

ТЕХНИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА ВИБРАЦИОННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. Хвалько✉, А. С. Орлов, С. Б. Сунцов,
И. С. Васильев, А. А. Горайнова

АО «Информационные спутниковые системы»
имени академика М. Ф. Решетнёва»

г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

В статье приведено описание разработанного метода, который обеспечивает корректное проведение механических испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов на вибрационные воздействия в процессе наземной экспериментальной отработки. Так как в процессе вибрационных воздействий возникают резонансные явления, которые могут вызывать воздействия на элементы бортовой аппаратуры, в сотни раз превышающие нормированные уровни воздействий, возникающие при штатных режимах в момент выведения космического аппарата на целевую орбиту. В связи с этим в процессе испытаний систематически происходил выход из строя объектов испытаний, вызванный необоснованными уровнями воздействий по причине возникающих резонансных явлений. С целью решения возникшей проблемы проведения механических испытаний на вибрационные воздействия был разработан метод «вырезания частот» в области резонанса. Разработанный метод в общем виде представляет собой процесс определения добротности объекта испытаний в момент определения его собственной частоты. В случае обнаружения резонансных явлений происходит автоматизированное снижение задающих ускорений до величины, соответствующей нормированным уровням воздействий. В результате технической апробации разработанного метода проведения испытаний на вибрационные воздействия бортовой радиоэлектронной аппаратуры была подтверждена его работоспособность. Внедрение разработанного метода позволило обеспечить нормированные режимы испытаний, которые полностью соответствовали заданным требованиям, и подтвердить квалификационный запас прочности изготовленной бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов.

Ключевые слова: испытания, вибрационные воздействия, резонанс, бортовая радиоэлектронная аппаратура, космический аппарат.

Введение

Современные космические аппараты (КА) представляют собой сложные технические устройства, которые состоят из большого числа бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), которая объединена в единую конструкцию посредством несущих элементов каркаса и бортовой кабельной сети. Данная бортовая РЭА выполняет целевые задачи КА в течение всего

срока активного существования (САС) [1]. С целью обеспечения бесперебойного выполнения целевых задач перед началом штатной эксплуатации КА на целевой орбите в обязательном порядке проводится целый комплекс мер по наземной экспериментальной отработке (НЭО) всех составных частей КА, которые имитируют этап хранения, выведения и штатной эксплуатации изделия на целевой орбите. Одной из составных частей НЭО является проведение механических испытаний бортовой РЭА, имитирующих этап транспортирования и этап выведения на целевую орбиту.

✉ Hvalko@iss-reshetnev.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2024

1. Виды механических воздействий и их влияние при испытаниях

Испытания на механические нагрузки при транспортировании представляют собой воздействия на множественные ударные воздействия с малым ускорением, имитирующие механические воздействия, возникающие при транспортировке изделия различными видами наземного и воздушного транспорта. В свою очередь, испытания на механические воздействия, имитирующие этап выведения, представляют собой два основных вида механических воздействий [2]. Первый вид механических воздействий при испытаниях – это одиночные механические удары, имеющие большую величину ускорения и имитирующие процессы отстыковки при выведении КА на целевую орбиту. Вторым видом механических воздействий являются вибрационные нагрузки, которые включают в себя две основные составляющие, а именно гармоническую синусоидальную вибрацию путём плавного изменения частоты и широкополосную случайную вибрацию (ШСВ) на заранее заданных (нормированных) режимах. При этом известно, что в ходе НЭО наиболее критичным видом воздействий для бортовой РЭА, особенно для хрупких материалов и элементов в ее составе, является воздействие ШСВ [3]. Это связано с тем, что при ШСВ происходит воздействие вибрации, имеющей наибольшую величину энергии колебаний в сравнении с другими видами механических воздействий. Однако при проведении испытаний на воздействие ШСВ при определенных условиях возникали явления, приводящие к разрушению составных частей объекта испытаний в процессе его НЭО, как показано на рисунке 1.

В результате анализа было определено, что причиной возникновения разрушений были резонансные явления, возникающие в процессе воздействия ШСВ на составные элементы бортовой РЭА, в том числе электрорадиоизделия (ЭРИ), в результате которых они испытывали перегрузки, которые в сотни раз превышали те перегрузки, которые могут быть при их штатном выведении на целевую орбиту в составе КА. Для решения данной проблемы был разработан метод проведения испытаний на вибрационные воздействия бортовой РЭА, заключающийся в так называемой процедуре «вырезания частот» [4]. Далее будет описана основная техническая суть разработанного метода и результаты применения данного метода на практике натурных испытаний бортовой РЭА.

Основной разработанный метод являются операции, которые в комплексе позволяют исключить из воздействия уровни механических нагрузок, не соответствующие заданным нормированным режимам испытаний. При этом базисом для нормированных режимов испытаний являются режимы, соответствующие эксплуатационным уровням механических воздействий в процессе штатного выведения на целевую орбиту [5]. Для подтверждения квалификационного запаса прочности объекта испытаний к данному базису применяется соответствующий повышающий коэффициент квалификации (безопасности). Используемые повышающие коэффициенты квалификации подтверждают наличие необходимого запаса прочности по отношению к уровням воздействующих нагрузок при штатном выведении КА на целевую орбиту [6]. Также данные коэффициенты учитывают в себе исчерпывающую степень возможных факторов неопределенности, которые могут проявиться в бортовой аппаратуре в виде резонансных явлений. Так, например, данными факторами неопределенности могут быть разброс нагрузок со стороны КА и явления демпфирования в области резонансных частот, которые невозможно вывить расчетным методом [7].

2. Метод проведения механических испытаний

Известно, что при проведении вибрационных испытаний, как на гармоническую синусоидальную вибрацию, так и на ШСВ, бортовая РЭА испытывает наибольшие перегрузки в зоне резонансных частот. Для обеспечения адекватных уровней воздействий в момент резонансных частот в процессе испытаний было предложено проведение следующих процедур, описанных ниже [8].

Так, при формировании режимов нагружения/испытаний обычно коэффициент добротности бортовой РЭА принимается в $Q = 10$, но действительная ее величина на практике может быть отличной от данного значения на разной частоте вибрационных воздействий. Практика показывает, что для

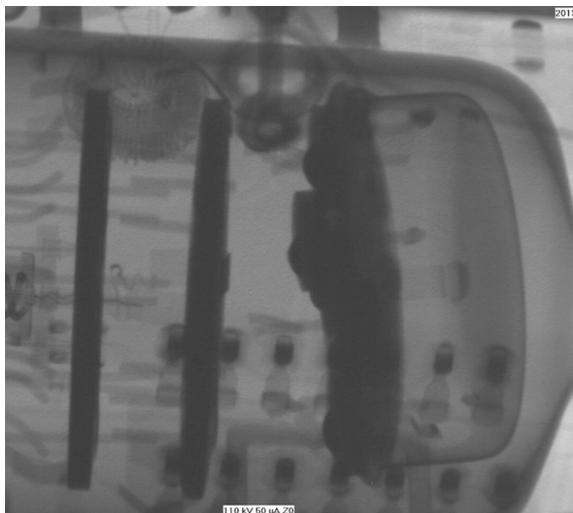


Рисунок 1. Результат разрушения элемента кварцевого генератора

бортовой РЭА КА коэффициент добротности находится в диапазоне от 10 до 30. При этом обычно при частоте до 150–200 Гц явления резонансов в бортовой РЭА отсутствуют [9]. Поэтому первым этапом испытаний является определение собственных частот испытываемой аппаратуры [10]. В связи с этим на первоначальном этапе при проведении испытаний в соответствии с нормативной документацией на механические воздействия выполняется определение собственных частот бортовой РЭА на малых уровнях вибрационных воздействий (0,2–0,5 g на гармонических синусоидальных нагрузках или 0,005 g²/Гц для ШСВ) в заданном диапазоне частот. Обязательным условием для проведения механических испытаний бортовой РЭА является установка на нее акселерометра. В процессе определения собственных частот бортовой аппаратуры необходимо определять добротность Q элементов бортовой РЭА при каждой резонансной частоте. При этом отношение виброускорения, регистрируемое акселерометром, к задаваемому ускорению не должно превышать Q = 6. В случае превышения этого значения с большой вероятностью можно ожидать выхода из строя некоторых ЭРИ.

В результате мы получаем график резонансных частот объекта испытаний, который приведен на рисунке 2.

После определения резонансных частот выполняется расчет отклика объекта испытаний с последующим сравнением рассчитанного отклика с допустимыми значениями воздействий на бортовую РЭА.

Так, для ШСВ величина отклика определяется по формуле (1):

$$S(f_i) = S_0(f_i) \cdot Q_i^2, \quad (1)$$

где

$S_0(f_i)$ – входное воздействие спектральной плотности мощности (СПМ) на резонансной частоте f_i ;

$S(f_i)$ – отклик СПМ на резонансной частоте f_i .

Отклик для синусоидальной гармонической вибрации определяется по формуле (2):

$$A(f_i) = A_0(f_i) \cdot Q_i \quad (2)$$

где:

$A_0(f_i)$ – входное воздействие синусоидальной вибрации на резонансной частоте f_i ;

$A(f_i)$ – отклик синусоидальной вибрации на резонансной частоте f_i .

При этом ширину амплитудно-частотного диапазона, подлежащего корректировке, определяют по формуле (3):

$$\Delta\Omega = 2\Delta f_i + \delta_i = (f_{pi} / Q_i) + \delta_i \quad (3)$$

где

$\Delta\Omega_i$ – ширина частотного диапазона, Гц;

$2\Delta f_i$ – эффективная ширина пропускания колебательного звена на i -резонансной частоте;

Q_i – добротность на i -резонансной частоте;

f_{pi} – i -резонансная частота, Гц;

δ_i – погрешность задания диапазона частот на i -резонансной частоте.

Общий вид результата определения ширины амплитудно-частотного диапазона, подлежащего корректировке, приведен на рисунке 3.

В случае если были обнаружены области резонансных частот на составные части бортовой РЭА, то необходимо производить корректировку заданного нормированного воздействия в области резонансных частот на соответствующий коэффициент, который обеспечивает нормализацию режимов испытаний. При этом амплитуду нагружения корректируют по формуле (4)

$$\Psi_{i1} \geq \Psi_{i0} / \eta_i, \quad (4)$$

где

Ψ_{i1} – амплитуда откорректированного нормированного воздействия на i -резонансной частоте (размерность в «g» используется для гармониче-

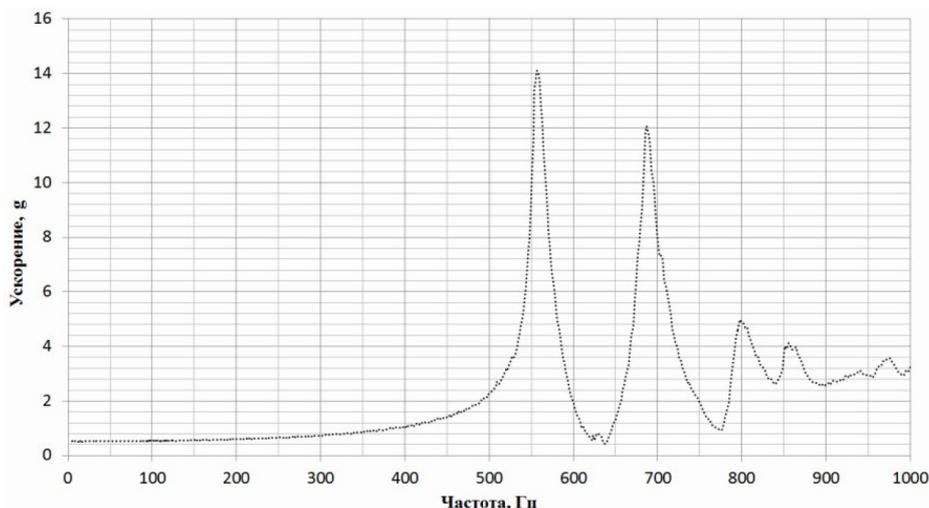


Рисунок 2. Резонансные частоты объекта испытаний

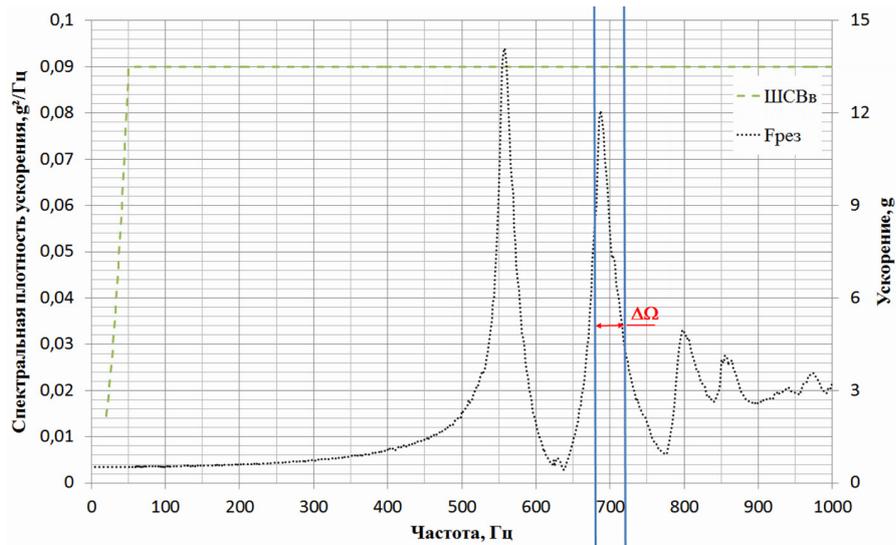


Рисунок 3. Ширина участка амплитудно-частотного диапазона, подлежащего корректировке

ской синусоидальной вибрации и « $g^2/Гц$ » используется для ШСВ);

Ψ_{i0} – амплитуда заданного нормированного воздействия на i -резонансной частоте;

ξ_i – квалификационный коэффициент на i -резонансной частоте;

η_i – коэффициент изменения амплитуды заданного нормированного воздействия на i -резонансной частоте, причем $\xi_i \geq \eta_i \geq 1$.

В результате определения получаем коэффициенты, необходимые для проведения корректировки амплитуды нагружения, которые графически отражены на рисунке 4.

В результате применения коэффициентов корректировки области нагружения получаем измененный профиль задающего воздействия испытательной системы, который показан на рисунке 5.

В результате одной из характеристик откорректированного профиля нормированного воздействия является наклон данного профиля

в зоне резонансных частот. При этом коэффициент наклона корректируемого нормированного воздействия принимают максимальной величины для применяемого испытательного оборудования. Это позволяет обеспечить корректное «вырезание» даже области с достаточно сильным резонансом. Однако итоговый профиль нагружения после корректировки должен исключать возможность возникновения переходных процессов в системе управления стендом при испытаниях на границах диапазонов. В противном случае возникающие в системе управления эффекты при переходных процессах могут увеличить задаваемый сигнал больше, чем корректирующий коэффициент «вырезания». Но данные параметры для каждой испытательной системы известны и должны быть учтены при проведении испытаний бортовой РЭА. Так, для большинства систем управления этот наклон находится в диапазоне 20–30 дБ/октаву.

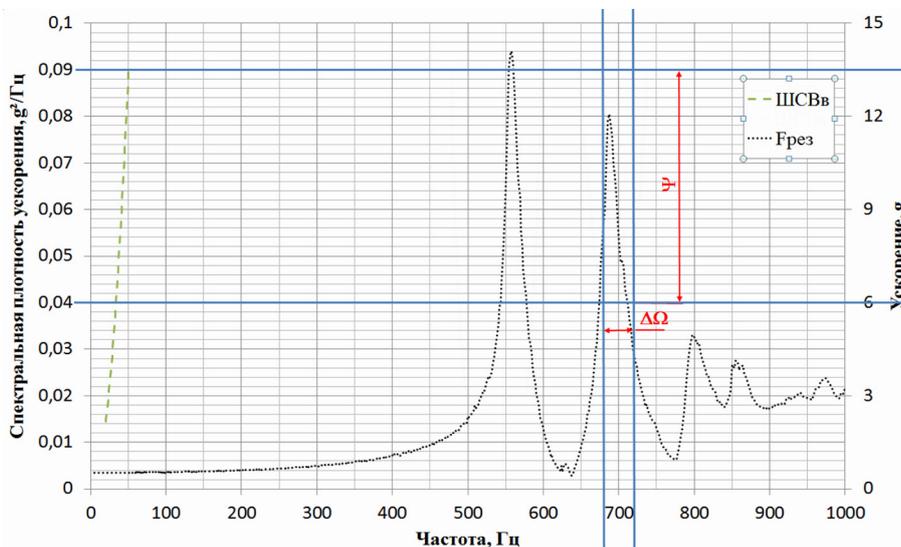


Рисунок 4. Коэффициенты корректировки области нагружения объекта испытаний

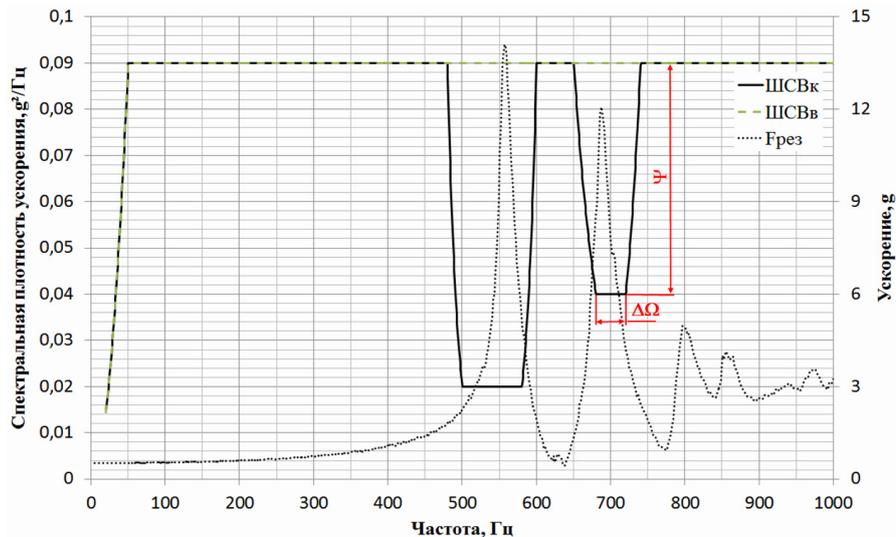


Рисунок 5. Откорректированный задающий профиль режима ШСВ

Заключение

В итоге разработанный метод позволил повысить качество проведения механических испытаний и снизить издержки за счет предотвращения механического разрушения элементов бортовой РЭА, а также более обоснованно использовать

коэффициенты безопасности при механических испытаниях бортовой РЭА КА, не противореча основополагающим стандартам на испытания. Применение метода на практике подтвердило его эффективность на этапе НЭО бортовой аппаратуры перспективных спутников среднего и тяжелого классов, таких как «Глонасс», «Экспресс» и других.

Список литературы

- [1] Павлов А. Н., Соколов Б. В. Методы обработки экспертной информации: учеб.-метод. пособие. СПб: ГУАП, 2005. 42 с.
- [2] Разработка технологического процесса сборки изделия в машиностроении. Сост. Е. П. Михаевич. Томск: Изд. ТПУ, 2009. 20 с.
- [3] Экспериментальная отработка космических аппаратов на механические воздействия: учеб. пособие / Н. А. Тестоедов; Е. А. Лысенко. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2007.
- [4] Орлов А. С. Орлов С. А. Способ испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата на вибрационные воздействия // Патент России № 2476845. 2013. Бюл. № 6.
- [5] Орлов С. А., Копытов В. И., Матвеев К. А. Формирование ударных воздействий высокой интенсивности для пространственных конструкций // Изв. Высш. учебных заведений. Физика. Т. 56, № 7/3 ТГУ, 2013. С. 197–200.
- [6] Дояр О. П. Алгоритм расчета ударного спектра // Динамика систем. Численные методы исследования динамических систем. Нистру, Кишнев, 1982. С. 126–128.
- [7] Харрис С., Криди Ч. Справочник по ударным нагрузкам. Л.: Судостроение, 1973. 360 с.
- [8] Орлов С. А. Разработка методик нормирования и испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов на механические нагрузки участка выведения // Научный вестник НГТУ. Вып. № 3(44). Новосибирск: Издательство НГТУ, 2011. С. 137–148.
- [9] Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на удар. ГОСТ Р 51371–99. М: ИПК. Издательство стандартов, 2000. 24 с.
- [10] Гореликов Е. Ю., Орлов С. А., Брагин О. А. и др. Оборудование и методика ударного нагружения бортовой аппаратуры космических аппаратов. Инженерия для освоения космоса: сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного форума с международным участием / Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. С. 124–129.

TECHNICAL APPROBATION OF THE METHOD FOR TESTING ON VIBRATION EFFECTS OF ON-BOARD RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT OF SPACECRAFTS

**A. A. Khvalko, A. S. Orlov, S. B. Suntsov,
I. S. Vasiliev, A. A. Goryainova**

*JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite System»
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, The Russian Federation*

110

The article provides a description of the developed method, which ensures the correct realization of mechanical tests of on-board radio-electronic equipment of spacecrafts for vibration effects in the process of ground experimental testing. Since in the process of vibration effects, resonance phenomena arise, which can cause effects on the elements of on-board equipment hundreds of times higher than the normalized levels of effects, which occur under normal conditions at the time of launching the spacecraft into the target orbit. In this regard, during the testing process, the failure of test objects systematically occurred, caused by unreasonable levels of impacts due to emerging resonance phenomena. In order to solve the problem of realization mechanical tests for vibration effects, a method of “cutting frequencies” in the resonance region was developed. The developed method in general is a process of determining the quality factor of the test object at the time of determining its natural frequency. If resonance phenomena are detected, the driving accelerations are automatically reduced to a value corresponding to the normalized levels of impacts. As a result of technical approbation of the developed method of testing for vibration effects of on-board radio-electronic equipment, its operability was confirmed. The implementation of the developed method made it possible to provide standardized test modes that fully met the specified requirements and confirm the qualifying margin of safety of the manufactured on-board radio-electronic equipment of spacecraft.

Keywords: tests, vibration effects, resonance, on-board radio-electronic equipment, spacecraft.

References

- [1] Pavlov A. N., Sokolov B. V. Methods of processing expert information. SPb. GUAP, 2005, 42 p.
- [2] Mikhayevich E. P. Development of a technological process for assembling a product in mechanical engineering. Tomsk. TPU, 2009, 20 p.
- [3] Testoyedov N. A., Lysenko E. A. Experimental testing of spacecraft for mechanical effects. Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University, 2007.
- [4] Orlov A. S., Orlov S. A. RF Patent no. 2476 845. Byull. Izobret., 2013, no. 6.
- [5] Orlov S. A., Kopyitov V. I., Matveev K. A. Formation of high-intensity shock effects for spatial structures // Izv. Higher. educational institutions. Physics. Volume 56, no. 7/3 TSU, 2013. C. 197–200.
- [6] Doyar O. P. Algorithm for calculating the shock spectrum // sb. Dynamics of systems. Numerical methods for the study of dynamical systems. – Nistru, Kishenev, 1982, pp. 126–128.
- [7] Harris S., Creedy C. Handbook of shock loads. L.: Shipbuilding, 1973, 360 p.
- [8] Orlov S. A. Development of methods for rationing and testing on-board spacecraft equipment for mechanical loads of the launch site. // Scientific Bulletin of NSTU. Issue no. 3(44): NSTU Publishing House, Novosibirsk, 2011, pp. 137–148.
- [9] Test methods for resistance to mechanical external influences of machines, devices and other technical products. Impact tests. ГОСТ P51371–99.-M: IPK. Publishing House of Standards, 2000, 24 p.
- [10] Gorelikov E. Y., Orlov S. A., Bragin O. A. and etc. Equipment and methods of shock loading of on-board equipment of spacecraft. Engineering for space exploration: collection of scientific works of the IV All-Russian Youth Forum with international participation. Tomsk Polytechnic University. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2016, pp. 124–129.

Сведения об авторах

Хвалько Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, начальник сектора отдела конструирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры АО «РЕШЕТНЁВ». Окончил Сибирский федеральный университет в 2007 году. Область научных интересов: космическая техника, космические технологии, приборостроение, механический анализ, методы испытаний.

Орлов Александр Сергеевич – кандидат технических наук, ведущий инженер отдела конструирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры АО «РЕШЕТНЁВ». Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет в 2003 году. Область научных интересов: космическая техника, механический анализ, методы испытаний.

Сунцов Сергей Борисович – кандидат технических наук, начальник отдела конструирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры АО «РЕШЕТНЁВ». Окончил Томский институт АСУР (ТУСУР) в 1981 году. Область научных интересов: космическая техника, космические технологии, приборостроение, методы испытаний.

Васильев Илья Сергеевич – инженер-конструктор первой категории отдела конструирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры АО «РЕШЕТНЁВ». Окончил НИ ТПУ в 2011 году. Область научных интересов: космическая техника, космические технологии, приборостроение, методы испытаний.

Горяйнова Анастасия Александровна – техник отдела конструирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры АО «РЕШЕТНЁВ». Окончила Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева в 2022 году. Студентка СФУ (магистратура). Область научных интересов: космическая техника, приборостроение, методы испытаний.