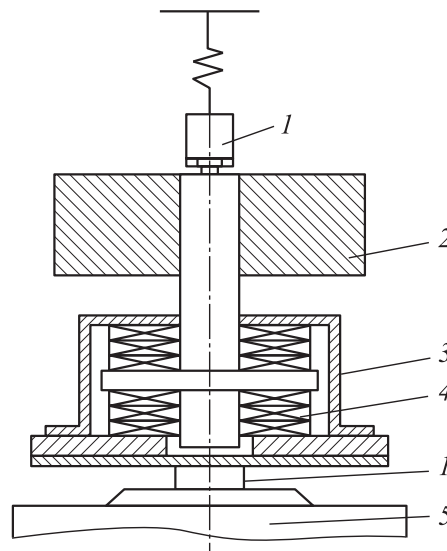


Рис. 2. Схема испытательной установки:

1 — акселерометры; 2 — полезная нагрузка; 3 — система управления;
4 — пьезокерамические элементы; 5 — вибростенд

Общий вид вибростенда для проведения динамических испытаний космического аппарата типа «Искра-5» представлен на рис. 3. Результаты проводимых испытаний в области частот f от 1600 до 3000 с⁻¹ показаны на рис. 4.

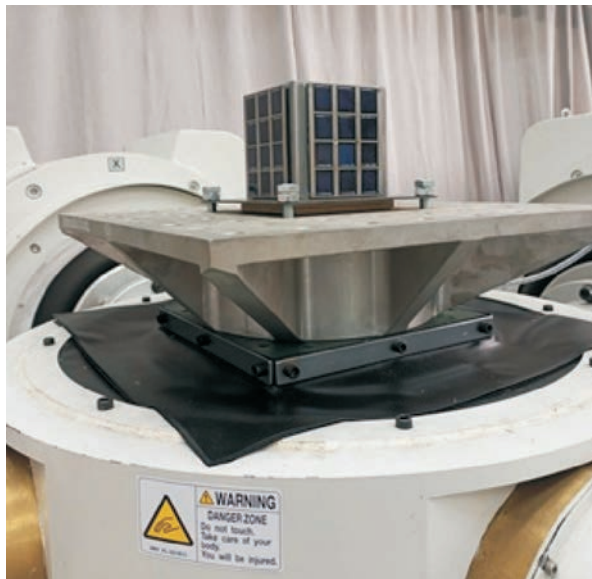


Рис. 3. Вибростенд для проведения динамических испытаний космического аппарата типа «Искра-5»

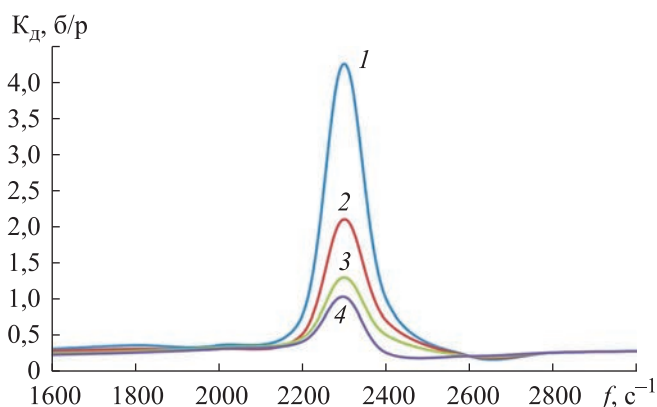


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований:
1 — с разомкнутой системой; 2 — с подключенным сопротивлением;
3 — в противофазе; 4 — частотная модуляция

В результате анализа экспериментальных исследований было получено, что при значении сопротивления, равном 550 Ом, наблюдалось уменьшение коэффициента динамичности K_d в 2 раза по сравнению с разомкнутой системой. Применение в контуре пьезоэлементов активного управления с частотой 2300 с^{-1} и силой тока 0,3 А (в противофазе) показало уменьшение коэффициента динамичности K_d в 3,1 раза.

Использование частотной модуляции, а именно синусоидального сигнала с частотой более 5000 с^{-1} в систему управления, привело к уменьшению K_d в 3,9 раза во всем диапазоне частот по сравнению с разомкнутой системой.

Заключение. При проведении экспериментальных исследований виброизоляторы на основе пьезоэлементов с применением пассивного шунтирования и активного управления (в противофазе, с частотной модуляцией) показали положительный эффект — снижение коэффициента динамичности примерно в 4 раза. При этом было выявлено, что система с пассивным шунтированием обладает такими преимуществами, как компактность и малый вес, а ее недостатком является настройка шунта на одну частоту. При активном управлении преимуществом являются высокие демпфирующие характеристики, недостатком — использование преобразующей высоковольтной электронной аппаратуры, имеющей определенный вес [12–14]. Исходя из вышеизложенного, приходим к выводу, что данная система пьезоэлементов с пассивным шунтированием и активным управлением может быть использована для подавления вибраций упругого тела, размещенного на космических аппаратах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. *Пьезоэлектрические датчики*. Москва, Техносфера, 2006, 632 с.
- [2] Глоzman И.А. *Пьезокерамика*. Москва, Энергия, 1972, 192 с.
- [3] Николаев Ю.Л. Принципы конструирования пьезоэлектрических генераторов микроперемещений. *Автоматизация и современные технологии*, 2000, № 3, с. 10–12.
- [4] Николаев Ю.Л., Вишнеков А.В. Моделирование и компенсация процесса ползучести пьезокерамических исполнительных элементов микроперемещений. *Приборы*, 2012, № 6, с. 44–48.
- [5] Быстров С.В., Бобцов А.А., Бойков В.И., Бушуев А.Б., Григорьев В.В. *Пьезоэлектрический привод*. Пат. № 87043 Российская Федерация, опубл. 20.09.2009, 5 с.
- [6] Крикунов М.М. Исследование динамики пространственного движения тел переменного состава. *Труды МАИ*, 2010, № 41. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=23801>
- [7] Ермаков В.Ю., Телепнев П.П. *Проектирование устройств гашения колебаний конструкции космических аппаратов. Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований*. В.В. Ефанов, К.М. Пичхадзе, ред. В 2 т. Т. 1. Москва, Изд-во МАИ, 2012, с. 434–465.
- [8] Донсков А.В. Анализ современных методов оценки и моделирования рисков возникновения нештатных ситуаций на борту космического аппарата. *Вестник Московского авиационного института*, 2018, т. 25, № 4, с. 163–169.
- [9] Лавриненко В.В., Карташев И.А., Вишневский В.С. *Пьезоэлектрические двигатели*. Москва, Энергия, 1980, 112 с.
- [10] Малов В.В. *Пьезорезонансные датчики*. Москва, Энергоиздат, 1989, 272 с.

- [11] Ермаков В.Ю., Савостьянов А.М., Рулев С.В., Николаев Ю.Л. Разработка и первые экспериментальные исследования виброизоляторов с использованием шунтируемых пьезоэлементов. *Материалы научной конференции Военной академии имени Ф.Э. Дзержинского*, 1993, с. 102–105.
- [12] Николаев Ю.Л., Воронцов А.Л. Расчетно-экспериментальная оценка предельно допустимых деформаций биморфных пьезоэлементов. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 2015, № 6, с. 13–17.
- [13] Fegade P.V., Varjibhe R.B. Reduction in amplitude of vibration using piezoelectric material patch. *International Journal on Emerging Technologies*, 2020, vol. 11 (3), pp. 561–564.
- [14] Katarzyna Bialas. Reduction of vibrations in mechanical systems using piezoelectric elements. *MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 178, art. ID 06023. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817806023>

Статья поступила в редакцию 31.05.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ермаков В.Ю., Туфан А., Миланко К.Н., Фирсюк С.О. Применение пьезокерамики для подавления вибраций полезной нагрузки многорежимного космического аппарата. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 7.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-7-2290>

Ермаков Владимир Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ).
e-mail: v_ermakov2003@mail.ru

Туфан Ант — инженер кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ). e-mail: anttufan@gmail.com

Миланко Кирилл Николаевич — аспирант кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ). e-mail: milancko@bk.ru

Фирсюк Сергей Олегович — старший преподаватель кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ). e-mail: iskramai@yandex.com

Introducing piezoceramics to suppress the multimode spacecraft payload vibrations

© V. Yu. Ermakov, A. Tufan, K.N. Milanko, S.O. Firsyuk

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia

Current trend in the spacecraft design lies in using large, complex and lightweight space structures to achieve increased functionality with the lower launch costs. Combination of large and lightweight designs results in these space structures becoming extremely flexible and acquiring the low frequency fundamental vibration modes. These modes could be used in various tasks, such as turning, guidance maneuvers and docking with the other spacecraft. Effective vibration suppression is a challenge for the spacecraft designers. One of the promising methods for solving this problem is introduction of the built-in piezoelectric elements as the actuators. The paper analyzes various control systems for the built-in piezoelectric elements to ensure the payload vibration protection. Experimental studies of these systems were carried out to determine the dynamics coefficient levels.

Keywords: *piezoceramics, elastic body vibrations, passive shunting, active control, piezoelectric element*

REFERENCES

- [1] Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. *Pyzoelektricheskie datchiki* [Piezoelectric sensors]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006, 632 p.
- [2] Glzman I. A. *Pyzokeramika* [Piezoceramics]. Moscow, Energiya Publ., 1972, 192 p.
- [3] Nikolaev Yu.L. Printsipy konstruirovaniya pyzoelektricheskikh generatorov mikroperemescheniy [Principles of design of the piezoelectric micro-displacement generators]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii — Automation and Modern Technologies*, 2000, no. 3, pp. 10–12.
- [4] Nikolaev Y.L., Vishnekov A.V. Modelirovanie i kompensatsiya protsessa polzuchesti pyzokeramicheskikh ispolnitelnykh elementov mikroperemescheniy. [Simulation and compensation of the creep process of piezoceramic executive elements of micromovings]. *Pribory — Instruments*, 2012, no. 6, pp. 44–48.
- [5] Bobkov A.A., Bystrov S.V., Boykov V.I., Bushuev A.B., Grigoryev V.V. *Pyzoelektricheskiy privod* [Piezoelectric drive]. Patent No. 87043 Russian Federation, published September 20, 2009, 5 p.
- [6] Krikunov M.M. Issledovanie dinamiki prostranstvennogo dvizheniya tel peremennogo sostava [Research of dynamics of a three-dimensional movement of bodies of variable structure]. *Trudy MAI*, 2010, no. 41. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=23801>
- [7] Ermakov V.Yu., Telepnev P.P. *Proektirovanie ustroystv gasheniya kolebaniy konstruktssii kosmicheskikh apparatov. Proektirovanie avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamentalnykh nauchnykh issledovaniy* [Designing devices for suppression of the spacecraft elements vibrations. Designing automatic spacecraft for fundamental scientific research]. V.V. Efanov, K.M. Pichkhadze, eds. In 2 vols. Vol. 1. Moscow, MAI Publ., 2012, pp. 434–465.
- [8] Donskov A.V. Analiz sovremennykh metodov otsenki i modelirovaniya riskov vozniknoveniya neshtatnykh situatsiy na bortu kosmicheskogo apparata

- [Analysis of modern evaluation and modeling methods of contingencies occurrence risks onboard a spacecraft]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 163–169.
- [9] Lavrinenko V.V., Kartashev I.A., Vishnevskiy V.S. *Pyezoelektricheskie dvigateli* [Piezoelectric engines]. Moscow, Energiya Publ., 1980, 112 p.
- [10] Malov V.V. *Pyezorezonansnye datchiki* [Piezoresonance sensors]. Moscow, Energoizdat Publ., 1989, 272 p.
- [11] Ermakov V.Yu., Savostyanov A.M., Rulev S.V., Nikolaev Yu.L. Razrabotka i pervye eksperimentalnye issledovaniya vibroizolyatorov s ispolzovaniem shuntiruemykh pyezoelementov [Design, development and first experimental study of the vibro-isolaters using the shunted piezoelements]. In: *Materialy nauchnoy konferentsii Voennoy akademii imeni F.E. Dzerzhinskogo* [Materials of the scientific conference of the Dzerzhinsky Military Academy]. 1993, pp. 102–105.
- [12] Nikolaev Yu.L., Vorontsov A.L. Raschetno-eksperimentalnaya otsenka predelno dopustimyykh deformatsiy bimorfnykh pyezoelementov [Calculated experimental assessment of the limited acceptable deformation in the bimorphic piezoelements]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya — Repair. Restoration. Modernization*, 2015, no. 6, pp. 13–17.
- [13] Fegade P.V., Barjibhe R.B. Reduction in Amplitude of Vibration using Piezoelectric Material Patch. *International Journal on Emerging Technologies*, 2020, vol. 11 (3), pp. 561–564.
- [14] Bialas K. Reduction of vibrations in mechanical systems using piezoelectric elements. *MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 178, art. ID 06023. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817806023>

Ermakov V.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, MAI (NRU). e-mail: v_ermakov2003@mail.ru

Tufan Ant, Engineer, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, MAI (NRU). e-mail: anttufan@gmail.com

Milanko K.N., Postgraduate, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, MAI (NRU). e-mail: milanko@bk.ru

Firsyuk S.O., Senior Lecturer, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, MAI (NRU). e-mail: iskramai@yandex.com