

Научная статья

УДК 629.785

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180647>

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Андрей Валерьевич Седельников¹, Анастасия Сергеевна Танеева² ✉

^{1, 2} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
(Самарский университет),

Самара, Россия

¹ axe_backdraft@inbox.ru

² nasty-gorozhankina@yandex.ru ✉

Аннотация. Построена концептуальная модель малого космического аппарата (МКА) технологического назначения (ТН). Определены цели и показаны этапы проектирования при построении концептуальной модели. Представлено целевое и концептуальное описание МКА ТН. Проведена декомпозиция концептуальной модели МКА ТН и описаны ее элементы. Результаты работы могут быть использованы при проектировании МКА.

Ключевые слова: МКА технологического назначения, гравитационно-чувствительные процессы, проектирование КА технологического назначения, концептуальная модель МКА

Финансирование: работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Проект FSSS-2023-0007)

Для цитирования: Седельников А.В., Танеева А.С. Концептуальная модель малого космического аппарата технологического назначения // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 44-55. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180647>

Original article

CONCEPTUAL MODEL OF A TECHNOLOGICAL PURPOSE SMALL SPACECRAFT

Andrei V. Sedel'nikov¹, Anastasiya S. Taneeva² ✉

^{1, 2} Samara National Research University,

Samara, Russia

¹ axe_backdraft@inbox.ru

² nasty-gorozhankina@yandex.ru ✉

Abstract

Modern specialized purposes space technology development requires new approaches and effective application of accumulated experience. As for now, there is still not a single implemented project in view of a technological purposes small spacecraft. This is primarily associated with the objective difficulties of employing small spacecraft in realization of gravity-sensitive processes in the near-Earth space.

Conceptual model of a technological purposes small spacecraft is being built in the presented article according to the well-known methodology. The methodology requirements determine the conceptual model form and structure, ensuring this form normativity, the independent nature of conceptual structures and diversity of the same content

interpretations. These methodological ideas are demonstrated in the article as applied to the technological purposes small spacecraft being designed.

The design process itself is being regarded as a transition from one description of an object to another. The article presents the first two stages of this process, namely the target and conceptual description, which are closely related to the conceptual model being developed and mathematically formalized within the framework of this work.

The authors performed a methodological analysis of aspects of the technological purposes small spacecraft conceptual model. The process, functional, methodological and informational aspects of the conceptual model are highlighted and described. The analysis of these aspects allows generalizing the accumulated experience, identifying possible options for design solutions and evaluating these options effectiveness, as well as selecting the option that is optimal in terms of the target tasks solving effectiveness, and monitoring this effectiveness.

The decomposition of the conceptual model into separate components has been accomplished, allowing for structural analysis, specifics identification of the technological purposes small spacecraft being projected and their consideration while its design. Conceptual model of the object domain, under which the field of micro accelerations of the protected zone of micro-gravitational platform is understood, was built in the framework of this decomposition. The authors created the structure of the generalized conceptual model of the processes allowing reduce the process of ensuring requirements on micro-accelerations as a characteristic feature of the technological purposes small spacecraft being designed. Conceptual models of control circuits and individual subsystems of a technological purposes small spacecraft have been formed. Each conceptual model herewith describes in detail only those elements that have the features compared to the other small spacecraft.

Thus, a conceptual model, corresponding to the well-known methodology, which allows small spacecraft designing for various gravity-sensitive processes, with maximal account for the specifics of their implementation, has been built.

Keywords: technological purposes small spacecraft, gravity-sensitive processes, technological spacecraft designing, small spacecraft conceptual model

Funding: the work was financed within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (the Project FSSS-2023-0007).

For citation: Sedel'nikov A.V., Taneeva A.S. Conceptual Model of a Technological Purpose Small Spacecraft. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 2, pp. 44-55. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180647>

Введение

Изучая методологию концептуального проектирования [1, 2], можно сделать вывод о том, что конструктивные идеи, следуя работе [1], определяют:

– нормативную форму концептуальных моделей, представляющую собой развитие методологического подхода, который воплощен в рамках системного анализа;

– независимый характер концептуальных конструкций в применении их в различных предметных областях, с помощью которого создается пространство проектных обликов, инвариантных по отношению к различным предметам;

– многообразие трактовок одного и того же содержания, которое дает возможность иметь особенности при толковании содержания концептуальных конструкций.

В случае рассматриваемого в работе МКА ТН, его концептуальная модель имеет нормативную форму благодаря принципам проектирования, выполнение которых дает возможность с помощью методологии искать конструктивные решения для достижения требуемого результата [2] путем создания пространства конструкций МКА ТН, которое

инвариантно по отношению ко всем его системам, кроме целевой аппаратуры. Целевая аппаратура является главной частью МКА ТН, обеспечивая решение целевых задач. Реализуемый на ней гравитационно-чувствительный процесс предполагает многообразие трактовок требований по микро-ускорениям с учетом особенностей его реализации и способа их выполнения.

Авторы работы [1] отмечают, что для формирования оптимального облика требуется целостное представление о проектируемом изделии, поскольку именно это представление оправдывает выбор конкретного варианта его проектного облика. Целостное представление о проектируемом изделии дает возможность объединения не только различных моделей его как системы и отдельных подсистем, но и методов анализа самого проектного облика, которые используются при проектировании [1].

Ряд авторов (например работы [3]) отмечают, что определение направления создания проектируемого изделия и выбор оптимального решения является важной целью концептуального проектирования, которая достигается решением следующих задач:

- изучение, обобщение и критический анализ всех материалов, имеющих отношение к проектируемому изделию, для определения его проектных параметров;
- формирование и проработка вариантов конструктивных решений с оценкой эффективности каждого из них;
- выбор наиболее оптимального с точки зрения решения целевых задач варианта.

Формализация самого процесса проектирования [4] может быть путем перехода от одного описания проектируемого изделия к другому. Начальной точкой этого процесса является целевое описание, а следующим этапом является концептуальное описание [4].

Концептуальное описание МКА ТН

Применение указанной выше методологии позволяет схематично представить в самом общем виде первые этапы проектирования МКА ТН на пути создания концептуальной модели. На рис. 1 показаны первые три этапа проектирования [4]. Часть процесса проектирования, показанного на рис. 1, можно математически формализовать в следующем виде (1), где D – условное обозначение процесса проектирования; $c_1 \dots c_k$ (цели) и $t_1 \dots t_{ks}$ (задачи) – соответственно переменные и параметры целевой модели; A_0 – математически формализованное описание целевой модели в виде функции; i_i (идеи) и $m_{111} \dots m_{pks}$ (модели) – соответственно функции и параметры концептуальной модели; A_{li} – математически формализованное описание концептуальной модели в виде функционала; s_{ij} (схемы) и $a_{1111} \dots a_{pqks}$ (алгоритмы) – соответственно функции и параметры функциональной модели; A_{2ij} – математически формализованное описание функциональной модели в виде функционала.

Поскольку целевой задачей МКА ТН является реализация гравитационно-чувствительного процесса, то в качестве цели при концептуальном описании МКА ТН в данной работе выбирается обеспечение условий для этой реализации. Достижение данной цели гарантируется решением следующих задач:

- выбор платформы (типа) малого космического аппарата (t_1);
- выбор элементной базы целевой и обеспечивающей аппаратуры (t_2);

- обеспечение условий по микроускорениям (t_3);
- обеспечение энерговооруженности (t_4);
- оптимальная компоновка целевой и обеспечивающей аппаратуры (t_5);
- доставка результатов экспериментов (t_6).

Идеями технического решения данных задач могут являться:

- наземные объекты (например, башни падения [5]) (i_1);
- лаборатории на базе воздушных летательных аппаратов (например самолетов [6]) (i_2);
- летательные аппараты для суборбитальных полетов (например «Волан» и «Болид» [7]) (i_3);
- специализированные лабораторные модули в составе орбитальных космических станций (например «Columbus» [8] и «KIBO» [9] в составе международной космической станции) (i_4);
- специализированные лаборатории класса орбитальных космических станций (например «Skylab» [10] и «Tiangong» [11]) (i_5);
- специализированные космические аппараты технологического назначения среднего класса (например «Фотон» [12], «Бион» [13], «SJ» [14]) (i_6);
- малые космические аппараты специализированного технологического назначения (i_7) и т. д.

Тогда, применительно к обеспечению условий для реализации гравитационно-чувствительного процесса как к цели и МКА ТН как к идее достижения этой цели, систему (1) можно преобразовать к следующему виду:

$$D : A_0(c, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6) \Rightarrow \Rightarrow A_{17}[i_7(c, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6), m_{71}, \dots, m_{76}] \Rightarrow \dots \quad (2)$$

Конкретизация ряда задач, которая возможна после выбора реализуемого гравитационно-чувствительного процесса, позволяет детализировать целевое и концептуальное описания МКА ТН. В данной работе предполагается реализация экспериментов по направленной кристаллизации на научной аппаратуре «Ростовая установка» [15]. Данная аппаратура будет установлена на автоматической поворотной микрогравитационной платформе «Флюгер» [16]. В качестве базовой платформы МКА предлагается использовать «Аист-2» [17]. В этом случае концептуальное описание проектируемого МКА ТН может быть представлено в виде схемы на рис. 2.

$$\begin{aligned}
 & D : A_0(c_1, t_{11}, \dots, t_{1n}; c_l, t_{l1}, \dots, t_{ls}; \dots; c_k, t_{k1}, \dots, t_{ks}) \Rightarrow \\
 & \Rightarrow A_{li} [i_i(c_1, t_{11}, \dots, t_{1n}; c_l, t_{l1}, \dots, t_{ls}; \dots; c_k, t_{k1}, \dots, t_{ks}), m_{i11}, \dots, m_{iks}] \Rightarrow \\
 & \Rightarrow A_{2ij} [s_{ij}(i_i), a_{ij11}, \dots, a_{ijks}] \Rightarrow \dots, \\
 & \qquad \qquad \qquad l=1 \dots k; i=1 \dots p; j=1 \dots q
 \end{aligned} \quad (1)$$

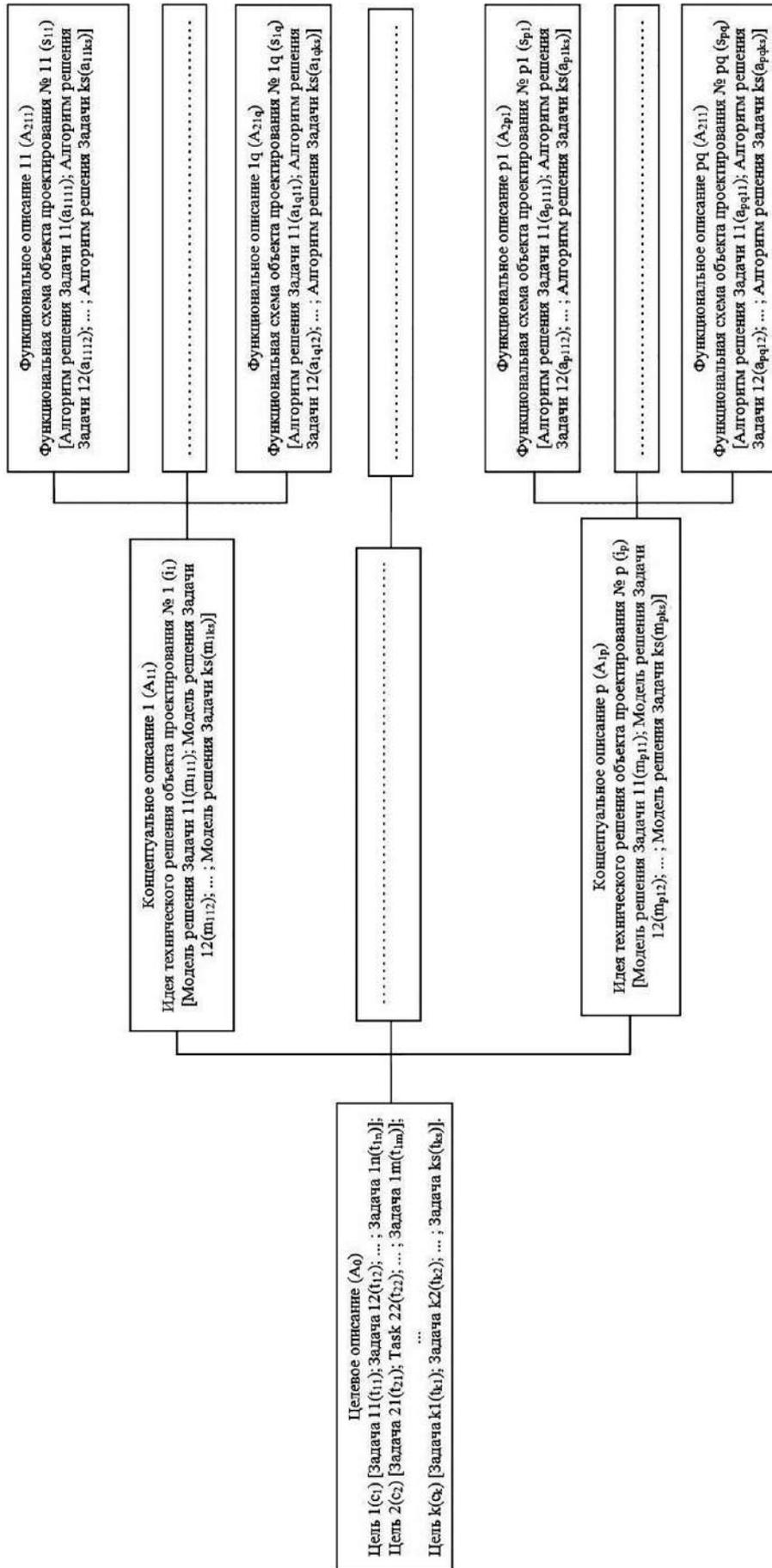


Рис. 1. Первые три этапа проектирования МКА ТН



Рис. 2. Схема целевого и концептуального описания МКА ТН

Данное описание является основой концептуальной модели МКА ТН.

Анализ аспектов концептуальной модели МКА ТН

Рассмотрим основные аспекты концептуального моделирования для представленного на рис. 2 концептуального описания, согласно методологии [1] с сохранением целостности объекта моделирования.

Процессный аспект (представление объекта проектирования в виде системы процессов). Для проектируемого МКА ТН систему процессов образуют следующие процессы:

- целевого функционирования (работа целевой аппаратуры, обеспечивающая выполнение целевых задач);
- обеспечивающие процессы (обеспечение условий проведения гравитационно-чувствительного процесса по энергопотреблению, микроускорениям, температурному режиму и т. д.);
- контроля (состояния гравитационно-чувствительного процесса, параметров движения МКА ТН, функционирования целевой и обеспечивающей аппаратуры);
- доставки результатов (транспортировка результатов реализации гравитационно-чувствительного процесса до базовой станции).

Процессный аспект концептуального моделирования позволяет решать задачу изучения, обобщения и критического анализа данных о проектируемом изделии для определения его проектных параметров.

Функциональный аспект (представление объекта проектирования в виде системы функций). В рамках данного аспекта отдельные элементы МКА ТН наделяются функциями, выполнение которых обеспечивает достижение цели выполнением всех целевых задач, которые в данном случае заключаются в реализации гравитационно-чувствительного процесса на борту МКА ТН. Эти элементы объединяются в функциональные блоки, отвечающие за выполнение следующих функций:

- непосредственная реализация гравитационно-чувствительного процесса;

- управление условиями реализации гравитационно-чувствительного процесса;
- контроль эффективности управления;
- доставка результатов реализации гравитационно-чувствительного процесса.

Анализ функционального аспекта позволяет выявлять возможные варианты конструктивных решений и проводить оценку эффективности этих вариантов.

Методный аспект (представление объекта проектирования в виде системы устройств, которые реализуют его основные функции). Он позволяет сосредоточить концептуальную модель на тех функциональных блоках, которые являются специфическими для проектируемого МКА ТН. С одной стороны, доставка результатов реализации гравитационно-чувствительного процесса является унифицированным функциональным блоком, практически не зависящим от содержания целевых задач. С другой стороны, функциональный блок управления условиями реализации гравитационно-чувствительного процесса содержит выполнение специфических требований по микроускорениям и должен подробно рассматриваться в концептуальной модели, так как их выполнение приведет к существенным отличиям МКА ТН от других МКА.

Данный аспект призван решать задачу выбора оптимального, с точки зрения эффективности решения целевых задач, варианта, сосредоточившись на одном или весьма ограниченном числе проектных решений.

Информационный аспект (представление объекта проектирования в виде информационной системы). Поскольку для эффективного решения целевых задач, стоящих перед МКА ТН, необходим постоянный контроль состояния протекания реализуемого процесса и поля микроускорений в рабочей зоне технологического оборудования, то эта система представляет собой информационно-измерительную управляющую систему. В рамках процессного аспекта эта система будет отнесена к процессам контроля, входя функционально в состав функционального блока контроля эффективности управления.

Декомпозиция концептуальной модели МКА ТН

Проведем декомпозицию концептуальной модели, согласно методологии, представленной в работе [1].

Построение концептуальной модели предметной области.

Данная модель строится, исходя из целевых задач МКА ТН, условий его функционирования в космическом пространстве с выделением всех факторов, формирующих технический облик МКА ТН. Результатом построения модели является четкое представление о процессах, происходящих в МКА ТН, целях управления этими процессами с учетом наложенных связей различного рода неопределенностей [1].

Поскольку непосредственная реализация гравитационно-чувствительного процесса и проектирование целевой аппаратуры находятся за пределами задачи проектирования МКА ТН (требуется только компоновка этой аппаратуры и информационно-измерительной управляющей системы), то концептуальной моделью предметной области будет являться модель поля микроускорений внутренней среды микрогравитационной платформы, которая будет обеспечивать требуемые значения микроускорений [18].

Рассмотрим механическую микрогравитационную платформу (рис. 3) [19].

Пусть оси x, y и z параллельны соответствующим осям главной связанной системы координат МКА ТН. Для абсолютного ускорения центра масс \vec{w}_C^e подвижной части микрогравитационной платформы можно записать следующее выражение:

$$\vec{w}_C = \vec{w}'_C + \vec{w}^e_C + \vec{\omega}_e \times \vec{\omega}_e \times \vec{r}_C + \vec{\varepsilon}_e \times \vec{r}_C + \vec{w}^K_C, \quad (3)$$

где \vec{w}'_C – относительное ускорение точки С относительно неподвижной части платформы; \vec{w}^e_C – переносное ускорение, связанное с поступательной частью движения основания платформы; $\vec{\omega}_e \times \vec{\omega}_e \times \vec{r}_C$ – переносное центробежное ускорение; $\vec{\varepsilon}_e \times \vec{r}_C$ – переносное вращательное ускорение; \vec{r}_C – радиус-вектор точки С относительно центра масс МКА; \vec{w}^K_C – ускорение Кориолиса.

Выражение для абсолютного ускорения (3) можно упростить, используя предположение о малости абсолютной величины перемещения подвижной части платформы. По данным работы [20] на реальных микрогравитационных платформах

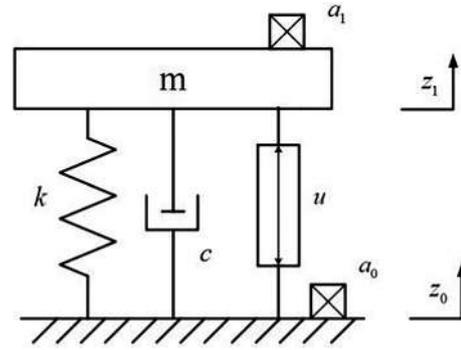


Рис. 3. Схема механической микрогравитационной платформы

оно составляет примерно 2 мм. Тогда можно пренебречь центробежным ускорением, а также ускорением Кориолиса при оценке абсолютного ускорения (3):

$$\vec{w}_C = \vec{w}'_C + \vec{w}^e_C + \vec{\varepsilon}_e \times \vec{r}_C. \quad (4)$$

Угловое ускорение переносного движения МКА ТН может быть получено из динамических уравнений Эйлера (5), где

$$\hat{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \text{ – тензор инерции МКА ТН;}$$

$\vec{M}^e (M_x, M_y, M_z)$ – вектор возмущающих моментов относительно центра масс МКА.

Поскольку оси x, y и z параллельны соответствующим осям главной связанной системы координат, то уравнения (5) упрощаются:

$$\begin{cases} I_{xx}^* \dot{\omega}_x + \dot{I}_{xx}^* \omega_x + \omega_y \omega_z (I_{zz}^* - I_{yy}^*) = M_x; \\ I_{yy}^* \dot{\omega}_y + \dot{I}_{yy}^* \omega_y + \omega_x \omega_z (I_{xx}^* - I_{zz}^*) = M_y; \\ I_{zz}^* \dot{\omega}_z + \dot{I}_{zz}^* \omega_z + \omega_x \omega_y (I_{yy}^* - I_{xx}^*) = M_z, \end{cases} \quad (6)$$

где $\hat{I}^* = \begin{bmatrix} I_{xx}^* & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy}^* & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz}^* \end{bmatrix}$ – тензор инерции МКА относительно системы координат, показанной на рис. 3.

Задачей обеспечения требуемых значений микроускорений будет подбор демпфирующих характеристик и разработка законов управления

$$\begin{cases} I_{xx} \dot{\omega}_x + \dot{I}_{xx} \omega_x - I_{xy} \dot{\omega}_y - \dot{I}_{xy} \omega_y - I_{xz} \dot{\omega}_z - \dot{I}_{xz} \omega_z + \omega_y (I_{zz} \omega_z - I_{xz} \omega_x - I_{yz} \omega_y) - \omega_z (I_{yy} \omega_y - I_{xy} \omega_x - I_{yz} \omega_z) = M_x; \\ I_{yy} \dot{\omega}_y + \dot{I}_{yy} \omega_y - I_{xy} \dot{\omega}_x - \dot{I}_{xy} \omega_x - I_{yz} \dot{\omega}_z - \dot{I}_{yz} \omega_z + \omega_z (I_{xx} \omega_x - I_{xy} \omega_y - I_{xz} \omega_z) - \omega_x (I_{zz} \omega_z - I_{xz} \omega_x - I_{yz} \omega_y) = M_y; \\ I_{zz} \dot{\omega}_z + \dot{I}_{zz} \omega_z - I_{xz} \dot{\omega}_x - \dot{I}_{xz} \omega_x - I_{yz} \dot{\omega}_y - \dot{I}_{yz} \omega_y + \omega_x (I_{yy} \omega_y - I_{xy} \omega_x - I_{yz} \omega_z) - \omega_y (I_{xx} \omega_x - I_{xy} \omega_y - I_{xz} \omega_z) = M_z, \end{cases} \quad (5)$$

подвижной частью микрогравитационной платформы, влияющих на относительное ускорение подвижной части при наблюдении приближенного равенства:

$$\vec{w}_C^e + \vec{\varepsilon}_e \times \vec{r}_C \approx -\vec{w}_C^r. \quad (7)$$

Построение обобщенной концептуальной модели процессов

Эта модель отражает структуру процессов на самом общем уровне их представления, причинно-следственные связи между этими процессами. При этом происходит разделение их на управляемые и неуправляемые процессы. Результатом построения модели является представление о структуре ее основных процессов [1].

Главным процессом в случае МКА ТН, является гравитационно-чувствительный процесс, определяющий требования:

- к технологическому оборудованию;
- к величине микроускорений;
- к обеспечивающей аппаратуре (энергоснабжению, температурному режиму и т. д.);
- к информационно-измерительной системе контроля параметров процесса.

В рамках данной работы разработана структура основных процессов, которые обеспечивают решение целевых задач МКА ТН. Она представлена на рис. 4.

Из всех процессов, показанных на рис. 4, полностью неуправляемым является процесс воздействия внешних возмущающих факторов. Процесс воздействия внутренних возмущающих факторов относится к частично управляемым процессам, поскольку допускает управление, например, путем отключения вспомогательной обеспечивающей аппаратуры. Однако полностью контролировать этот процесс практически невозможно. Остальные процессы, показанные на рис. 4, являются управляемыми.

Процессы штатного функционирования различной аппаратуры связаны с ее проектированием, поэтому в контексте данной работы являются частными

вопросами и не будут рассмотрены подробно. То же относится и к процессу контроля параметров и состояния гравитационно-чувствительного процесса.

Важную роль при проектировании МКА ТН играет процесс обеспечения требований по микроускорениям, нарушение которых не позволяет выполнить МКА ТН целевую задачу. Поэтому, несмотря на центральное место гравитационно-чувствительного процесса в обобщенной концептуальной модели процессов (рис. 4), процесс обеспечения требований по микроускорениям во многом является определяющим при выборе технического облика МКА ТН. С точки зрения самого проектирования он заслуживает особого внимания.

Построение концептуальных моделей контуров управления МКА ТН

В рамках данных моделей формируется структура процессов управления, моделируемых независимо друг от друга с учетом возникающих при реализации управления неопределенностей [1].

Описанная выше концептуальная модель процессов в контексте их управляемости формирует следующие контуры управления:

- управление реализацией гравитационно-чувствительного процесса;
- управление функционированием целевой и обеспечивающей аппаратуры;
- управление полем микроускорений.

Контуры управления реализацией гравитационно-чувствительного процесса и управления функционированием целевой и обеспечивающей аппаратуры в данной работе подробно не рассматриваются. Специфичным, характерным только для МКА ТН и во многом определяющим его технический облик является контур управления полем микроускорений. Он играет решающую роль в концептуальной модели МКА ТН, поэтому рассматривается подробно. Возможна дальнейшая декомпозиция контура управления полем микроускорений, основанная на концептуальном опи-



Рис. 4. Структура основных процессов МКА ТН



Рис. 5. Структурная схема процессов управления с частичной детализацией

сании МКА ТН (см. рис. 2) и структуре основных процессов (см. рис. 4). Она представлена на рис. 5 в составе структурной схемы процессов управления.

Из этой схемы, представленной на рис. 5, видно, что управление полем микроускорений в настоящей работе предлагается проводить по трем уровням:

- управление микрогравитационной платформой;
- управление движением МКА ТН;
- управление функционированием обеспечивающей аппаратуры.

В современной литературе в основном считается, что при описании процесса управления полем микроускорений достаточно рассмотреть уровень управления микрогравитационной платформой. Однако это не совсем так. В данной работе предполагается рассмотрение второго контура управления. При этом предлагается идея совместного согласованного управления микрогравитационной платформой и орбитальным движением МКА ТН. Реализация этой идеи может существенно расширить возможности микрогравитационных платформ по снижению микроускорений в защищенной зоне, поскольку их уровень во всей внутренней среде МКА ТН будет снижен благодаря управлению его орбитальным движением.

Построение концептуальных моделей подсистем МКА ТН

Эти модели призваны осуществлять последовательное воплощение организации МКА ТН в рамках сформированных структур контуров управления и основных процессов в проект технического облика МКА ТН, представляя собой взаимосвязанную и взаимодополняющую сеть моделей МКА ТН, благодаря которым и в которых формируется его целостный технический облик [1].

В свете структур основных процессов (см. рис. 4) и контуров управления этими процессами (рис. 5) представим общую концептуальную модель подсистем МКА ТН, разделенных на целевые (не-

посредственно предназначенные для реализации гравитационно-чувствительного процесса с контролем параметров состояния) и обеспечивающие (необходимые для создания условий при реализации процесса, функционирования целевой аппаратуры и приема-передачи различной информации). Структурная схема такой модели показана на рис. 6.

На рис. 6 отдельно выделены только те подсистемы МКА ТН, которые имеют свои особенности в свете специфических требований к реализации гравитационно-чувствительного процесса. При построении концептуальной модели системы управления движением МКА ТН следует отметить, что применение микрогравитационных платформ изменило концепцию обеспечения выполнения требований по микроускорениям. Они удовлетворяются не во всем внутреннем объеме КА, а лишь в защищенной зоне платформы. Поэтому разработка законов управления платформой является главной задачей для выполнения этих требований. Однако, по мнению авторов работы, в случае с МКА такая концепция уже исчерпала себя. Подтверждением этого вывода служит отсутствие на данный момент реализованного проекта МКА ТН. Предлагаются варианты разработки двухконтурной микрогравитационной платформы [21] или установки избыточного количества средств измерений для более точного контроля реализации закона управления [22]. Однако возможно вернуться к тому, от чего ушли с началом применения микрогравитационных платформ: управлению орбитальным движением для снижения микроускорений во всей внутренней среде МКА ТН. При этом задачу выполнения требований по микроускорениям по-прежнему будут решать исполнительные органы системы управления микрогравитационной платформой. Но их возможности возрастут при снижении микроускорений во внутренней среде.

В работах [23–26] представлены оценки микроускорений во внутренней среде КА среднего класса при использовании двигателей-маховиков. Пред-

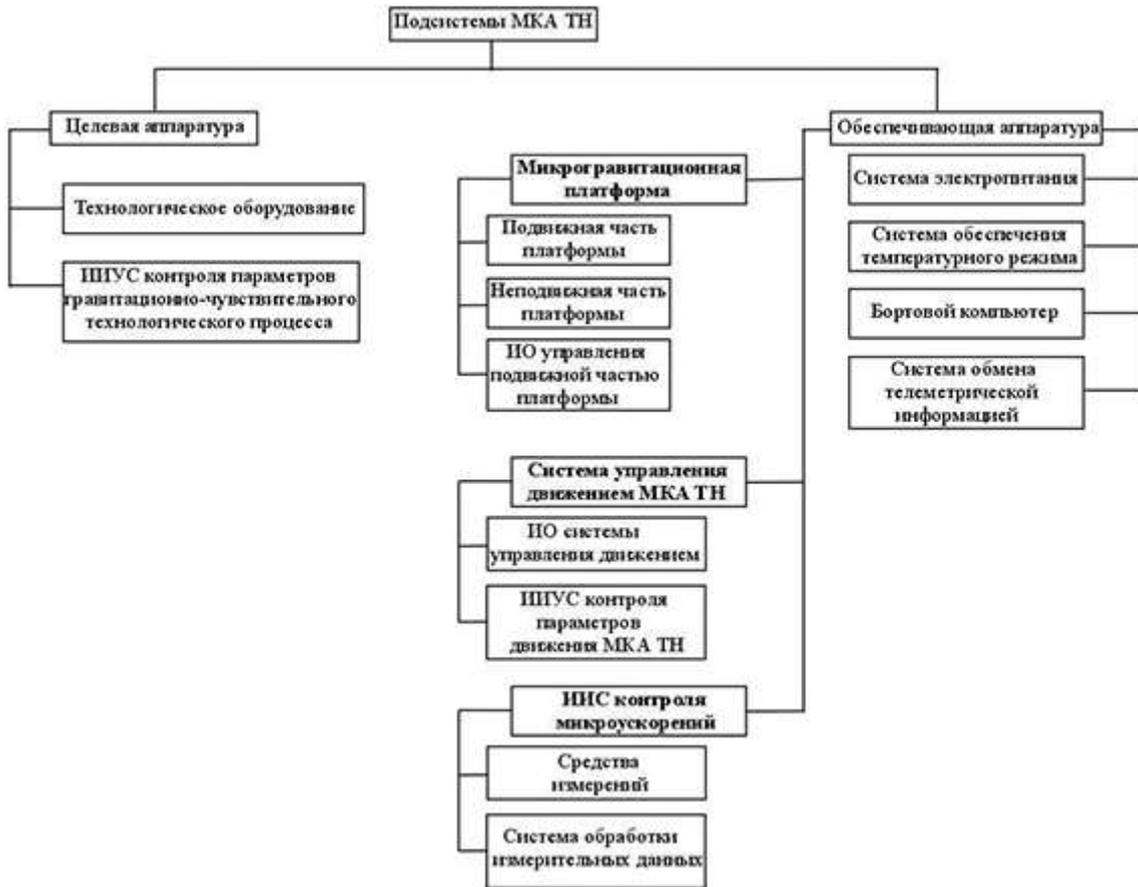


Рис. 6. Структурная схема подсистем МКА ТН с частичной детализацией

усмотрено двухконтурное снижение кинетического момента этих двигателей: с помощью электротермического микродвигателя при малых значениях угловой скорости двигателей-маховиков и жидкостных ракетных двигателей малой тяги для быстрого снижения при больших угловых скоростях. На МКА применение жидкостных ракетных двигателей малой тяги невозможно ввиду их чрезмерной для МКА тяги. В работе предлагается концептуальная модель, которая представлена на рис. 7.

Воздействие возмущений вызывает увеличение угловой скорости вращения двигателей-маховиков и, следовательно, их кинетического момента. В большинстве случаев комплекс управляющих двигателей-маховиков содержит двигатель, ось которого располагается под некоторым углом к осям трех основных двигателей, что позволяет некоторое время управлять вращательным движением МКА при достижении одним из основных двигателей максимальной угловой скорости. Для снижения



Рис. 7. Концептуальная модель системы управления движением МКА ТН



Рис. 8. Целевое и концептуальное описание системы управления движением

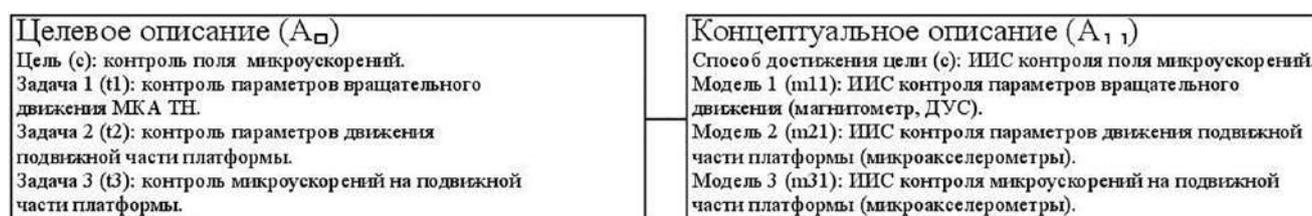


Рис. 9. Целевое и концептуальное описание информационно-измерительной системы контроля микроускорений

кинетического момента в предлагаемой концептуальной модели предусмотрены магнитные исполнительные органы. При работе они не создают микроускорений, способных нарушить допустимые значения. Для быстрого снижения кинетического момента предлагается использовать электротермический микродвигатель. В работе [27] были экспериментально исследованы его возможности и показана реализуемость данной идеи.

Таким образом, можно представить целевое и концептуальное описание СУД МКА ТН как подсистемы МКА ТН (подобно рис. 3 для всего МКА ТН) при реализации предлагаемой идеи снижения микроускорений за счет управления движением МКА ТН во всей его внутренней среде (рис. 8).

Концептуальная модель информационно-измерительной системы контроля микроускорений содержит три уровня контроля:

- контроль параметров вращательного движения МКА ТН;
- контроль управления подвижной частью микрогравитационной платформы;
- контроль микроускорений на подвижной части микрогравитационной платформы.

Целевое и концептуальное описания этой системы как подсистемы МКА ТН, представлено на рис. 9.

Приведенные элементы составляют целостную концептуальную модель МКА ТН.

Выводы

Таким образом, построена концептуальная модель МКА ТН, соответствующая методологии [1], которая позволяет проектировать МКА ТН для

различных гравитационно-чувствительных процессов, максимально учитывая их особенности. При построении модели отдельно были выделены те элементы, которые отличают проектируемый МКА ТН от других МКА, предназначенных для решения задач, не связанных с космическими технологиями. Важными результатами работы являются целевые и концептуальные описания как МКА ТН в целом, так и отдельных его подсистем. Они формируют будущий технический облик проектируемого МКА ТН. Проведена декомпозиция концептуальной модели на четыре блока: концептуальная модель предметной области, обобщенная концептуальная модель процессов, концептуальные модели контуров управления МКА ТН и концептуальные модели подсистем МКА ТН. Описан каждый блок концептуальной модели, выделены особенности МКА ТН, позволяющие формировать технический облик изделия.

Список источников

1. Никаноров С.П., Никитина Н.К., Теслинов А.Г. Введение в концептуальное проектирование АСУ: анализ и синтез структур. – 2-е изд., репр. – М.: Аналитический центр «Концепт», 2007. – 235 с.
2. Оптнер С.Л. Системный анализ для решения проблем бизнеса и промышленности / Пер. с англ., вступ. ст. С.П. Никанорова. – 2-е изд. – М.: Аналитический центр «Концепт», 2003. – 206 с.
3. Камаев В.А., Бутенко Л.Н., Дворянкин А.М. и др. Концептуальное проектирование. Развитие и совершенствование методов. – М.: Машиностроение, 2005. – 321 с.
4. Ярушин С.Г., Схиртладзе А.Г. Проектирование нестандартного оборудования: Учебник – 2-е изд., перераб. и доп. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2004. – 440 с.

5. Zhang X., Yuan L., Wu W. et al. Some key technics of drop tower experiment device of National Microgravity Laboratory (China) (NMLC) // *Science in China Ser. E Engineering & Materials Science*. 2005. Vol. 48. No. 3, pp. 305–316. DOI: 10.1360/102004-21
6. Bisht K.S., Dreyer M.E. Phase Separation in Porous Media Integrated Capillary Channels // *Microgravity Science and Technology*. 2020. Vol. 32. No. 6, pp. 1001–1018. DOI: 10.1007/s12217-020-09828-6
7. Седельников А.В. Контроль микроускорений как важнейшей характеристики космической лаборатории специализированного технологического назначения конструктивными методами // *Контроль. Диагностика*. 2014. № 7. С. 57–63.
8. Winisdoerffer F., Lamothe A., Bourdeau'hui J.C. Assessment of crew operations during internal servicing of the Columbus Free-Flyer by Hermes Freedom // *Acta Astronautica*. 1991. Vol. 25. No. 1, pp. 23–41.
9. Kibo Handbook. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) Human Space System and Utilization Program Group. – 2007. – 130 p.
10. Бэлю Л., Стулингер Э. Орбитальная станция «Скайлэб» / Сокр. пер. с англ. Г.С. Швырковой, Б.П. Круглова, В.Г. Кехваянца; Под общ. ред. д.ф.-м.н. Г.Л. Гродзовского. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
11. Kang Q., Wu D., Duan L. et al. Space experimental study on wave modes under instability of thermocapillary convection in liquid bridges on Tiangong-2 // *Physics of Fluids*. 2020. Vol. 32. No. 3: 034107. DOI: 10.1063/1.5143219
12. Анишаков Г.П., Белоусов А.И., Седельников А.В. Проблема оценки микроускорений на космическом аппарате «Фотон–М» № 4 // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2017. № 1. С. 80–86.
13. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Анишаков Г.П. и др. Вклад «ЦСКБ-Прогресс» в развитие космической биологии и медицины: программа «БИОН» // *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*. 2013. № 11. С. 3–16.
14. Hu W.R., Zhao J.F., Long M. et al. Space Program SJ-10 of Microgravity Research // *Microgravity Science and Technology*. 2014. Vol. 26. No. 3, pp. 159–169. DOI: 10.1007/s12217-014-9390-0
15. Научная аппаратура «Ростовая установка» КБ РЭ. URL: <https://www.sdbireras.ru/predpriyatje/razrabotki/pauchnaya-apparatura-gostovaya-ustanovka>
16. Ёлкин К.С., Иванов А.И., Незнамова Л.О., Прудкогляд В.О. Перспективы создания вакуумных и гравитационно-чувствительных технологий, использующих условия космического полета на околоземных орбитах. Исследование гравитационно-чувствительных явлений на борту отечественных космических аппаратов. – М.: ЗАО НИИ ЭНЦИТЕХ, 2013. – 306 с.
17. Кирилин А.Н., Ткаченко С.И., Салмин В.В. и др. Малые космические аппараты серии «Аист» (проектирование, испытания, эксплуатация, развитие). – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2017. – 348 с.
18. Белоусов А.И., Седельников А.В. Проблемы формирования и контроля требуемого уровня микроускорений при испытаниях и эксплуатации КА // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2014. № 2. С. 3–7.
19. Qian Y., Xie Y., Jia J. et al. Development of Active Microvibration Isolation System for Precision Space Payload // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No. 9: 4548. DOI: 10.3390/app120945
20. Kerber F., Hurlebaus S., Beadle B.M. et al. Control concepts for an active vibration isolation system // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2007. Vol. 21. No. 8, pp. 3042–3059. DOI: 10.1016/J.YMSSP.2007.04.003
21. 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. 9. DOI: 10.1007/s12217-022-10027-8
22. Zhou X., Chen W., Zhao F. et al. Dynamic Modeling and Active Vibration Isolation of a Noncontact 6-DOF Lorentz Platform Based on the Exponential Convergence Disturbance Observer // *Shock and Vibration*. 2021. DOI: 10.1155/2021/6641863
23. Анишаков Г.П., Белоусов А.И., Седельников А.В. и др. Оценка эффективности использования электротермических микродвигателей в системе управления движением космического аппарата технологического назначения // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2018. № 3. С. 28–34.
24. Седельников А.В., Танеева А.С., Орлов Д.И. Формирование проектного облика малого космического аппарата технологического назначения на основе опыта проектирования и эксплуатации космических аппаратов технологического назначения других классов // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27. № 3. С. 84–93. DOI: 10.34759/vst-2020-3-84-93
25. Седельников А.В., Белоусова Д.А., Орлов Д.И. и др. Оценка влияния температурного удара на динамику орбитального движения космического аппарата технологического назначения // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26. № 4. С. 200–208. DOI: 10.34759/vst-2019-4-200-208
26. Седельников А.В., Пузин Ю.Я., Филиппов А.С., Хнырева Е.С. Оценка эффективности программно-аппаратного средства обеспечения и контроля угловой скорости вращения малого космического аппарата // *Вестник Московского авиационного института*. 2018. Т. 25. № 4. С. 152–162.
27. Taneeva A.S., Lukyanchik V.V., Khnyryova E.S. 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*. Ser. “International Conference on Automatics and Energy, ICAE 2021” (07–08 October 2021; Vladivostok, Russia). Vol. 2096(1): 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012059

References

1. Nikanorov S.P., Nikitina N.K., Teslinov A.G. *Vvedenie v kontseptual'noe proektirovanie ASU: analiz i sintez struktur* (Introduction to the conceptual design of automated control systems: analysis and synthesis of structures). 2nd ed. Moscow, Kontsept, 2007, 235 p.
2. Optner S.L. *Systems analysis for business and industrial problem solving*. Prenllee-I hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1965, 116 p.
3. Kamaev V.A., Butenko L.N., Dvoryankin A.M. et al. *Kontseptual'noe proektirovanie. Razvitiie i sovershenstvovanie metodov* (Conceptual design. Development and improvement of methods). Moscow, Mashinostroenie, 2005, 321 p.
4. Yarushin S.G., Skhirtladze A.G. *Proektirovanie nestandartnogo oborudovaniya* (Designing non-standard equipment: textbook). 2nd ed. Perm, PGU, 2004, 440 p.
5. Zhang X., Yuan L., Wu W. et al. Some key technics of drop tower experiment device of National Microgravity Laboratory (China) (NMLC). *Science in China Ser. E Engineering & Materials Science*, 2005, vol. 48, no. 3, pp. 305–316. DOI: 10.1360/102004-21
6. Bisht K.S., Dreyer M.E. Phase Separation in Porous Media Integrated Capillary Channels. *Microgravity Science and Technology*, 2020, vol. 32, no. 6, pp. 1001–1018. DOI: 10.1007/s12217-020-09828-6
7. Sedel'nikov A.V. *Kontrol'. Diagnostika*, 2014, no. 7, pp. 57–63.
8. Winisdoerffer F., Lamothe A., Bourdeau'hui J.C. Assessment of crew operations during internal servicing of the Columbus Free-Flyer by Hermes Freedom. *Acta Astronautica*, 1991, vol. 25, no. 1, pp. 23–41.
9. *Kibo Handbook. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) Human Space System and Utilization Program Group*. 2007, 130 p.
10. Belew L.F., Stuhlinger E. *Skylab. A Guidebook*. Periscope Film LLC, 2012, 264 p.
11. Kang Q., Wu D., Duan L. et al. Space experimental study on wave modes under instability of thermocapillary convection in liquid bridges on Tiangong-2. *Physics of Fluids*, 2020, vol. 32, no. 3: 034107. DOI: 10.1063/1.5143219
12. Anshakov G.P., Belousov A.I., Sedel'nikov A.V. *Izvestiya vuzov. Aviatsonnaya tekhnika*, 2017, no. 1, pp. 80–86.
13. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Anshakov G.P. et al. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2013, no. 11, pp. 3–16.
14. Hu W.R., Zhao J.F., Long M. et al. Space Program SJ-10 of Microgravity Research. *Microgravity Science and Technology*, 2014, vol. 26, no. 3, pp. 159–169. DOI: 10.1007/s12217-014-9390-0
15. *Nauchnaya apparatura "Rostovaya ustanovka". KB RE*. URL: <https://www.sdbireras.ru/predpriyatje/razrabotki/nauchnaya-apparatura-rostovaya-ustanovka>
16. Elkin K.S., Ivanov A.I., Neznamova L.O., Prudkoglyad V.O. *Perspektivy sozdaniya vakuumnykh i gravitatsionno-chuvstvitel'nykh tekhnologii, ispol'zuyushchikh usloviya kosmicheskogo poleta na okolozemnykh orbitakh. Issledovanie gravitatsionno-chuvstvitel'nykh yavlenii na bortu otechestvennykh kosmicheskikh apparatov* (Prospects for the creation of vacuum and gravity-sensitive technologies using the conditions of space flight in near-Earth orbits. Investigation of gravity-sensitive phenomena on board domestic spacecraft). Moscow, NII EHNTSITEKH, 2013, 306 p.
17. Kirilin A.N., Tkachenko S.I., Salmin V.V. et al. *Malye kosmicheskie apparaty serii "AisT"*. *Proektirovanie, ispytaniya, ehkspluatatsiya, razvitiie* (Small spacecraft of the Stork series. Design, testing, operation, development). Samara, Samarskii nauchnyi tsentr RAN, 2017, 348 p.
18. Belousov A.I., Sedel'nikov A.V. *Izvestiya vuzov. Aviatsonnaya tekhnika*, 2014, no. 2, pp. 3–7.
19. Qian Y., Xie Y., Jia J. et al. Development of Active Microvibration Isolation System for Precision Space Payload. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 9: 4548. DOI: 10.3390/app12094548
20. Kerber F., Hurlbausb S., Beadle B.M. et al. Control concepts for an active vibration isolation system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, vol. 21, no. 8, pp. 3042–3059. DOI: 10.1016/J.YMSSP.2007.04.003
21. 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. 9. DOI: 10.1007/s12217-022-10027-8
22. Zhou X., Chen W., Zhao F. et al. Dynamic Modeling and Active Vibration Isolation of a Noncontact 6-DOF Lorentz Platform Based on the Exponential Convergence Disturbance Observer. *Shock and Vibration*, 2021. DOI: 10.1155/2021/6641863
23. Anshakov G.P., Belousov A.I., Sedel'nikov A.V. et al. *Izvestiya vuzov. Aviatsonnaya tekhnika*, 2018, no. 3, pp. 28–34.
24. Sedel'nikov A.V., Taneeva A.S., Orlov D.I. Forming design layout of a technological purpose small spacecraft based on other class of technological spacecraft design and operation experience. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 84–93. DOI: 10.34759/vst-2020-3-84-93
25. Sedel'nikov A.V., Belousova D.A., Orlov D.I., Filippov A.S. Assessment of temperature shock impact on orbital motion dynamics of a spacecraft for technological purposes. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 200–208. DOI: 10.34759/vst-2019-4-200-208
26. Sedel'nikov A.V., Puzin Yu.Ya., Filippov A.S., Khnyreva E.S. Soft hardware efficiency estimation for a small spacecraft rotation angular velocity provision and monitoring. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 152–162.
27. Taneeva A.S., Lukyanchik V.V., Khnyryova E.S. 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. Ser. "International Conference on Automatics and Energy, ICAE 2021" (07–08 October 2021; Vladivostok, Russia)*. Vol. 2096(1): 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012059

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 22.02.2024; принята к публикации 29.02.2024.
The article was submitted on 17.01.2024; approved after reviewing on 29.02.2024; accepted for publication on 29.02.2024.