

**МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА ИМИТАЦИИ НЕВЕСОМОСТИ  
ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**И. В. Ковалев<sup>1</sup>, Ю. О. Кикоть<sup>2</sup><sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31<sup>2</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52  
E-mail: secret398@mail.ru

*Исследуется проблема возможности создания системы имитации невесомости в наземных условиях для крупногабаритных космических аппаратов. Предлагается упрощение и унификация конструкции системы имитации невесомости для подвижных элементов трансформируемых механизмов КА за счет блока управления на основе компьютера и микроконтроллера, соответствующего ПО и необходимого количество модулей обезвешивания. Предлагаемая система имитации невесомости не ограничивает зону проведения монтажно-сборочных работ с космическим аппаратом, т. е. может быть расположена в цехах, оборудованных подвесными кранами или кран-балками, не создавая помех для их работы, т. е. может монтироваться по месту на стенах, потолке и в сложенном состоянии не занимать рабочее пространство над космическим аппаратом.*

*Система имитации невесомости позволяет обезвешивать элементы конструкции, имеющие разную скорость движения, и преодолевать сложные траектории движения в процессе раскрытия, таким образом, имеется возможность постоянно удерживать весь объект в целом в обезвешенном состоянии. Кроме того, система имитации невесомости позволяет снимать весовые характеристики (посредством весоизмерительной ячейки) при наземных испытаниях – экспериментальном уточнении параметров при физической отработке механизмов раскрытия антенных систем космического аппарата. Данные впоследствии используются для более качественной имитации невесомости при раскрытии антенных систем космического аппарата.*

*Дается обоснование перспективности применения данной системы имитации невесомости, указываются её преимущества по сравнению с другими системами имитации невесомости.*

*Ключевые слова: система имитации невесомости, космический аппарат, управление, испытания, модуль обезвешивания, консольная конструкция.*

Vestnik SibGAU  
2014, No. 4(56), P. 173–178**MOBILE SYSTEM WEIGHTLESSNESS SIMULATION  
FOR A LARGE SPACECRAFT**I. V. Kovalev<sup>1</sup>, Y. O. Kikot<sup>2</sup><sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation<sup>2</sup>JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev  
52, Lenin str., Jelesnogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation  
E-mail: secret398@mail.ru

*We study the problem of the possibility of creating a system of weightlessness simulation in ground conditions for large spacecraft. It is proposed to simplify and unify the system design of weightlessness simulation for mobile elements transformed mechanisms SC by the control unit on the basis of the computer and the microcontroller, appropriate software and the necessary number of modules weightlessness simulation. The proposed system simulate weightlessness, does not limit the area of installation and assembly work with the spacecraft, i. e. may be located in the shops equipped with an overhead crane or crane girders, not interfering with their work, that is, can be mounted in place on the walls, the ceiling and in the folded position does not occupy a working space over the spacecraft.*

*The system simulating weightlessness allows weightlessness simulation structural elements having different speed and overcome the complex motion path during the expansion, so it is possible to constantly keep the whole object in general weightlessness state. In addition the system allows the simulation of weightlessness shoot weight characteristics (via the load cell) during ground tests – experimental specification parameters for physical development of mechanisms*

*disclosure of antenna systems of the spacecraft. They are subsequently used to better simulate weightlessness when disclosing antenna systems of the spacecraft.*

*The substantiation of the prospects of this system simulate weightlessness is given, its advantages in comparison with other systems simulate weightlessness is indicated.*

*Keywords: system of weightlessness simulation, spacecraft, control, test module weightlessness simulation cantilevered construction.*

**Введение.** Система имитации невесомости может найти применение в различных областях промышленности, прежде всего, авиационной и ракетно-космической. В частности, система относится к испытательной технике, к наземным испытаниям механизмов, имеющих гибкую, многозвенную конструкцию, рассчитанную на работу в невесомости.

Подобные конструкции (складные панели солнечных батарей космических аппаратов, раскрываемые многозвенные конструкции и т. п.) необходимо равномерно обезвешивать, прилагая усилие к каждому звену конструкции, в процессе перемещения этих звеньев относительно друг друга. Система имитации невесомости может быть использована для обезвешивания крупногабаритных трансформируемых конструкций и устранения деформаций или разрушений под действием силы тяжести при наземных испытаниях (экспериментального уточнения или идентификации параметров математической модели конструкции механизмов на Земле) или при физической отработке и проверке работы системы управления трансформируемыми конструкциями на Земле для проведения лётных испытаний [1; 2].

**Постановка задачи.** Создание стационарных порталных конструкций, на которых размещается система обезвешивания, предполагает строительство отдельного технологического участка, точное позиционирование космического аппарата (КА) или отдельных элементов его конструкции под соответствующими элементами системы. Это накладывает ограничения и создает дополнительные трудности при работе с крупногабаритными КА [3–8].

Возникает необходимость в конструкции, которая не ограничивает зону проведения монтажно-сборочных работ с КА, т. е. может быть расположена в цехах, оборудованных подвесными кранами или кран-балками, тем самым не создавая помех для их работы, т. е. может монтироваться по месту на стенах, потолке и в сложенном состоянии не занимать рабочее пространство над КА. Сказанное дает возможность позиционировать научную задачу разработки «мобильной» системы имитации невесомости как новую и актуальную.

**Цель изобретения.** Целью изобретения является упрощение и унификация конструкции, создание возможности имитации невесомости в наземных условиях для подвижных элементов трансформируемых механизмов КА больших габаритов и значительных перемещений обезвешиваемых подвижных элементов конструкций, предназначенных для работы в состоянии невесомости. Указанная цель достигается тем, что в предлагаемой системе имитации невесомости имеется блок управления на основе компьютера и микроконтроллера, соответствующее

программное обеспечение и необходимое количество модулей обезвешивания, соответствующих требуемому количеству точек приложения усилия обезвешивания.

**Описание разработанной мобильной системы имитации невесомости.** Каждый модуль обезвешивания представляет собой консольную конструкцию, крепящуюся на стену или потолок, имеющую возможность вращения относительно точки крепления, подобно электрическому консольному крану с сервоприводом. В зависимости от точки крепления достигается требуемый угол поворота стрелы. В случае крепления на стену угол поворота стрелы – 180°, в случае крепления на потолок – 360°. Второй сервопривод установлен на некотором расстоянии от первого на стреле и позволяет вращаться на 270° второй части конструкции относительно первой. Совместным согласованным движением по радиусам поворота обеих сервоприводов достигается требуемая траектория движения грузозахватного органа, устанавливаемого на конце второй части конструкции.

Модульный принцип построения позволяет адаптировать систему под различные характеристики из небольшого, экономически обоснованного количества типоразмеров модулей, которые подбираются, исходя из геометрии и необходимого числа точек приложения усилия обезвешивания применительно к конкретному объекту. Кроме этого, конструкция позволяет расположить точки приложения усилий обезвешивания компактно, когда первоначально элементы обезвешиваемого объекта находятся в сложенном положении, располагая модули на стенах или потолке по разные стороны от обезвешиваемого объекта, а затем по мере раскрытия и приведения в рабочее состояние перемещать эти точки – каждую по самостоятельной траектории с разными скоростями в следящем режиме, по мере раскрытия (перемещения) составных частей объекта обезвешивания [9–12].

С учетом вышеизложенного создана универсальная система имитации невесомости. Система включает в себя (рис. 1) блок управления 1 и необходимое количество модулей обезвешивания (для примера на рис. 1 показана система с двумя модулями 2 и 3).

Каждый модуль 2 или 3 (рис. 2) включает в себя два сервопривода (М1 и М2). Первый сервопривод 4 крепится к стене или к потолку. На рабочий вал 6 сервопривода 4 крепится поворотная консоль 7, на конце которой расположен второй сервопривод 5, в свою очередь, имеющий собственную поворотную консоль 8, на конце которой находится грузозахватный орган 9 (рис. 3). Грузозахватный орган 9 состоит из весоизмерительной ячейки 10, соединенной с платформой 11, на которой установлен электропривод 12, редуктор

которого связан с катушкой 13, на которой намотан строп 14. Строп идет на тросоукладчик 15, на котором

установлен датчик угла 16, определяющий его вертикальное отклонение, и датчик расхода стропа 17.

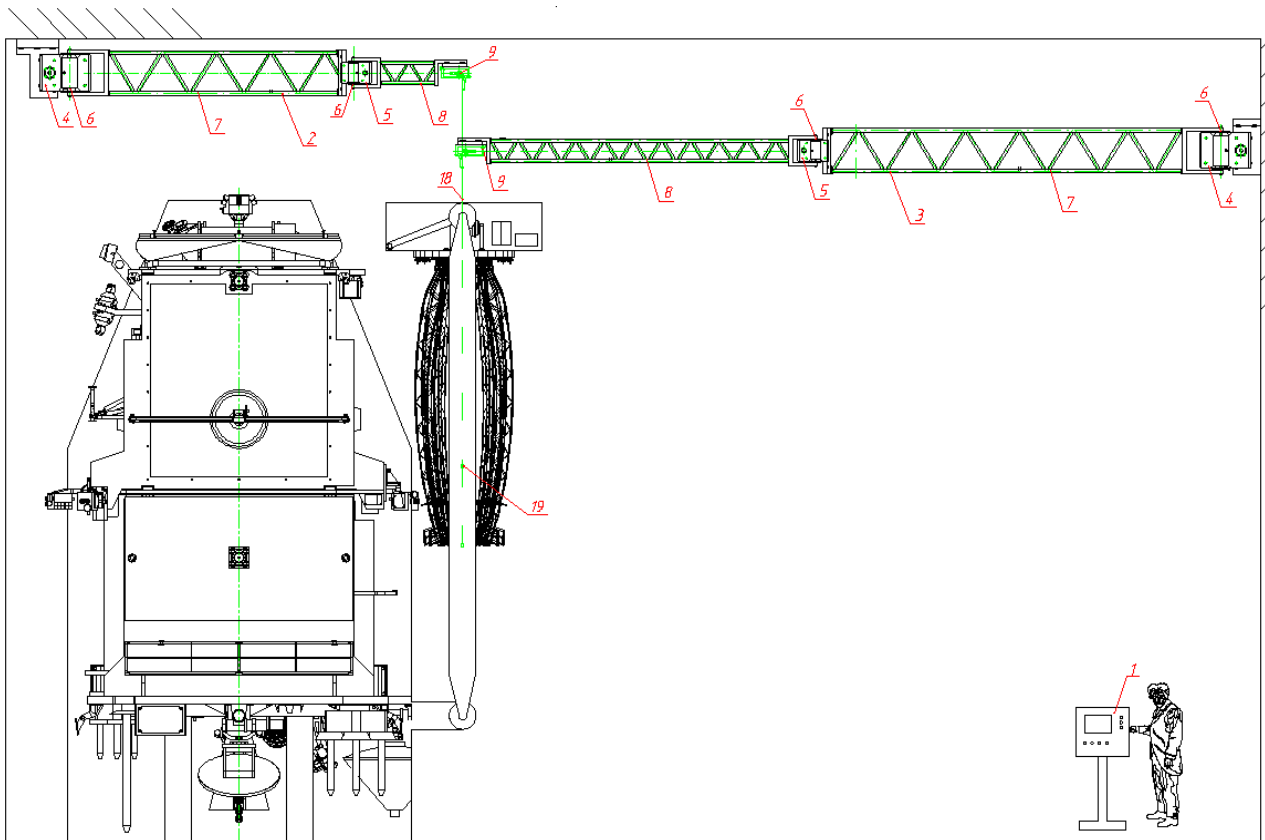


Рис. 1. Исходное положение

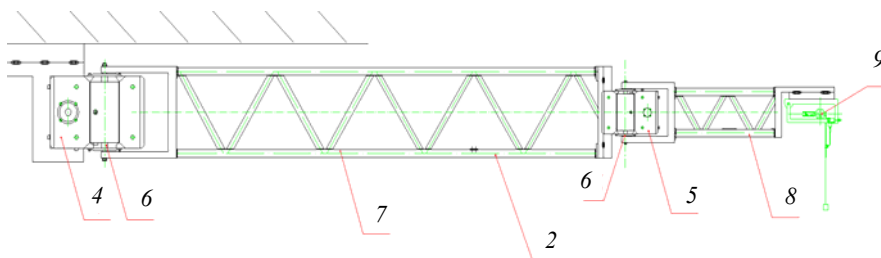


Рис. 2. Модуль обезвешивания

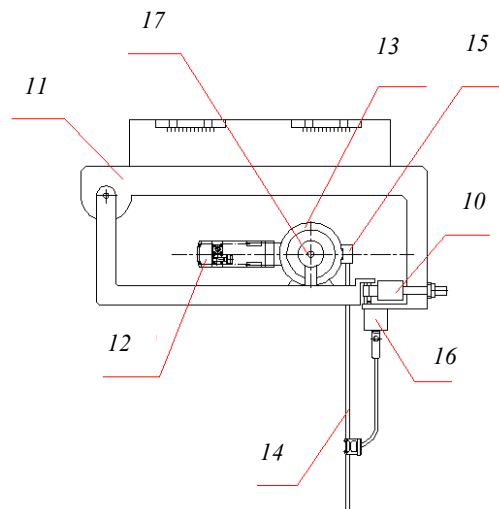


Рис. 3. Грузозахватный орган

В целом предлагаемая система имитации невесомости работает следующим образом:

- перед процессом раскрытия устанавливается необходимое количество модулей 2 и 3, соответствующее количеству точек приложения усилия обезвешивания, гибкие связи 18 грузозахватного органа 9 присоединяются к элементам обезвешиваемого объекта 19, находящегося в сложенном положении (см. рис. 1);

- при раскрытии элементы обезвешиваемого объекта 19 (рис. 4 и 5) начинают поступательное движение, система имитации невесомости по сигналам с датчиков угла 16 осуществляет позиционирование модулей 2 и 3 таким образом, чтобы гибкие связи 18 были вертикальными по отношению к объекту обезвешивания 19 вплоть до конечного расположения системы (рис. 5).

Сигналы с датчика угла 16 поступают в систему управления 1, в которой задаются алгоритм и динамические характеристики (скорости, ускорения) сервоприводов (М1 и М2) с целью поддержания вертикальности гибкой связи 18.

Система имитации невесомости позволяет обезвешивать элементы конструкции, имеющие разную скорость движения в процессе раскрытия, так как работает в следящем режиме по сигналам с датчиков угла отклонения 16, и каждый модуль 2 и 3 системы работает на «свой» элемент обезвешиваемой конструкции 19. Таким образом, имеется возможность удерживать весь объект в целом в обезвешенном состоянии. Так, в приведенном примере (рис. 6) модуль 2 проходит прямолинейную траекторию от точки А до точки В, а модуль 3 проходит сложную траекторию от точки А до точки С и далее – до точки D.

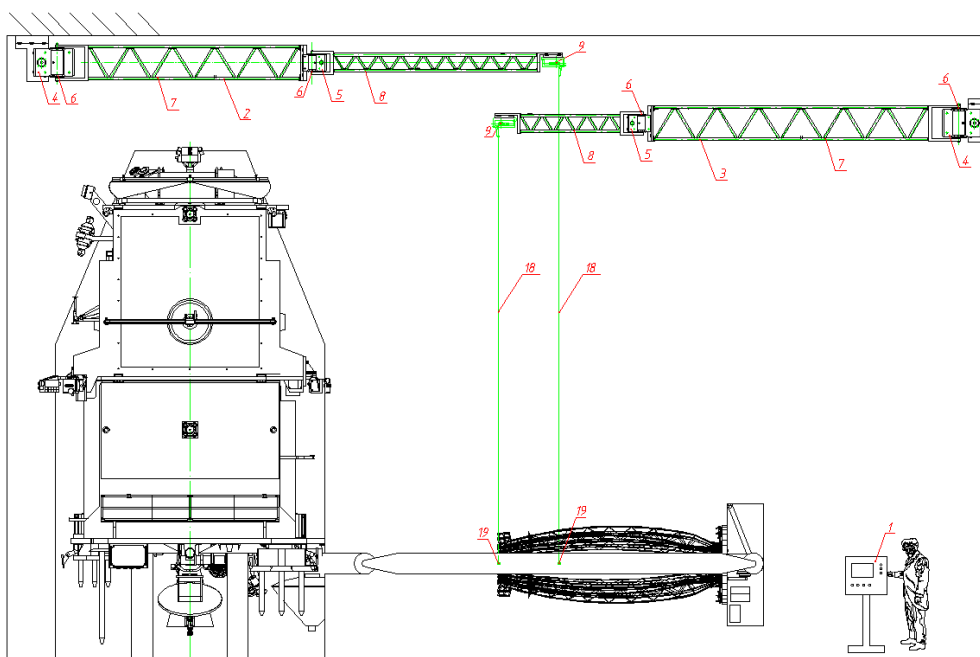


Рис. 4. Промежуточное положение

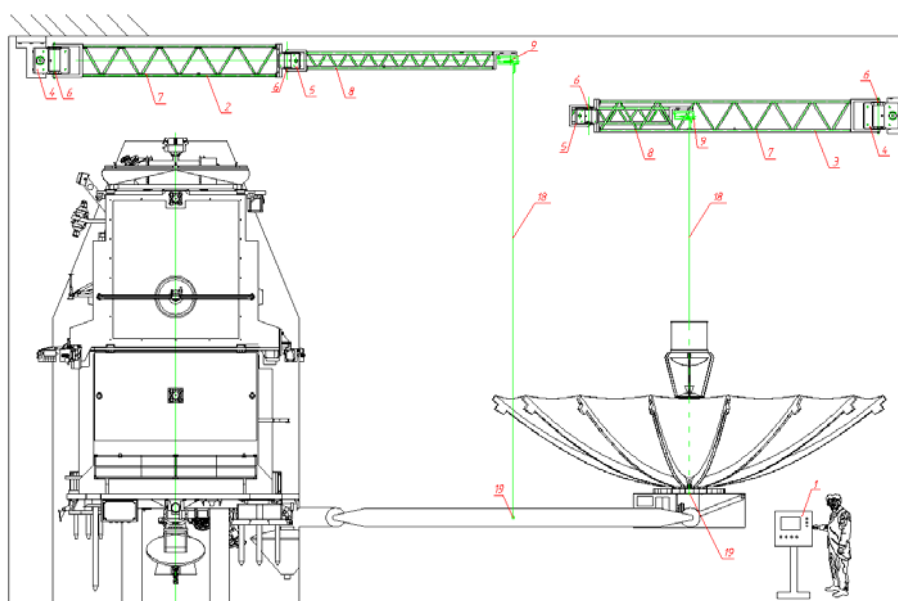


Рис. 5. Конечное положение

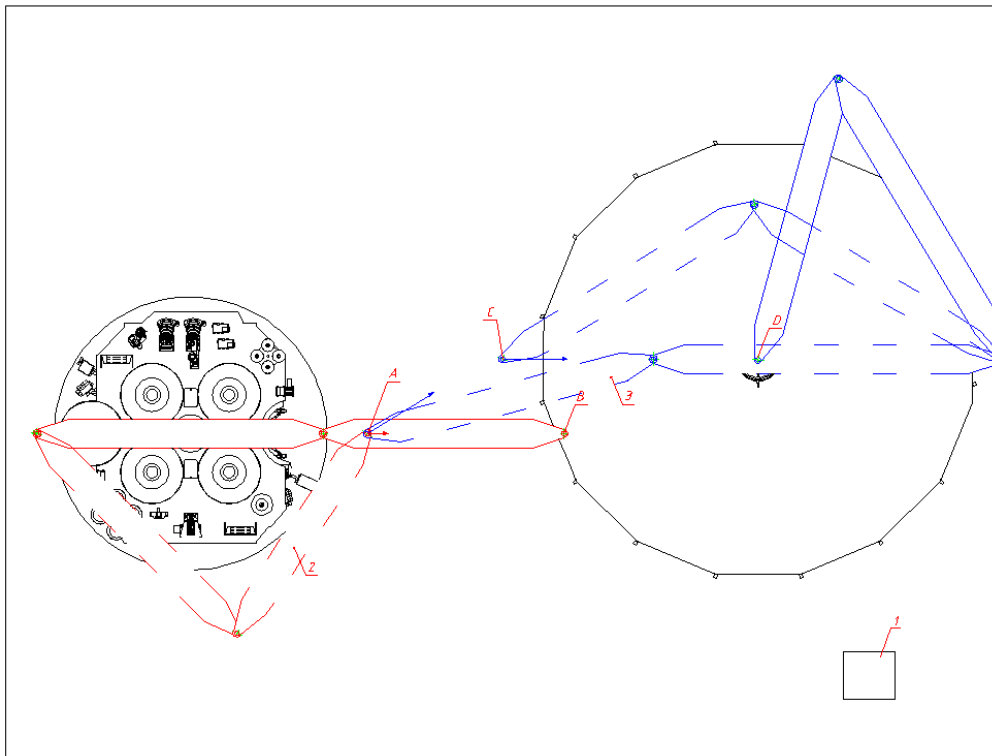


Рис. 6. Вид сверху

**Заключение.** При больших габаритах и сложных конструкциях приводов раскрытия антенных систем зачастую сложно предоставить точные расчетные данные необходимых усилий обезвешивания, включающих в себя не только собственно массовесовые характеристики конструкции, но усилия и моменты, связанные с динамическими характеристиками процесса раскрытия [12–15]. Предлагаемая система имитации невесомости позволяет снимать весовые характеристики (посредством весоизмерительной ячейки), при наземных испытаниях – экспериментальном уточнении параметров при физической отработке механизмов раскрытия антенных систем КА. Данные впоследствии используются для более качественной имитации невесомости при раскрытии антенных систем КА.

#### Библиографические ссылки

1. Фатеева В. Ф. Малые космические аппараты информационного обеспечения / под ред. В. Ф. Фатеева. М. : Радиотехника, 2010. 320 с.
2. Авиапанорама : междунар. авиационно-космический журнал [Электронный ресурс]. 2003–2004. URL: <http://aviapanorama.su>.
3. Новости космонавтики : научно-популярный журнал [Электронный ресурс]. 2013–2014. URL: <http://novosti-kosmonavtiki.ru>.
4. Дебда Д. Е., Пятибратов Г. Я. Анализ возможностей активных и комбинированных электромеханических систем компенсации силы тяжести обезвешиваемых объектов // Изв. вузов. Электромеханика. 2001. № 2. С. 33–37.

5. Ковалев И. В., Кикоть Ю. О. К вопросу повышения точности и надежности системы испытания и имитации невесомости для космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 2(54). С. 106–109.

6. Голдобин Н. Н., Шендалев Д. О. Математические методы, используемые для оценки точности положения и формы крупногабаритного рефлектора космического аппарата // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. (12–14 нояб. 2013, г. Красноярск). Красноярск, 2013. С. 65–66.

7. Tibert G. Deployable tensegrity structures for space applications. Doctoral thesis [Электронный ресурс]. Stockholm : Royal Institute of Technology, 2002. URL: [http://www.mech.kth.se/thesis/2002/phd/phd\\_2002\\_gunnar\\_tibert.pdf](http://www.mech.kth.se/thesis/2002/phd/phd_2002_gunnar_tibert.pdf).

8. Голдобин Н. Н. Методика оценки формы радиотражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 1(47). С. 106–111.

9. Разработка математической модели и численное моделирование напряженно-деформированного состояния крупногабаритного рефлектора / А. В. Бельков [и др.] // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. (12–14 нояб. 2013, г. Красноярск). Красноярск, 2013. С. 58–59.

10. Зимин В. Н., Крылов А. В., Чурилин С. А., Файзуллин Ф. Р. К расчету раскрытия крупногабаритных трансформируемых космических конструкций // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. (12–14 нояб. 2013, г. Красноярск). Красноярск, 2013. С. 68–69.

11. Михалкин В. М., Романенко И. В. Анализ применимости системы обезвешивания пассивного типа для крупногабаритного крыла батареи солнечной //

Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. (12–14 нояб. 2013, г. Красноярск). Красноярск, 2013. С. 88–89.

12. Михнев М. М., Землянский В. В., Житник М. В., Ермакова С. В. Решение проблемы сборки перспективных антенн // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. (12–14 нояб. 2013, г. Красноярск). Красноярск, 2013. С. 30–32.

13. Лавров В. И., Сомов В. Г., Сивирин П. Я. Измерение параметров крупногабаритных бортовых антенн спутниковых систем связи / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. 152 с.

14. Ерохин Г. А., Чернышев О. В., Козырев Н. Д., Кочержевский В. Г. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. Горячая линия–Телеком, 2004. 491 с.

15. Пат. 233970 RU C2 G61M19/00 B64П7/00. Устройство имитации невесомости механизмов с гибкой конструкцией элементов / Дроздов А. А., Агашкин С. В., Михнев М. М., Ушаков А. Р. 27.09.2008.

### References

1. Fateeva V. F. *Malye kosmicheskie apparaty informatsionnogo obespecheniya* [Small spacecraft information provision, Ed. V. F. Fateeva]. Moscow, Radiotekhnika publ., 2010, 320 p.

2. *Aviapanorama: Mezhdunarodnyy aviatsionno-kosmicheskij zhurnal*. [Aviapanorama: Intern Aerospace Journal], 2003–2004. Available at: <http://aviapanorama.su>.

3. *Novosti kosmonavtiki: naychno-populyarnyy zhurnal*. [Space News: Popular Science Journal], 2013–2014. Available at: <http://novosti-kosmonavtiki.ru>.

4. Debda D. E., Pijatibratov G. Ia. *Analiz vozmozhnostei aktivnykh i kombinirovannykh electromechanicheskikh sistem kompensatsii sily tijazhesti obezveshivaemykh objektov*. [Analysis of the possibilities of active and combined electromechanical systems compensate gravity obezveshivaemyh objects]. *Izv. vyzov: Electromechanika*, 2001, no. 2, p. 33–37 (In Russ.).

5. Kovalev I. V., Kikot U. O. [On the question of improving the accuracy and reliability of the test and simulate weightlessness for spacecraft]. *Vestnik SibGAU*, 2014, no. 2 (54), p. 106–109 (In Russ.).

6. Goldobin N. N., Shendalv D. O. [Mathematical methods used to assess the position and form accuracy of a large-sized spacecraft reflector]. *Materiali XVII Mezhdynarodnoy naychnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Proceedings of the XVII Intern. scientific. conf. "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2013, p. 65–66. (In Russ.).

7. Tibert G. Deployable tensegrity structures for space applications. Doctoral thesis. Stockholm: Royal

Institute of Technology, 2002. Available at: [http://www.mech.kth.se/thesis/2002/phd/phd\\_2002\\_gunnar\\_tibert.pdf](http://www.mech.kth.se/thesis/2002/phd/phd_2002_gunnar_tibert.pdf). (accessed 05.02.2014).

8. Goldobin N. N. [The estimation of the form of a large-sized transformed radar-reflection for a spacecraft]. *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 1(47), p. 106–111 (In Russ.).

9. Belkov A. V., Valishevskii O. K., Velichko A. I., Zhykov A. P., Pavlov M. S., Ponomarev V. S., Ponomarev S. V., Popov A. V., Halimanovich V. I., Shalkov V. V., Shendelev D. O. [Development of a mathematical model and numerical simulation of the stress-strain state of bulky reflector]. *Materiali XVII Mezhdynarodnoy naychnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"*. [Proceedings of the XVII Intern. scientific. conf. "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2013, p. 58–59 (In Russ.).

10. Zimin V. N., Kryilov A. V., Chyrlin S. A., Fajzyllin F. R. [On the calculation of the disclosure of large space structures transformed]. *Materiali XVII Mezhdynarodnoy naychnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"*. [Proceedings of the XVII Intern. scientific. conf. "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2013, p. 68–69. (In Russ.).

11. Mihalkin V. M., Romanenko I. V. [Analysis of the applicability of the system obezveshivaniya passive type for large-sized battery solar wing]. *Materiali XVII Mezhdynarodnoy naychnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"*. [Proceedings of the XVII Intern. scientific. conf. "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2013, p. 88–89 (In Russ.).

12. Mihnev M. M., Zemlyanskii V. V., Zhitnik M. V., Ermakov S. V. [Addressing the assembly looking antennas]. *Materiali XVII Mezhdynarodnoy naychnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"*. [Proceedings of the XVII Intern. scientific. conf. "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2013, p. 30–32 (In Russ.).

13. Lavrov V. I., Somov V. G., Sivirin P. Ya. *Izmerenie parametrov krupnogabaritnykh bortovykh antenn sputnikovyykh sistem svyazi*. [Parameter measurement of oversized satellite antennas]. 2010, 152 p.

14. Erokhin G. A., Chernyshev O. V., Kozыrev N. D., Kocherzhevskii V. G. *Antenno-fidernye ustroystva i rasprostraneniye radiovoln. Goryachaya liniya-Telekom* [Antenna-feeder gadgets and radio wave dissemination]. 2004, 491 p.

15. Dроздов А. А., Агашкин С. В., Михнев М. М., Ушаков А. Р. *Устройство имитации невесомости механизмов с гибкой конструкцией элементов*. [The apparatus of weightlessness simulation mechanisms with flexible design elements]. Patent RF, no. № 233970 C2 G61M19/00 B64П7/00, 2008.