

туры космических аппаратов длительного функционирования // Решетневские чтения : материалы XV Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2011. Ч. 1.

2. Патраев В. Е., Трифанов И. В. Анализ показателей качества и надежности при эксплуатации современных космических аппаратов // Вестник СибГАУ. Красноярск, 2010. Вып. 2(28). С. 110–113.

3. Патраев, В. Е. Методы обеспечения и оценка надежности космических аппаратов с длительным сроком активного существования : монография ; СибГАУ. Красноярск, 2010.

4. Матюшев Р. А., Патраев В. Е. Вопросы сертификационных испытаний электрорадиоизделий иностранного производства, применяемых в отечественных космических аппаратах длительного функционирования // Авиакосмическое приборостроение. Москва, 2012. Вып. 9.

5. MIL-PRF-38535. Performance specification. Integration circuits (microcircuits) manufacturing, general specification for.

6. ОСТ В 11 0398-2000. Микросхемы интегральные. Общие технические условия.

© Матюшев Р. А., Патраев В. Е., 2013

УДК 629.78.015

НОРМИРОВАНИЕ И ОТРАБОТКА БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

С. А. Орлов, В. И. Копытов

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: srgorlov@iss-reshetnev.ru

Рассматриваются проблемы, возникающие при нормировании и отработке бортовой аппаратуры КА негерметичного исполнения на механические воздействия. Предлагаются подходы, позволяющие сформировать режимы испытаний бортовой аппаратуры на основе результатов измерений нагрузок на различных этапах испытаний КА, и реализовать их на этапе автономной отработки бортовой аппаратуры.

Ключевые слова: аппаратура, спектральная плотность, ударный спектр ускорений.

RATE MAKING AND DEVELOPMENT OF SPACECRAFT ONBOARD EQUIPMENT TO MECHANICAL ENVIRONMENT

S. A. Orlov, V. I. Kopytov

JSC “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”
52 Lenin street, Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: srgorlov@iss-reshetnev.ru

The article considers the problems appearing at rate making and development of spacecrafts onboard equipment of unpressurized type of enclosure on mechanical excitation. Proposed approaches are able to generate test environment of onboard equipment, on the basis of results of measurements at different stages of spacecraft testing, and implement them at the stage of autonomous development of on-board equipment.

Keywords: equipment, spectral density, shock spectrum of accelerations.

В настоящее время отечественные, как и зарубежные космические аппараты (КА), стали выполняться по негерметичной схеме. Силовой основой таких КА являются сотовые панели и конструкции из композиционных материалов. В результате чего меняются жесткостные и демпфирующие свойства КА, способы крепления бортовой аппаратуры (БА), и как следствие, нагрузки на сами КА и входящую в их состав аппаратуру. В тоже время существующая нормативная документация, регламентирующая нагрузки на БА, и методики отработки, остаются неизменными уже более 30 лет и значительно отличаются от действующих зарубежных стандартов [1; 2]. Выходом из сложившейся ситуации является разработка методик нормирования и испытаний БА по результатам изме-

рений нагрузок на различных этапах испытаний КА с последующей автоматизированной обработкой экспериментальных данных, так как результаты измерений даже одного КА требуют обработки и анализа сотен, а то и тысяч виброграмм.

При разработке и испытаниях бортовой аппаратуры космических аппаратов необходимо учитывать все внешние воздействующие факторы. Информацию о механических нагрузках на КА и аппаратуру несет в себе нормативная функция внешнего нагружения (воздействия), являющаяся непрерывно изменяющимся пространственным векторным полем системы функций времени и нагрузки [3]. Ошибка в задании величины нагрузок на бортовую аппаратуру или неправильная оценка их влияния может привести либо

к отказу аппаратуры при эксплуатации, либо к необоснованному увеличению массы приборов и агрегатов и расходов на дополнительную обработку.

Нагрузки, действующие на космический аппарат на участке выведения. Нагрузки, действующие на КА, включают в себя квазистатические, вибрационные, ударные и акустические воздействия [1–3]. Квазистатические нагрузки действуют в частотном диапазоне до 10 Гц. Источником воздействий служат низкочастотные колебания ракеты-носителя (РН). Гармоническая вибрация действует в диапазоне частот 5–100 Гц. Источником гармонической вибрации служат колебания различных агрегатов и подсистем РН, а также вибрационные нагрузки на этапе приемных испытаний. Широкополосная случайная вибрация (диапазон 20–2000 Гц) – это отклик конструкции КА на акустическое воздействие (диапазон 20–8000 Гц). Источником ударных воздействий являются различные пиротехнические устройства РН (разделение ступеней ракеты, сброс обтекателя, дополнительных топливных баков и т. д.) и КА (отделение КА от РН, раскрытие солнечных батарей, различных антенн и других подсистем). В общем случае на КА может быть не один десяток различных пироустройств. Требования по ударным воздействиям на КА и бортовую аппаратуру задают в форме ударных спектров ускорений в диапазоне частот до 10 кГц (как правило, при добротности равной 10).

Зонное нормирование и необходимый объем испытаний. Для формирования требований к аппаратуре применяется «зонное нормирование». Под «зоной механических нагрузок понимается некоторая область КА, в которой приборы и оборудование подвергаются близкими по величине воздействиям» [3]. Необходимое количество зон устанавливается разработчиком КА и определяется количеством и типом (массой) применяемого на КА оборудования (для вибрационных воздействий). Некоторые рекомендации по разработке зон содержится в [4; 5]. Полностью формализовать определение «зона механических нагрузок» не представляется возможным, хотя некоторые общие критерии можно выделить: вид и направление воздействия, требования по амплитудному и частотному диапазонам, тип и масса оборудования. При вибрационных воздействиях сформированные зоны отличаются в первую очередь амплитудными значениями спектральной плотности мощности и среднеквадратическими значениями виброускорений (частотный диапазон остается неизменным). Разработка оптимального количества зон для оборудования представляет собой определенную методологическую проблему. Большое количество зон приводит к сужению границ их диапазонов и может вызывать трудности при заимствовании оборудования в другие проекты без проведения дополнительных испытаний. Малое количество зон влечет за собой необоснованное завышение режимов испытаний для оборудования. Очевидным является разделение оборудования, находящегося на модуле полезной нагрузки и модуле служебных систем, а также оборудование, устанавливаемое на консольных элементах, на рефлекторах антенн

в разные зоны. Значения спектральной плотности мощности виброускорений для различных зон могут отличаться в десятки и сотни раз. Типовые спецификации на бортовую аппаратуру, основанные на зонном нормировании как для отечественных, так и для зарубежных КА, представлены в [4; 5]. Следует отметить, что испытания на низкочастотную гармоническую вибрацию (диапазон 5–100 Гц) при выполнении общепринятых требований по отсутствию резонансов конструкции аппаратуры до 150 Гц не проводятся. Стойкость к вибрационным воздействиям может быть подтверждена даже анализом на квазистатические нагрузки. Исключение составляет аппаратура системы ориентации, лазерно-оптические средства приема и передачи информации, включающие в себя различные электромеханические приводы. Предъявление требований по отсутствию резонансных частот к механизмам (даже в диапазоне частот до 40 Гц) некорректно, если этот механизм не фиксируется на участке выведения. Испытания на акустические воздействия аппаратуры также не проводятся (в силу небольшой площади поверхности большинства аппаратуры), а защищается аппаратура на данный вид механических (акустических) нагрузок подбором комплектующих и положительными результатами испытаний на случайную вибрацию. Таким образом, к обязательным видам воздействий, на которые должны обрабатываться приборы и аппаратура, относятся широкополосная случайная вибрация и ударные воздействия.

Нагрузки, действующие на бортовую аппаратуру и комплектующие. Нормируемые величины спектральной плотности мощности виброускорений (СПУ) могут достигать величин в десятки единиц $g^2/Гц$ (например, на аппаратуре рефлекторов антенн). Следует отметить, что требования на аппаратуру в отечественных стандартах по случайной вибрации (стандарты группы «Мороз») не превышают $0,05g^2/Гц$, а на комплектующие (стандарты группы «Климат») не предполагают уровни вибрационных воздействий выше $0,5g^2/Гц$. При этом максимальная величина среднего квадратического значения виброускорения (СКЗ) на комплектующие составляет 50g. Спецификация по СПУ для широкополосной случайной вибрации на консольно установленный двигатель коррекции, сформированная по результатам испытаний КА показана на рисунке.

Максимальные уровни СПУ составляют величину $1g^2/Гц$, при этом СКЗ составляет величину $\sim 15g$, т. е. нормируемая величина СПУ для прибора уже превышает максимально допустимые значения на комплектующие. Для оценки нагружения комплектующих аппаратуры необходимо учесть добротность конструкции, которая, как правило, находится в диапазоне $Q = 10 - 30$, при этом аппаратура сохраняет работоспособность. Таким образом, не величина СПУ в первую очередь влияет на работоспособность прибора, а определяющей характеристикой является величина СКЗ виброускорения. Следует отметить, что не для всех комплектующих имеются спецификации по случайной вибрации. Для некоторых электрорадиоизделий (ЭРИ) требования задают в виде гармонической

вибрации в диапазоне частот до 2кГц. Наиболее часто для пересчета одного вида вибрационного воздействия в другой используется формула Майлса (формула построена на основе гипотезы суммирования линейных повреждений) [7; 8]:

$$A(f_p) = 3\sigma = 3\sqrt{\frac{\pi}{2} f_p Q S_{\text{вх}}(f_p)},$$

где $A(f_p)$ – значение амплитудного спектра на частоте f_p ; $S_{\text{вх}}(f_p)$ – значение спектральной плотности широкополосной случайной вибрации на основной частоте собственных колебаний элемента конструкции (задается нормативной функцией); Q – добротность; f_p – значение собственной частоты колебаний элемента конструкции в рассматриваемом диапазоне частот (принимается по результатам модального анализа); σ – среднеквадратическое значение ускорения.

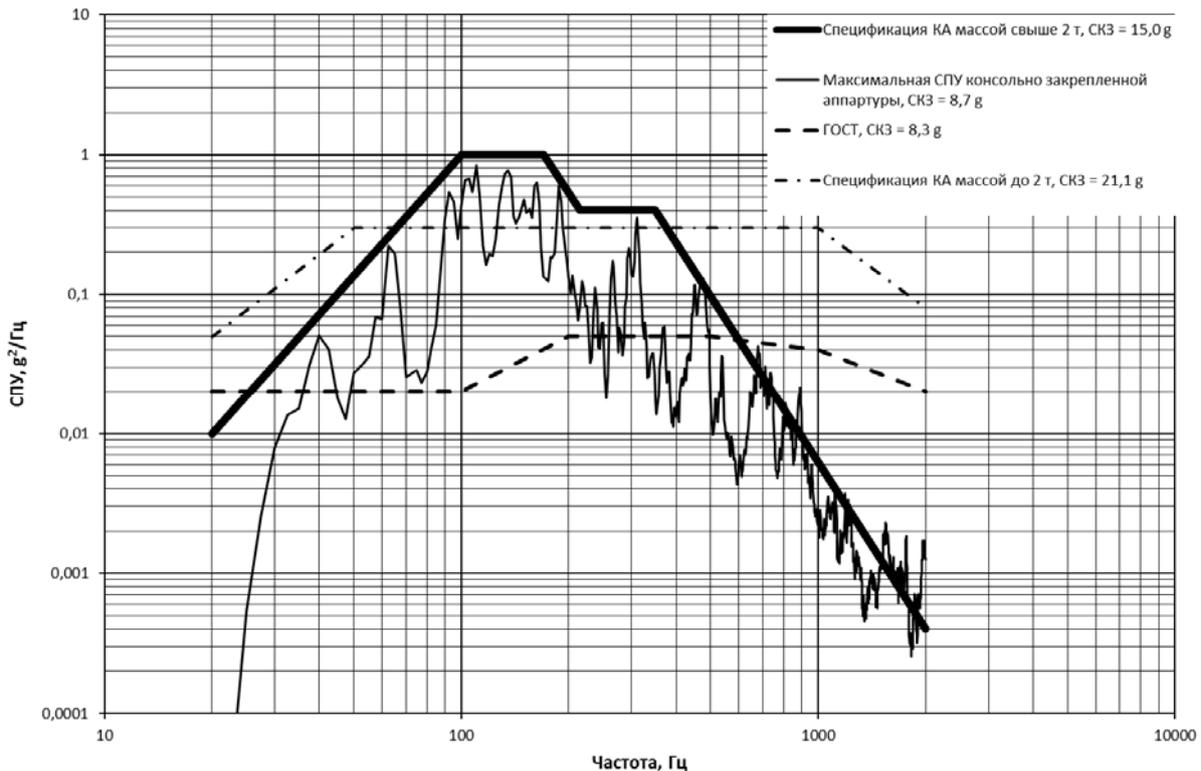
Данная формула позволяет получить отклик на ЭРИ в виде гармонической вибрации на воздействие, заданное в виде широкополосной случайной вибрации. Следует отметить, что рассмотренная формула показывает максимально возможный отклик на резонансной частоте (на уровне 3σ), т. е. амплитудные значения не превышают данный уровень с вероятностью 0,997, и, согласно определению ударного спектра ускорений как максимально возможной реакции осциллятора на данной частоте [6], такое представление скорее можно использовать для формирования эквивалентного ударного спектра ускорений (УСУ). Оценку амплитудного спектра гармонической вибрации более корректно проводить по формуле [8]

$$A(f) = \sqrt{2}\sigma,$$

где $A(f)$ – значение амплитудного спектра на частоте f , σ – среднеквадратическое значение ускорения.

По ударным воздействиям нормирование проводится в форме ударных спектров ускорений, величина которых устанавливается, как правило, в зависимости от расстояния от источника ударных воздействий. Значения УСУ могут достигать величин в тысячи g [5]. При этом в отечественных стандартах на ЭРИ (и в некоторых зарубежных) требования по ударным спектрам отсутствуют. Спецификации по ударным воздействиям на ЭРИ чаще всего задают в виде одиночных импульсов полуволны синусоиды (указывается амплитуда и длительность удара, а также допустимое количество ударов).

Анализ бортовой аппаратуры на механические воздействия. До начала испытаний (как на этапе проектных работ, так и по завершении рабочего проектирования) в обязательном порядке должен проводиться механический анализ аппаратуры (анализ аппаратуры на механические воздействия), который позволяет выявить возможные недостатки разрабатываемой аппаратуры. Однако для этого нужны специализированные пакеты прикладных программ типа NASTRAN, ANSYS, DYTRAN и т. д. [9–11]. Кроме того, требуются мощные рабочие станции и квалифицированный персонал, имеющий опыт работы в этих вычислительных средах. Одной из основных проблем на этом этапе работ является принятие модели демпфирования. Для бортовой аппаратуры, имеющей прототипы, данная проблема несколько сглаживается, так как позволяет принять модель демпфирования по результатам испытаний прототипов.



СПУ на консольно установленный двигатель коррекции

Для аппаратуры, не имеющей прототипов, принимается чаще всего модель с постоянным демпфированием (добротность Q выбирается из диапазона 20–30 для анализа вибрационных воздействий и 10 для анализа ударных нагрузок при использовании универсальных пакетов типа *NASTRAN*, *ANSYS*). В специализированных пакетах типа *DYTRAN* предназначенных для анализа высокоинтенсивных ударных воздействий применяются иные модели демпфирования. Коэффициент демпфирования принимается в виде комбинированной псевдовязкости, представляющей из себя сумму квадратичной (псевдовязкость Неймана-Рихтмайера) и линейной демпфирования [10]. Другая серьезная проблема заключается в обосновании полученных результатов. Развитие компьютерного моделирования привело в последние годы к возникновению технологии «Верификации и валидации (*Verification and Validation*) или *V&V*» как технологической и интеллектуальной дисциплины, которая исследует проблему подтверждения полученных результатов и предсказания новых. Верификация является процессом, исследующим качество численного приближения математической модели, используемой как основу для предсказания, а валидация является процессом, изучающим надежность математической модели как точного обобщения реальности. В процедуре «валидация» подразумевается решение множества задач верификации. Эти задачи являются специфическими математическими задачами, для которых некоторые входные данные такие же, как и для задачи верификации, но часть задач может и отличаться. Например, в задаче упругости область определения и граничные условия различны для задач верификации и валидации, но материальное уравнение одно и то же. При этом задачи верификации и валидации всегда отличаются, а задача верификации часто не доступна экспериментальной проверке [12; 13]. По результатам механического анализа устанавливается необходимый объем испытаний бортовой аппаратуры. Вместе с тем серьезной проблемой является и доверие заказчика к качеству выполненных работ. При отсутствии доверия к результатам механического анализа объем испытаний может быть не обосновано велик.

Испытания на широкополосную случайную вибрацию. Для проведения вибрационных испытаний требуются достаточно мощные стенды с современной системой управления и многоканальной системой регистрации. Испытания стандартной БА на вибрационные нагрузки при наличии стендов, средств управления и регистрирующей аппаратуры каких – либо затруднений не вызывают. Но особенностью вибрационных испытаний является то, что это вид кинематического возбуждения оборудования. В результате таких воздействий в аппаратуре могут возбуждаться резонансы с большими амплитудами, которые на КА не реализуются. Для корректировки входного воздействия была предложена следующая процедура «вырезания» (*notching*). Сначала определяются резонансные частоты аппаратуры и добротность на каждой резонансной частоте. Затем выполняется прогноз отклика

на элементах конструкции в зоне резонансов, причем при превышении допустимых значений амплитуды ускорений на бортовую аппаратуру проводят корректировку заданного воздействия в области резонансных частот по приведенной ниже формуле

$$\Delta\Omega_i = 2\Delta f_i + \delta_i = \frac{f_{pi}}{Q_i} + \delta_i$$

где $\Delta\Omega_i$ – ширина частотного диапазона; $2\Delta f_i$ – эффективная ширина пропускания колебательного звена на i резонансной частоте; Q_i – добротность на i резонансной частоте; f_{pi} – i резонансная частота; δ_i – погрешность задания диапазона частот на i резонансной частоте, при этом амплитуду нагружения корректируют по формуле

$$\Psi_{i1} \geq \frac{\Psi_{i0}}{\eta_i},$$

где Ψ_{i1} – амплитуда откорректированного нормированного воздействия на i резонансной частоте; 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, здесь

$$\xi_i \geq \eta_i \geq 1,$$

при этом наклон уменьшения/возрастания в области резонансов корректируемого воздействия принимают из диапазона 20–30 дБ/окт, исключающего возникновения при испытаниях переходных процессов, а глубина вырезания не превышает коэффициента квалификации для резонансов оборудования. Когда источником резонансов является испытательная оснастка, то вырезание может быть более глубоким, но не должно превышать уровень устойчивого управления вибрационным воздействием. Профиль вырезаний формируется, как правило, по результатам механического анализа оборудования и наиболее часто применяется при корректировке режимов испытаний для антенн в низкочастотной области, и в высокочастотной области для стандартной аппаратуры. В тоже время, на сегодняшний день нет корректного обоснования этой процедуры. Большинство авторов признают только допустимость вырезаний на резонансных частотах в пределах коэффициента квалификации, да и то при одобрении этой процедуры заказчиком аппаратуры [8; 14; 15].

Испытания на ударные воздействия. На сегодняшний день существуют различные методы испытаний на ударные воздействия с помощью вибрационных электродинамических стендов, стендов с падающими столами, маятниковых и т. д. Методы испытаний могут использовать задание ударного воздействия в форме полусинусоидального импульса или по ударному спектру ускорений, когда не важен вид ударного воздействия, а важна реакция, которую это воздействие вызывает в конструкции [6; 16; 17]. Если источником ударных воздействий являются пиротехнические устройства, то испытания рекомендуется проводить на стендах, имеющих пиротехнические элементы. В противном

случае нарушается физика ударного нагружения, так как трудно воспроизвести необходимый амплитудный и частотный диапазоны, а вместо испытаний в проходящей ударной волне, когда ударное воздействие уменьшается при удалении от источника удара, при кинематическом возбуждении (например, стенды с падающими столами) все элементы аппаратуры подвергаются максимальным ударным воздействиям. Самый простой способ ударных испытаний – это срабатывание штатных устройств, от которых будет нагружаться оборудование в составе изделия. В результате обработки получают ударные спектры в местах установки оборудования, которые и служат основанием для формирования спецификаций по ударным воздействиям при автономных испытаниях (эксплуатационные значения умножаются на коэффициент безопасности). При автономных испытаниях такой метод не применяют, так как коэффициент безопасности должен быть больше 1. Однако до последнего времени наиболее часто используются методики, позволяющие создавать одиночные импульсы в форме полуволны синусоиды [1; 2; 5; 6].

При формировании необходимых УСУ при испытаниях требуются специализированные ударные стенды, обеспечивающие длительность ударного импульса $\sim 0,1\text{--}0,3$ мс (при замене УСУ одиночным импульсом) и амплитудой до 3–5 тыс.г. Формировать ударные воздействия с уровнями до 1000 г по УСУ можно с применением электродинамических стендов, а для воздействий с большими уровнями – только с помощью специализированных ударных стендов (должны использоваться стенды с пиротехническими элементами) [17; 18].

Таким образом, рассмотрев вышеизложенный материал, можно сделать следующие выводы.

1. Уровни механических нагрузок на бортовую аппаратуру КА негерметичного исполнения в десятки раз могут превышать воздействия, принятые на основе стандартов для герметичных КА.

2. Нормирование нагрузок на бортовую аппаратуру КА должно проводиться на основе зонного нормирования по результатам измерений, полученных на различных этапах отработки и испытаний КА.

3. Обязательными видами испытаний для аппаратуры являются испытания на случайную вибрацию и ударные воздействия по методу ударных спектров ускорений.

4. До начала испытаний для всей БА должен проводиться механический анализ, на основе которого формируется необходимый объем испытаний.

5. Некорректное использование формул, связывающих между собой режимы испытаний на широкополосную случайную вибрацию и гармоническую вибрацию, приводит к необоснованному завышению режимов нагружения аппаратуры.

6. Корректировка входного воздействия: процедура «вырезания» (notching) допустима только в пределах коэффициента квалификации.

7. В процессе испытаний на ударные воздействия необходимо учитывать источники и «физику» ударных воздействий.

8. При автономных испытаниях аппаратуры на высокоинтенсивные ударные воздействия (УСУ больше 1000 г) рекомендуется использовать стенды с пиротехническими элементами.

Библиографические ссылки

1. Product verification requirements for launch, upper-stage and space vehicles. MIL-STD-1540D, 15 January, 1999.

2. Space engineering. Testing. ECSS-E10-03A, 15 02 2002.

3. Гладкий В. Ф. Прочность, вибрация и надежность конструкции летательного аппарата. М. : Наука, 1975.

4. Орлов С. А. Разработка методик нормирования и испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов на механические нагрузки участка выведения. // Научный вестник НГТУ. № 3 (44). Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. С. 137-148.

5. Spacebus. Mechanical and thermal design, interfaces and environmental requirements. SB.AS.SY.002.AD02. P. 2.

6. ГОСТ P53190. Испытания на удар с воспроизведением ударного спектра. М. : Стандартинформ, 2009.

7. Ленк А., Ренитц Ю. Механические испытания приборов и аппаратов. М. : Мир, 1976.

8. Wijker J. J. Random Vibrations in Spacecraft Structures Design: Theory and Applications //, New York : Springer. APA Citation. 2009.

9. ANSYS 10. Documentation Theory Reference.

10. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М. : ДМК Пресс, 2001.

11. MSC/DYTRAN User's Manual // The MacNeal-Schwendler Corporation, 1997.

12. Babuska I., Oden J. T. The Reliability of Computer predictions: can they be trusted? International Journal of numerical Analysis and Modeling, Vol. 1. № 1. 2005. P. 1–18.

13. Babuska I., Oden J. T. Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts. Computer Method in Applied Mechanics and Engineering. Eng. 193 (2004). P. 4057–4066.

14. Girard N., Roy A. Calvi Notching in Sine Testing : Understanding and Practice. Proc. '12th European Conference on Spacecraft Structures, Materials & Environmental Testing', Noordwijk, The Netherlands (ESA SP-691, July 2012).

15. Moreau D. Test Requirements for Space Equipment. Developed by ESA-ESRIN ID/D.

16. Испытательная техника. Справочник в 2 т. / под ред. В. В. Клюева. Т. 1. М. : Машиностроение, 1982.

17. Pyroshock test criteria. NASA-STD-7003. 1999. May 18.

18. Пат. 2394217 РФ, МПК G01M 7/08. Пиротехническое устройство для создания ударных воздействий / Орлов С. А., Орлов А. С. Оpubл. 10.07.2010. Бюл. № 19.

© Орлов С. А., Копытов В. И., 2013