

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ МИКРОУСКОРЕНИЙ В ЗАЩИЩЕННОЙ ЗОНЕ ВИБРОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ГРАВИТАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ НА БОРТУ 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 построены модели поля микроускорений в защищенной зоне различных виброзащитных устройств. Рассмотрена автоматическая поворотная платформа и виброзащитное устройство на магнитном принципе работы. Проведено численное моделирование для платформы малого космического аппарата (МКА) типа «Аист-2». Сделаны выводы о возможности применения виброзащитных устройств при проведении гравитационно-чувствительных процессов на борту МКА технологического назначения. Полученные результаты могут быть использованы при анализе удовлетворения условий по микроускорениям.

Ключевые слова: микроускорения, гравитационно-чувствительные процессы, поворотная платформа, виброзащитное устройство, проектирование, малый космический аппарат.

Введение

Проектирование и создание МКА технологического назначения является важной и актуальной современной задачей. С точки зрения реализации гравитационно-чувствительных технологических процессов, преимуществами МКА, помимо низкой стоимости и небольшого периода реализации, является возможность создания МКА под конкретный технологический процесс с максимальным учётом его особенностей. По сравнению с многофункциональными КА других классов в этом случае возможна реализация концепции функционирования МКА решению только одной задачи — максимально успешной реализации технологического процесса, для которого спроектирован данный МКА. Эффективность выполнения задачи в рамках такой концепции будет максимальной, если удовлетворить все требования, предъявляемые технологическим процессом. Прежде всего, речь идёт о требованиях к микроускорениям [1–3]. На рис. 1 [4] показаны требования к уровню микроускорений на лабораторном модуле международной космической станции (документ SSP41000D [2]) и результаты лётных испытаний на борту китайской космической лаборатории «Тяньгун-2» [5].

Анализ зависимостей позволяет сделать вывод о существенных требованиях, предъявляемых к уровню микроускорений [6].

Исследования [7–9] показывают, что состав основных возмущающих факторов, существенно влияющих на движение, для МКА и космических аппаратов (КА) других классов значимо отличается. Так, для МКА определяющими являются возмущения магнитного характера [8]. Поэтому системы управления вращательным движением МКА нередко содержат магнитные исполнительные органы (рис. 2) [10–12].

Удовлетворение требований по микроускорениям для МКА является более сложной задачей, чем

для КА других классов из-за большего процента массы упругих элементов в общей массе МКА. Так, центр масс МКА Starlink находится вне корпуса МКА, при этом масса упругой части составляет около 27 % общей массы МКА [13]. Поэтому в данной работе речь идёт о применении виброзащитных устройств, обеспечивающих выполнение требований микроускорений не во всей внутренней среде МКА, а только внутри защищённой зоны. Краткий обзор истории развития таких устройств представлен в работах [3, 4].

Модель поля микроускорений в защищённой зоне автоматической поворотной виброзащитной платформы

Автоматическая поворотная виброзащитная платформа предназначена для снижения микроускорений, возникающих при вращательном движении МКА [4]. В России была создана и испытана автоматическая поворотная виброзащитная платформа «Флюгер» (рис. 3) [14, 15]. Эта платформа даёт возможность ориентировать и стабилизировать размещённую на ней технологическую установку в автоматическом режиме. Собственная масса установки составляет около 55 кг, что позволяет успешно размещать её на МКА. В рамках космического эксперимента КОМО [16] планируется провести 12 сеансов испытаний автоматической поворотной виброзащитной платформы на борту международной космической станции в течение 4 месяцев с целью подтверждения результатов лётных испытаний, уточнения моделей поля микроускорений, полученных как расчётным, так и экспериментальным путём, а также оценки предельных возможностей платформы по снижению микроускорений внутри защищённой зоны [17].

Основные характеристики автоматической поворотной виброзащитной платформы «Флюгер» представлены в табл. 1 [14].

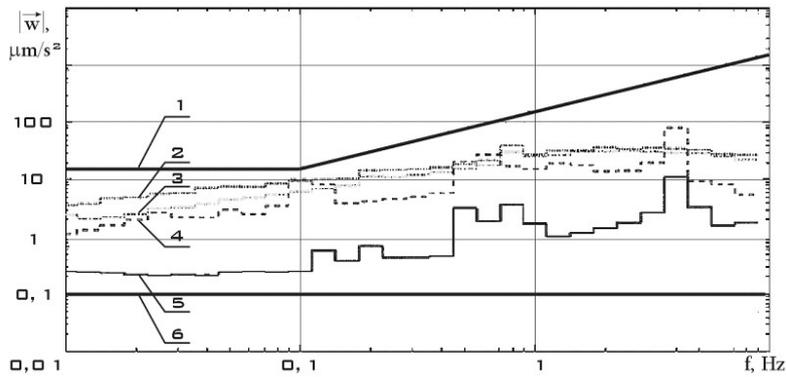


Рис. 1. Требования по микроускорениям:
 1 — документ SSP41000D, регламентирующий микроускорения на международной космической станции [2];
 2, 3, 4, 5 — результаты испытаний виброзащитной платформы MAIS («Тяньгун-2» [5]); 6 — требования ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН [2]

Fig. 1. Micro-acceleration requirements:
 1 — document SSP41000D, regulating micro-accelerations on the international space station [2]; 2, 3, 4, 5 — test results of the vibration-proof platform MAIS (Tiangong-2 [5]); 6 — the desired requirements of Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science [2]



Рис. 2. Магнитный исполнительный орган SX-MT-30 (Максимальный момент 30 А·м²; масса 1,2 кг; габариты 440×50×40 мм) [11]

Fig. 2. Magnetic actuators SX-MT-30 (Maximum moment 30 A·m²; mass 1,2 kg; dimensions 440×50×40 mm) [11]

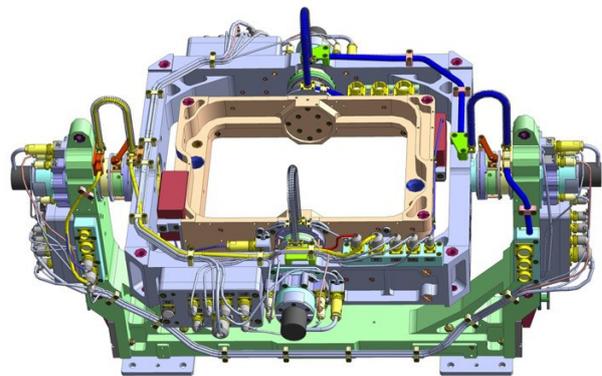


Рис. 3. Автоматическая поворотная виброзащитная платформа «Флюгер»

Fig. 3. Automatic rotary platform of the Flyuger

Динамические уравнения Эйлера в общем случае имеют вид [8]:

$$\begin{cases} I_{xx}\dot{\omega}_x - I_{xy}\dot{\omega}_y - I_{xz}\dot{\omega}_z + \omega_y(I_{zz}\omega_z - I_{xz}\omega_x - I_{yz}\omega_y) - \\ - \omega_z(I_{yy}\omega_y - I_{xy}\omega_x - I_{yz}\omega_z) = M_x \\ I_{yy}\dot{\omega}_y - I_{xy}\dot{\omega}_x - I_{yz}\dot{\omega}_z + \omega_x(I_{xx}\omega_x - I_{xy}\omega_y - I_{xz}\omega_z) - \\ - \omega_z(I_{zz}\omega_z - I_{xz}\omega_x - I_{yz}\omega_y) = M_y \\ I_{zz}\dot{\omega}_z - I_{xz}\dot{\omega}_x - I_{yz}\dot{\omega}_y + \omega_x(I_{yy}\omega_y - I_{xy}\omega_x - I_{yz}\omega_z) - \\ - \omega_y(I_{xx}\omega_x - I_{xy}\omega_y - I_{xz}\omega_z) = M_z \end{cases}, \quad (1)$$

где $\hat{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}$ — тензор инерции малого

космического аппарата в системе координат CXYZ (рис. 4);

$\vec{\varepsilon}(\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z)$ и $\vec{\omega}(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ — соответственно векторы углового ускорения и угловой скорости вращения опытного образца малого космического аппарата «Аист» вокруг центра масс в системе координат CXYZ;

$\vec{M}(M_x, M_y, M_z)$ — вектор внешнего возмущающего момента, действующего на малый космический аппарат.

Таблица 1. Основные характеристики Автоматической поворотной виброзащитной платформы «Флюгер» [14]

Table 1. Main specifications of automatic rotary vibroprotection platform Flyuger

Параметр	Значение
Масса размещаемой полезной нагрузки	до 60 кг
Габариты полезной нагрузки	360×302×222 мм
Угол поворота наружной рамки	± 140 град.
Угол поворота внутренней рамки	± 90 град.
Точность стабилизации вектора микроускорения	3·10 ⁻⁷ g
Период колебаний отслеживаемого вектора микроускорения	5...45 мин.
Величина модуля отслеживаемого вектора микроускорения	10 ⁻⁴ ...10 ⁻⁶ g

Модель поля микроускорений внутри защищённой зоны автоматической поворотной виброзащитной платформы будет иметь вид:

$$\vec{w}_M = \vec{w}_C + (\vec{\varepsilon} + \vec{\varepsilon}_p) \times \vec{r}_M + (\vec{\omega} + \vec{\omega}_p) \times \vec{r}_M + (\vec{\omega} + \vec{\omega}_p) \times (\vec{\omega} + \vec{\omega}_p) \times \vec{r}_M, \quad (2)$$

где $\vec{\varepsilon}_p$ и $\vec{\omega}_p$ — соответственно векторы углового ускорения и угловой скорости вращения внутренней рамки автоматической поворотной виброзащитной платформы, к которой прикреплено технологическое оборудование, относительно связанной системы координат МКА; \vec{w}_C — ускорение центра масс МКА при его поступательном движении; \vec{r}_M — радиус-вектор точки M относительно центра масс МКА C .

При условии $\vec{\omega}_p = \vec{\varepsilon}_p = 0$ приходим к полю микроускорений вне защищённой зоны автоматической поворотной виброзащитной платформы:

$$\vec{w}_M = \vec{w}_C + \vec{\varepsilon} \times \vec{r}_M + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r}_M. \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой классическое разложение ускорения произвольной точки твёрдого тела на ускорение полюса и ускорение вращения вокруг полюса. Поскольку технологическое оборудование жёстко прикреплено к корпусу МКА, который также можно считать жёстким, то (3) даёт реалистичную картину поля микроускорений вне защищённой зоны автоматической поворотной виброзащитной платформы.

Для платформы МКА типа «Аист-2» (рис. 4) в режимах стабилизации и программного поворота в точке с координатами $\vec{r}_M = (0,2; 0,2; 0,2)$ динамика микроускорений по данным измерений вектора угловой скорости вращения МКА «Аист-2Д» показана на рис. 5.

Тогда задача удовлетворения требований по микроускорениям заключается в разработке закона управления вращением автоматической поворотной платформы, обеспечивающего заданный уровень микроускорений [18]. Такая задача может быть сведена к задаче минимизации выражения (2) путём варьирования векторной функцией $\vec{\omega}_p$ и её производной $\vec{\varepsilon}_p$, а также радиусом-вектором точки M \vec{r}_M .

Использование автоматической поворотной виброзащитной платформы «Флюгер», с одной стороны, ограничено возможностями размещения технологического оборудования в небольшой защищённой зоне платформы. Однако, с другой стороны, при использовании её на МКА возможно проектирование МКА под один какой-то определённый гравитационно-чувствительный процесс с максимальным учётом особенностей его реализации. Таких возможностей нельзя добиться при проведении серии различных экспериментов, требования к успешной реализации которых могут существенно отличаться друг от друга. Поэтому, несмотря на сложности обеспечения требуемого уровня микроускорений в рабочей зоне технологического оборудования для МКА, их использование является одним из самых перспективных направлений современного развития космических технологий.

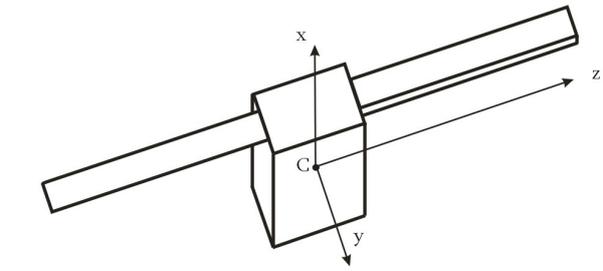


Рис. 4. Схема МКА «Аист-2Д» с главной связанной системой координат
Fig. 4. Diagram of the small spacecraft «Aist-2D» with the main associated coordinate system

тационно-чувствительный процесс с максимальным учётом особенностей его реализации. Таких возможностей нельзя добиться при проведении серии различных экспериментов, требования к успешной реализации которых могут существенно отличаться друг от друга. Поэтому, несмотря на сложности обеспечения требуемого уровня микроускорений в рабочей зоне технологического оборудования для МКА, их использование является одним из самых перспективных направлений современного развития космических технологий.

Модель поля микроускорений в защищённой зоне виброзащитной платформы MAIS

Классические виброзащитные платформы предполагают нивелирование микроускорений от всех видов движения КА. Одними из первых были созданы и испытаны Microgravity Isolation Mount [19] и отечественная ВЗП-1 [20]. Это были виброзащитные платформы механического типа [21], которые представляли собой механическое демпфирующее устройство. Затем на их основе были разработаны виброзащитные системы [22], которые в настоящее время используются в космических лабораторных модулях Columbus и KIBO. Они эффективно снижают уровень микроускорений внутри защищённой зоны. Однако развитие космических технологий требует применения передовых методов и разработки виброзащитных устройств и систем нового поколения.

Одним из таких устройств является виброзащитная платформа MAIS (рис. 6), которая предназна-

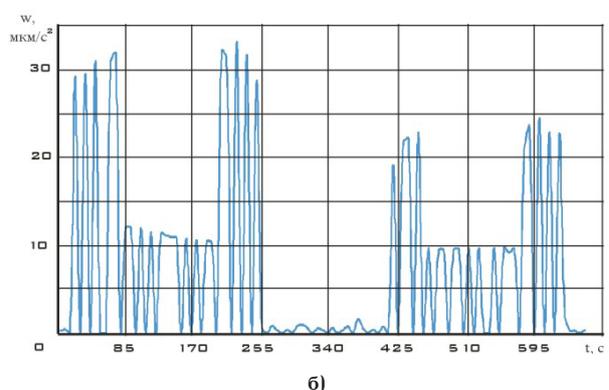
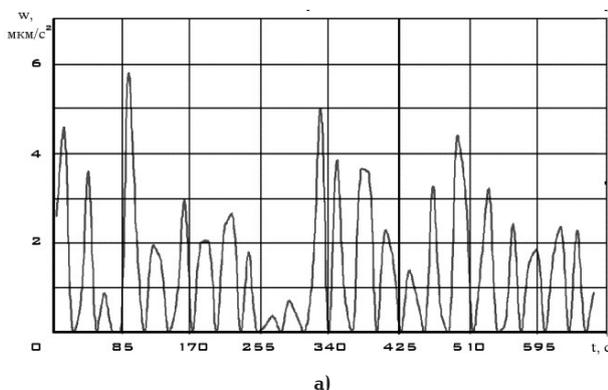
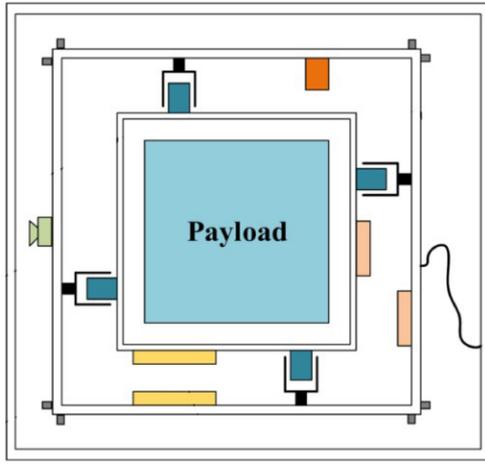


Рис. 5. Динамика микроускорений вне защищённой зоны автоматической поворотной виброзащитной платформы по данным измерений угловой скорости на МКА «Аист-2Д» от 31.07.2016: а) в режиме стабилизации; б) в режиме программного поворота

Fig. 5. Dynamics of micro-accelerations outside the protected zone of the automatic rotary vibration-proof platform according to angular velocity measurements on the small spacecraft «Aist-2D» dated 31.07.2016: a) in stabilization mode; b) in the program rotation mode

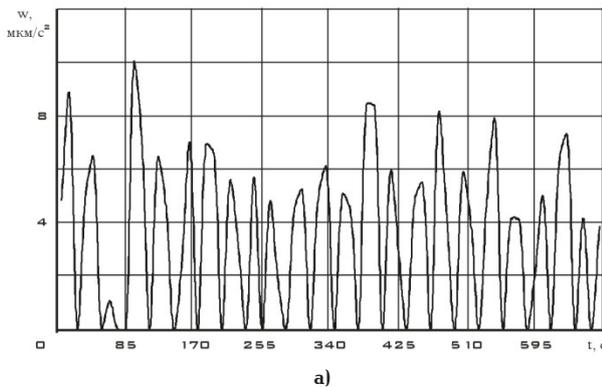


а)

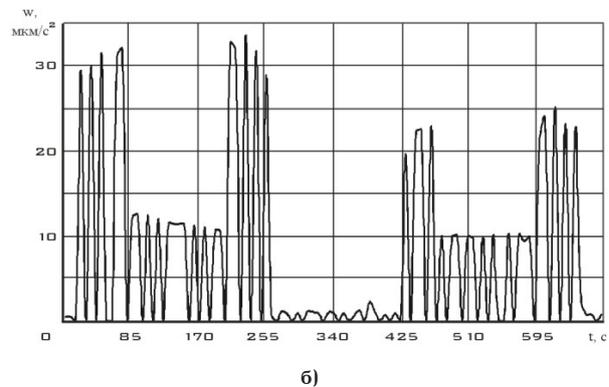


б)

Рис. 6. Принципиальная схема [16] (а) и внешний вид [17] (б) виброзащитной платформы MAIS
Fig. 6. Schematic diagram [16] (a) and appearance [17] (b) of the vibration-proof platform MAIS



а)



б)

Рис. 7. Динамика микроускорений вне защищённой зоны виброзащитной платформы MAIS с использованием данных измерений угловой скорости на МКА «Аист-2Д» от 31.07.2016:
а) в режиме стабилизации; б) в режиме программного поворота

Fig. 7. Dynamics of micro-accelerations outside the protected zone of the automatic rotary vibration-proof platform MAIS using angular velocity measurements on the small spacecraft «Aist-2D» dated 31.07.2016:
a) in stabilization mode; b) in the program rotation mode

чена для снижения микроускорений, возникающих как при поступательном, так и при вращательном движении МКА по его орбите [5, 23]. Она сконструирована на магнитной подвеске и, согласно испытаниям [24], демонстрирует отличные показатели микровибрационной изоляции в диапазоне частот от 0,01 Гц до 100 Гц в космической среде.

Для поступательной части движения МКА по орбите ускорение точек технологического оборудования в защищённой зоне виброзащитной платформы MAIS будет иметь вид [16]:

$$\vec{w}_M = -\frac{\mu_E}{r_0^2} \vec{e}_{r_0} + \frac{1}{m_K} (\vec{F}^e + \vec{F}_{ynp}), \quad (4)$$

где μ_E — гравитационный параметр Земли; r_0 — радиус орбиты; \vec{e}_{r_0} — единичный вектор радиуса орбиты; m_K — масса контейнера с технологическим оборудованием, располагающимся внутри защищённой зоны виброзащитной платформы MAIS; \vec{F}^e — главный вектор внешних сил, действующих на контейнер с технологическим оборудованием; \vec{F}_{ynp} — главный вектор сил управления со стороны виброзащитной платформы MAIS, действующих на контейнер с технологическим оборудованием.

Уравнения вращательной части движения по-прежнему имеют вид (1). Тогда модель поля микро-

ускорений с учётом поступательной и вращательной частей движения МКА будет иметь вид:

$$\vec{w}_M = -\frac{\mu_E}{r_0^2} \vec{e}_{r_0} + \frac{1}{m_K} (\vec{F}^e + \vec{F}_{ynp}) + \vec{\varepsilon} \times \vec{r}_M + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r}_M + \hat{I}_K^{-1} \cdot \vec{M}_{ynp} \times \vec{r}_M, \quad (5)$$

где \hat{I}_K — тензор инерции контейнера с технологическим оборудованием; \vec{M}_{ynp} — управляющий момент, действующий со стороны виброзащитной платформы MAIS на контейнер с технологическим оборудованием.

При условии $\vec{F}_{ynp} = \vec{M}_{ynp} \equiv 0$ приходим к полю микроускорений вне защищённой зоны. Для платформы МКА типа «Аист-2» (рис. 4) динамика микроускорений, аналогичная представленной на рис. 5, показана на рис. 7.

Задача удовлетворения требований по микроускорениям в этом случае заключается в разработке закона управления векторами \vec{F}_{ynp} и \vec{M}_{ynp} так, чтобы минимизировать выражение (5).

Выводы и заключение

Таким образом, в работе построены модели поля микроускорений для защищённой зоны автома-

тической поворотной виброзащитной платформы и виброзащитной платформы MAIS. Получены зависимости модуля микроускорений для платформы МКА типа «Аист-2». Они демонстрируют эффективность применения современных виброзащитных платформ для успешной реализации гравитационно-чувствительных процессов во внутренней среде МКА. В сочетании с возможностью проектирования МКА под конкретный технологический процесс такой подход можно отнести к одним из самых перспективных для современного развития космической техники специализированного технологического назначения. Результаты работы могут быть использованы при проектировании МКА технологического назначения в части удовлетворения требований по микроускорениям.

Благодарности

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

Список источников

1. Ёлкин К. С., Иванов А. И., Незнамова Л. О., Прудко-гляд 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.
2. 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.
3. Седелников А. В. Проблема микроускорений: от осознания до фрактальной модели. Москва: РАН. Избранные труды Российской школы, 2012. 277 с.
4. Sedelnikov A. V., Taneeva A. S. Dynamic characteristics modeling of rotary platform installed on board of a small spacecraft // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2182. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012061.
5. 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.
6. Sedelnikov A. V., Eskina E. V., Taneeva A. S. [et al.]. The problem of ensuring and controlling microaccelerations in the internal environment of a small technological spacecraft // Journal of Current Science and Technology. 2023. Vol. 13, № 1. P. 1–11. DOI:10.14456/jcst.2023.1
7. Qu Z., Zhang G., Meng Z. Attitude Maneuver and Stability Control of Hyper-Agile Satellite Using Reconfigurable Control Moment Gyros // Aerospace. 2022. Vol. 9, № 6. DOI: 10.3390/aerospace9060303.
8. Sedelnikov A. V., Salmin V. V. Modeling the disturbing effect on the Aist small spacecraft based on the measurements data // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. 1300. DOI: 10.1038/s41598-022-05367-9.
9. Taneeva A. S., Lukuanchik E. S., Khnyryova V. V. Modeling the dependence of the specific impulse on the temperature of the heater of an electrothermal micro-motor based on the results of its tests // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2096, № 1. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012059.
10. Овчинников М. Ю., Пеньков В. И., Родутин Д. С. [и др.]. Магнитные системы ориентации малых спутников. Москва: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016. 366 с.
11. Магнитные исполнительные органы. URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-microsputnik/ispolnitelnyie-organyi-sistemyi-orientaczii-stabilizaczii-i-navigaczii/magnitnie-ispolnitelnie-organi> (дата обращения: 30.04.2023).
12. Sedelnikov A. V., Orlov D. I., Khnyryova E. S. [et al.]. Using the -Bdot Algorithm to Reduce the Angular Velocity of Rotation for the Aist Small Spacecraft Pilot Model // Advances in Transdisciplinary Engineering. 2022. Vol. 24. P. 239–249. DOI: 10.3233/ATDE220444.
13. McDowell J. C. The Low Earth Orbit Satellite Population and Impacts of the SpaceX Starlink Constellation // The Astrophysical Journal Letters. Vol. 892, № 2. L 36. DOI: 10.3847/2041-8213/ab8016.
14. Лейферов Б. М., Цуцманова Н. А. Выращивание полупроводниковых кристаллов в космосе. URL: <https://thepresentation.ru/astronomiya/vyrashchivanie-poluprovodnikovyh-kristallov-v-kosmose> (дата обращения: 30.04.2023).
15. Akulenko L. D., Bolotnik N. N., Borisov A. E. [et al.]. Orientation control of an object on a rotating base by using a two-stage electric drive // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2019. Vol. 58, № 6. P. 829–843. DOI: 10.1134/S1064230719060029.
16. КОМО. Определение поля микроускорений в области полезной нагрузки автоматической поворотной виброзащитной платформы «Флюгер» при различных режимах управления в условиях микрогравитационной обстановки на МКС. URL: <https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/komo/> (дата обращения: 30.04.2023).
17. Болотник Н. Н., Корнеев В. А. Анализ предельных возможностей противоударной изоляции при кратковременных внешних воздействиях // Нелинейная динамика. 2015. Т. 11, № 1. С. 147–168.
18. Борисов А. Е., Емельянов Г. А. Параметрическая оптимизация системы управления автоматической поворотной виброзащитной платформы для микрогравитационных исследований // Космонавтика и ракетостроение. 2013. № 3. С. 147–155.
19. Owen R. G., Jones D. I., Owens A. R. [et al.]. Integration of a microgravity isolation mount within a Columbus single rack // Acta Astronautica. 1990. Vol. 22. P. 127–135. DOI: 10.1016/0094-5765(90)90013-B.
20. Левтов В. Л., Романов В. В., Иванов А. И. [и др.]. Результаты лётно-космических испытаний виброзащитной платформы ВЗП-1К // Космические исследования. 2001. Т. 39, № 2. С. 136–147.
21. Sedelnikov A. V., Taneeva A. S. Dynamic characteristics modeling of rotary platform installed on board of a small spacecraft // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2182. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012061.
22. Carter S. D., Bastin P. H. Vibration isolation mounting system. US Patent 5419528; filed May 13th, 1993; published May 30th, 1995.
23. 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. DOI: 10.1007/s12217-022-10027-8.
24. 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.

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. Моделирование поля микроускорений в защищённой зоне виброзащитных устройств для реализации гравитационно-чувствительных процессов на борту малого космического аппарата технологического назначения // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 2. С. 65–72. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-65-72.

Статья поступила в редакцию 17.04.2023 г.

© А. В. Седельников, А. С. Танеева

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

A. V. Sedelnikov, A. S. Taneeva

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

In this paper, models of the micro-acceleration field in the protected zone of various vibration-proof devices are constructed. An automatic rotary platform and a vibration-proof device based on the magnetic principle of operation are considered. Numerical simulation has been carried out for the platform of a small spacecraft of the Aist-2 type. Conclusions are drawn about the possibility of using vibration-proof devices when conducting gravity-sensitive processes on board a technological ICA. The results obtained can be used in the analysis of the satisfaction of conditions for micro-accelerations.

Keywords: micro-accelerations, gravity-sensitive processes, rotary platform, vibration protection device, design, small spacecraft.

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. Elkin K. S., Ivanov A. I., Neznamova L. O., Prudkoglyad V. O. Perspektivy sozdaniya vakuumnykh 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 vacuum and gravity-sensitive technologies using spaceflight conditions in Earth orbits. Investigation of gravity-sensitive phenomena onboard domestic spacecraft] / ed. by K. S. Elkina. Moscow, 2013. 306 p. (In Russ.).

2. 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. (In Russ.).

3. Sedelnikov A. V. Problema mikrouskoreniy: ot osoznaniya do fraktal'noy modeli [The problem of micro-accelerations: from awareness to a fractal model]. Moscow, 2012. 277 p. (In Russ.).

4. Sedelnikov A. V., Taneeva A. S. Dynamic characteristics modeling of rotary platform installed on board of a small spacecraft // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2182. DOI:10.1088/1742-6596/2182/1/012061. (In Engl.).

5. 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. (In Engl.).

6. Sedelnikov A. V., Eskina E. V., Taneeva A. S. [et al.]. The problem of ensuring and controlling microaccelerations in the internal environment of a small technological spacecraft // *Journal of Current Science and Technology*. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 1–11. DOI:10.14456/jcst.2023.1. (In Engl.).

7. Qu Z., Zhang G., Meng Z. Attitude Maneuver and Stability Control of Hyper-Agile Satellite Using Reconfigurable Control Moment Gyros // *Aerospace*. 2022. Vol. 9, no. 6. DOI: 10.3390/aerospace9060303. (In Engl.).

8. Sedelnikov A.V., Salmin V. V. Modeling the disturbing effect on the Aist small spacecraft based on the measurements data // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. 1300. DOI: 10.1038/s41598-022-05367-9. (In Engl.).

9. Taneeva A. S., Lukyanchik E. S., Khnyryova V. V. Modeling the dependence of the specific impulse on the temperature of the heater of an electrothermal micro-motor based on the results of its tests // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2096, no. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012059. (In Engl.).

10. Ovchinnikov M. Yu., Pen'kov V. I., Roldugin D. S. [et al.]. Magnitnyye sistemy oriyentatsii malykh sputnikov [Magnetic guidance systems for small satellites]. Moscow, 2016. 366 p. (In Russ.).

11. Magnitnyye ispolnitel'nyye organy. URL: <https://sputnix.ru/ru/priboryi/pribory-microsputnik/ispolnitelnyie-organyi-sistemyi-orientaczii-stabilizaczii-i-navigaczii/magnitnie-ispolnitelnie-organi> (accessed: 30.04.2023). (In Russ.).

12. Sedelnikov A.V., Orlov D. I., Khnyryova E. S. [et al.]. Using the -Bdot Algorithm to Reduce the Angular Velocity of Rotation for the Aist Small Spacecraft Pilot Model // *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 2022. Vol. 24. P. 239–249. DOI: 10.3233/ATDE220444. (In Engl.).

13. McDowell J. C. The Low Earth Orbit Satellite Population and Impacts of the SpaceX Starlink Constellation // *The Astrophysical Journal Letters*. Vol. 892, no. 2. DOI: 10.3847/2041-8213/ab8016. (In Engl.).

14. Leyferov B. M., Tsutsmanova N. A. Vyrashchivaniye poluprovodnikovykh kristallov v kosmose [Growing semiconductor crystals in space]. URL: <https://thepresentation.ru/astronomiya/vyrashchivanie-poluprovodnikovykh-kristallov-v-kosmose> (accessed: 30.04.2023). (In Russ.).

15. Akulenko L. D., Bolotnik N. N., Borisov A. E. [et al.]. Orientation control of an object on a rotating base by using a two-stage electric drive // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2019. Vol. 58, no. 6. P. 829–843. DOI: 10.1134/S1064230719060029. (In Engl.).

16. KOMO. Opredeleniye polya mikrouskoreniy v oblasti poleznoy nagruzki avtomaticheskoy povorotnoy vibrozashchitnoy

platformy «Flyuger» pri razlichnykh rezhimakh upravleniya v usloviyakh mikrogravitatsionnoy obstanovki na MKS [COMO. Determination of the micro-acceleration field in the payload area of the automatic rotary vibration protection platform «Flyuger» under different control modes under microgravity conditions on the ISS]. URL: <https://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/experiments/komo/> (accessed: 30.04.2023). (In Russ.).

17. Bolotnik N. N., Korneyev V. A. Analiz predel'nykh vozmozhnostey protivoudarnoy izolyatsii pri kratkovremennykh vneshnikh vozdeystviyakh [Limiting performance analysis of shock isolation for transient external disturbances] // *Nelineynaya dinamika. Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. 2015. Vol. 11, no. 1. P. 147–168. (In Russ.).

18. Borisov A. E., Emel'yanov G. 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 Science*. 2013. No. 3. P. 147–155. (In Russ.).

19. Owen R. G., Jones D. I., Owens A. R. [et al.]. Integration of a microgravity isolation mount within a Columbus single rack // *Acta Astronautica*. 1990. Vol. 22. P. 127–135. DOI: 10.1016/0094-5765(90)90013-B. (In Engl.).

20. Levto V. L., Romanov V. V., Ivanov A. I. [et al.]. Rezul'taty latno-kosmicheskikh ispytaniy vibrozashchitnoy platformy VZP-1K [The Results of Space Flight Tests of the Passive Vibration Protective Platform VZP-1K on Board the Station Mir] // *Kosmicheskiye issledovaniya. Kosmicheskie Issledovaniya*. 2001. Vol. 39, no. 2. P. 136–147. (In Russ.).

21. Sedelnikov A. V., Taneeva A. S. Dynamic characteristics modeling of rotary platform installed on board of a small spacecraft // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2182. 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012061. (In Engl.).

22. Carter S. D., Bastin P. H. Vibration isolation mounting system. US Patent 5419528; filed May 13th, 1993; published May 30th, 1995. (In Engl.).

23. 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. DOI: 10.1007/s12217-022-10027-8. (In Engl.).

24. 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.).

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

Correspondence address: anaa.smith@yandex.ru

For citations

Sedelnikov A. V., Taneeva A. S. 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 // *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.

Received April 17, 2023.

© A. V. Sedelnikov, A. S. Taneeva