

ОТРАБОТКА БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Н.А. Красова, М.В. Пустобаев, А.П. Тютнев
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Представлен анализ современных расчётных и экспериментальных методов, которые используются для оценки ударных нагрузок на бортовую аппаратуру космических аппаратов (БА КА) и подтверждения её стойкости к ударным воздействиям. Предложен метод, позволяющий повысить стойкость разрабатываемой БА КА к ударным воздействиям.

Ключевые слова: космический аппарат, ударные воздействия, испытания, расчёт, спектр удара, пиросредство.

Введение

Современные космические аппараты (КА) являются сложными электротехническими комплексами, оснащёнными бортовой радиоэлектронной аппаратурой (БА). В процессе выведения КА на орбиту с помощью ракеты-носителя (РН) конструкция КА и БА испытывают механические нагрузки от внешних воздействующих факторов, одним из которых являются ударные воздействия от пиротехнических систем разделения. В связи с этим возникает необходимость подтверждения стойкости БА к ударным воздействиям.

Для КА характерна неравномерность распределения ударных нагрузок по конструкции, вызванная наличием нескольких источников ударного воздействия, расположенных в различных местах КА и РН, а также обусловленная физикой процесса распространения ударных волн.

В связи с этим для подтверждения стойкости БА КА требуется оценка уровней ударного нагружения практически для каждого оборудования и прибора БА КА. Обобщённые значения нагрузок на БА, в том числе указанные в отечественных стандартах как нормативные, зачастую не соответствуют действительным уровням ударных нагрузок для БА конкретного КА.

С другой стороны, подтверждение стойкости БА подразумевает проведение испытаний БА (предпочтительнее автономных), причём возможность реализации конкретного способа испытаний может зависеть от значений параметров предъявляемых к БА ударных нагрузок.

В связи с этим в общем случае не существует единой методики отработки БА. Для разрешения данного противоречия в статье представлены методы оценки ударных нагрузок, анализ экспериментальных и расчётных методов, применяемых для подтверждения стойкости БА, определены рациональные области применения способов испытаний в зависимости от уровней нагрузок.

Также предложен способ, позволяющий повысить стойкость разрабатываемой отечественной БА к ударным нагрузкам.

Ударное воздействие на аппаратуру КА и его источники

Ударное воздействие и его влияние на БА КА. Ударное воздействие представляет собой процесс, который может быть охарактеризован зависимостью ускорения от времени (например акселерограмма реального ударного процесса или генерируемый испытательный импульс заданной формы) или же задан в виде спектра удара, который представляет собой амплитудно-частотную характеристику удара [1].

Работоспособность БА при действии высокочастотных ударных нагрузок в настоящее время мало изучена. Особенностью спектра удара от срабатывания пиросредств является относительно высокое значение амплитуды (до 5000g) в области спектра от 1000 до 10000 Гц, что может представлять опасность для механических разрывов, паек элементов БА и отдельных высокочастотных элементов, которые используются в современной БА. Таким образом, удар может вызвать сбои в функционировании микросхем и БА в целом [2].

Источники ударных воздействий и распространение ударных нагрузок по конструкции.

Ударные воздействия на БА при выведении КА обусловлены использованием пиросредств в системах отделения КА, при разделении ступеней РН, а также собственных пиросредств КА. Можно выделить следующие источники наибольших ударных воздействий при выведении КА [3]:

- разделение ступеней РН, сброс обтекателя;
- отделение КА от последней ступени РН (разгонного блока РБ) с помощью системы отделения (СО) КА;
- срабатывание собственных механических систем КА (раскрытие антенн, солнечных батарей,

датчиков, платформ с аппаратурой) с последующим их приведением в операционное положение.

Воздействие от срабатывания пиросредств носит случайный характер, и его параметры варьируются с распространением по конструкции в широком диапазоне, что усложняет определение действующих нагрузок в местах крепления БА. В связи с этим измерение ударного импульса и последующее вычисление спектра удара должно относиться только к определённому месту: основанию КА, месту крепления конкретной БА или группы БА, закреплённых в близких местах по конструкции КА, и т. п.

Затухание ударных воздействий можно представить как функцию от расстояния, которое проходит возмущение по конструкции от источника воздействия до места крепления БА. Данная зависимость в дискретном виде (расстояния сгруппированы в диапазоны) представлена в табл. 1. Таблица формировалась, исходя из ГОСТ В 24880-81.

Для каждой БА (группы БА) необходимо сравнить

Таблица 1

Расстояние от источника воздействия, м	<0,7	0,7 – 1,5	1,5 – 3,0
Доля спектра удара, %	100	50 – 20	20 – 10

уровни, которые приходятся на эту БА (или группу БА) от всех источников ударного воздействия с учётом затухания, и на основе этих данных сформировать значение спектра удара, к которому должна быть стойкой данная БА.

Спектр удара нагрузки от пиросредств

Используемые на КА и РН пиросредства оказывают на конструкцию и БА КА ударное воздействие, спектр ответа которого имеет форму, представленную на рис. 1 (красная линия). Амплитуда спектра пиросредства соответствует уровням нагрузок при срабатывании СО малого КА (на примере КА «Канопус-В» № 1), измеренным вблизи системы отделения, у других пиросредств (от других источников) будет другая амплитуда спектра при похожей форме кривой.

Самое существенное ударное воздействие на КА оказывает срабатывание СО: амплитуда спектра удара при этом составляет до 1000 – 1200g для малых КА (например КА «Канопус-В» № 1), 2000 – 4000g для тяжёлых КА (например «Метеор-М» № 1).

Необходимо также учитывать воздействие от срабатывания СО других КА при попутном или

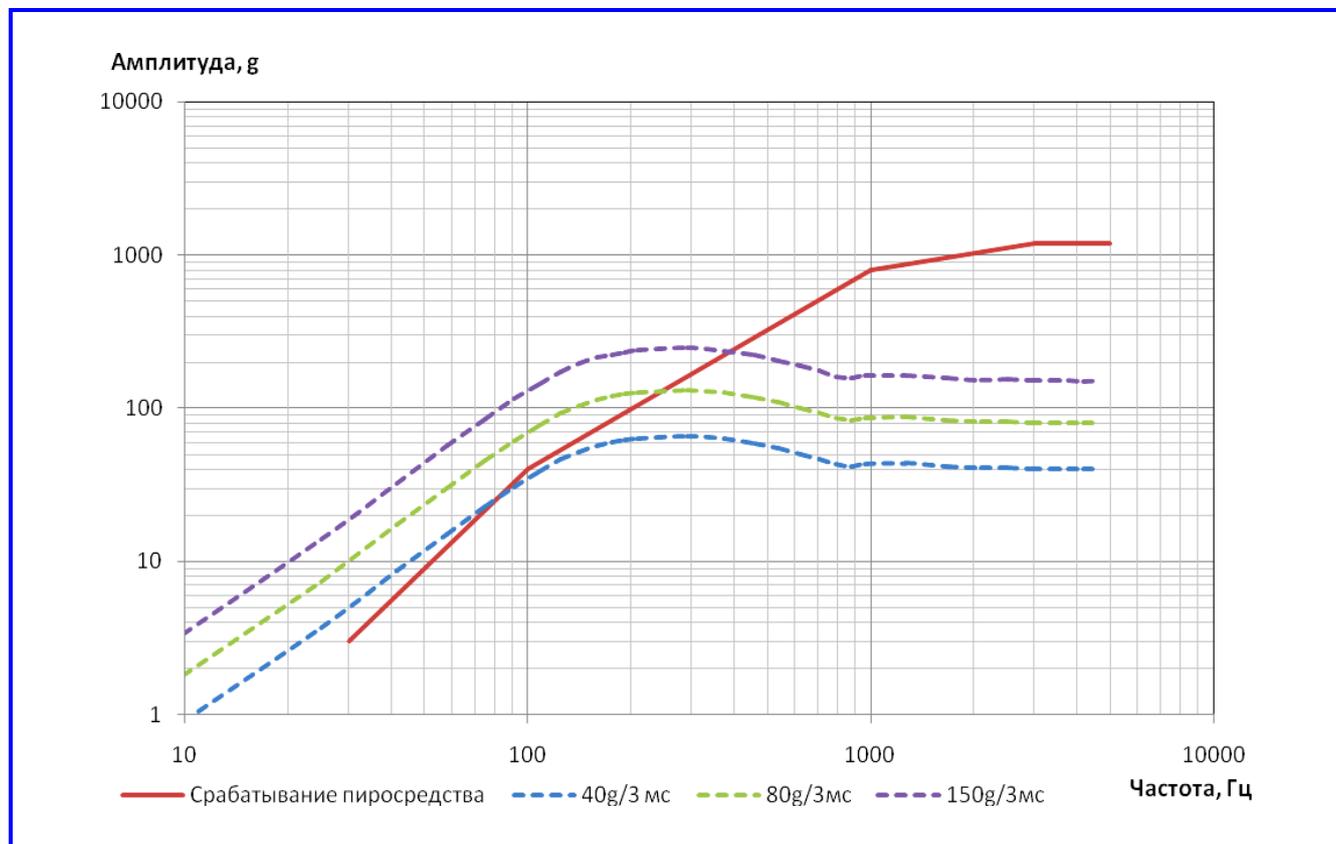


Рис. 1. Типичный спектр удара пиросредств с амплитудой 1200g (срабатывание СО КА «Канопус-В» № 1) и спектр удара от импульсов разной амплитуды

кластерном запуске, так как срабатывание СО других КА даже с учётом затухания (см. табл. 1) может превысить уровни нагрузок от собственной СО.

Нагрузки от разделения ступеней РН и сброса обтекателя обычно задаются разработчиками средств выведения (РН и разгонного блока) и состоят, как правило, из испытательных импульсов длительностью 3 мс и амплитудой 40 – 150g, что соответствует ГОСТ РВ серии 20.39 и другим стандартам. Соответствующие испытательным импульсам спектры удара показаны на рис. 1 пунктирными линиями.

Нагрузки на БА от срабатывания собственных механических систем КА (зачековки батарей, антенн и др.) зависят от конструкций этих систем. Ударное воздействие имеет форму спектра, аналогичную красной линии рис. 1. Спектр удара современных универсальных пиросредств имеет амплитуду ускорения на уровне до 5000g в максимальной области спектра (свыше 2000 Гц).

Необходимо отметить, что в общем случае (см. рис. 1) спектр удара от ударного импульса амплитудой 40 – 150g и длительностью 3 мс не перекрывает спектр удара от пиросредства, недогружая БА в высокочастотной области спектра и перегружая в низкочастотной.

В связи с этим режимы испытаний на ударную стойкость по ГОСТ РВ серии 20.39 не являются в общем случае достаточными для БА, и необходимо предварительно проводить оценку реальных уровней ударного нагружения БА.

Методы оценки действующих нагрузок на БА.

Для оценки нагрузок на БА могут применяться как фактические данные – экспериментальные данные по испытаниям штатных пиросредств и по лётным испытаниям, так и данные, полученные расчётным образом.

При испытаниях со штатными пиросредствами проводятся испытания динамического макета изделия КА с подрывом штатных пиросредств по штатной циклограмме срабатывания. При этом помимо анализа функционирования СО проводится также регистрация уровней воздействия в местах крепления БА, после чего данные анализируются, и вычисляется спектр ответа для разной БА, который используют для задания требований по ударным нагрузкам.

Необходимо отметить, что если планируется серийное производство КА с однотипной конструкцией, то целесообразно провести испытания и измерения уровней нагрузок на одном динамическом изделии (ДИ), далее эти данные можно использовать для

автономных испытаний аппаратуры всех КА из серии.

При расчётном методе оценки нагрузок применяется математическое моделирование на базе метода конечных элементов. Подготовка достоверной конечно-элементной модели КА и имитирование воздействий даёт возможность оценить нагрузки в конструкции и в местах крепления аппаратуры, возникающие при срабатывании пиросредств СО и собственных механических систем КА.

При формировании модели руководствуются следующими принципами:

- соответствием геометрических размеров конструкции;
- соответствием геометрических и массовых характеристик;
- соответствием жёсткостных характеристик по данным натурных испытаний.

Ударное воздействие от срабатывания пиросредства моделируется эквивалентным импульсом или спектром удара в комплексе MSC Nastran/Patran и ANSYS, при этом могут применяться несколько численных методов, учитывающих как волновую, так и оболочечную фазы деформирования конструкции.

Сложностью расчёта является то, что спектр пиросредств (см. рис. 1) имеет большую амплитуду в высокочастотной области, что не позволяет использовать линейное моделирование и ведёт к усложнению расчёта в части задания дополнительных исходных данных по характеристикам конструкции (например зависимость демпфирования от частоты), что также снижает точность метода.

Для повышения достоверности расчёта следует использовать данные модальных испытаний или ударных испытаний конструкций-аналогов. В этом случае при высокой степени соответствия расчётных и экспериментальных данных для оценки нагрузок можно использовать только расчётный метод.

При отсутствии экспериментальных и расчётных данных о характеристиках используемых пиросредств для оценки нагрузки на БА может использоваться максимальное обобщённое значение нагрузок от различных пиросредств по ГОСТ В 24880-81, представленное в табл. 2.

Определённые тем или иным способом нагрузки

Таблица 2

Частота, Гц	100	500	1000	5000	10 000
Спектр удара, g	150	1750	5000	5000	2500

на БА используются для подтверждения её стойкости к ударным нагрузкам.

Методы подтверждения стойкости БА к ударным нагрузкам

Стойкость БА к ударным нагрузкам можно подтвердить только экспериментальным способом – испытаниями опытного макета.

При этом испытания можно разделить на натурные – испытания со штатными пиросредствами и стендовые (автономные), при которых на БА моделируется ударное воздействие, причём задаваемые нагрузки увеличены относительно штатных с учётом коэффициента безопасности. К стендовым испытаниям относятся: испытания на вибростенде, копровые испытания, испытания на специализированном ударном стенде с имитированием пиротехнического воздействия.

Каждый из методов имеет свои ограничения, преимущества и недостатки.

Испытания со штатными пиросредствами. При испытаниях ДИ КА со штатными пиросредствами (подробнее метод описан выше) ДИ КА может быть укомплектован опытными образцами БА, содержащими функциональную часть в объёме, достаточном для проверки функционирования. Тогда в результате испытаний ДИ КА можно подтвердить (без запаса по уровню воздействия) стойкость любой БА КА к эксплуатационным ударным

нагрузкам. Однако ввиду отсутствия коэффициента запаса по уровню воздействия и технических сложностей данный способ редко применяется для испытаний БА.

Рациональная область применения: испытания батарей фотоэлектрических, антенн и других компонентов КА, имеющих многоточечное крепление к конструкции КА и влияющих на динамические характеристики ДИ КА, и поэтому являющихся обязательной частью динамического изделия.

Испытательные режимы стендовых автономных испытаний БА. При стендовых автономных испытаниях БА ударное воздействие моделируется, при этом нагрузки задают либо в виде спектра отклика, что соответствует общепринятой мировой практике, либо в виде испытательных ударных импульсов заданной амплитуды и длительности (распространено в отечественной практике), которые используются в основном для испытаний на вибростенде и копровом стенде.

Параметры испытательного импульса подбираются так, чтобы соответствующий ему спектр ответа охватывал требуемый спектр ответа. В случае, если спектр ответа одного импульса не полностью перекрывает требуемый, подбираются дополнительные импульсы другой длительности (и возможно амплитуды) так, чтобы огибающая спектров от этих импульсов перекрывала заданный спектр, как показано на рис. 2.

График построен в безразмерных осях, на

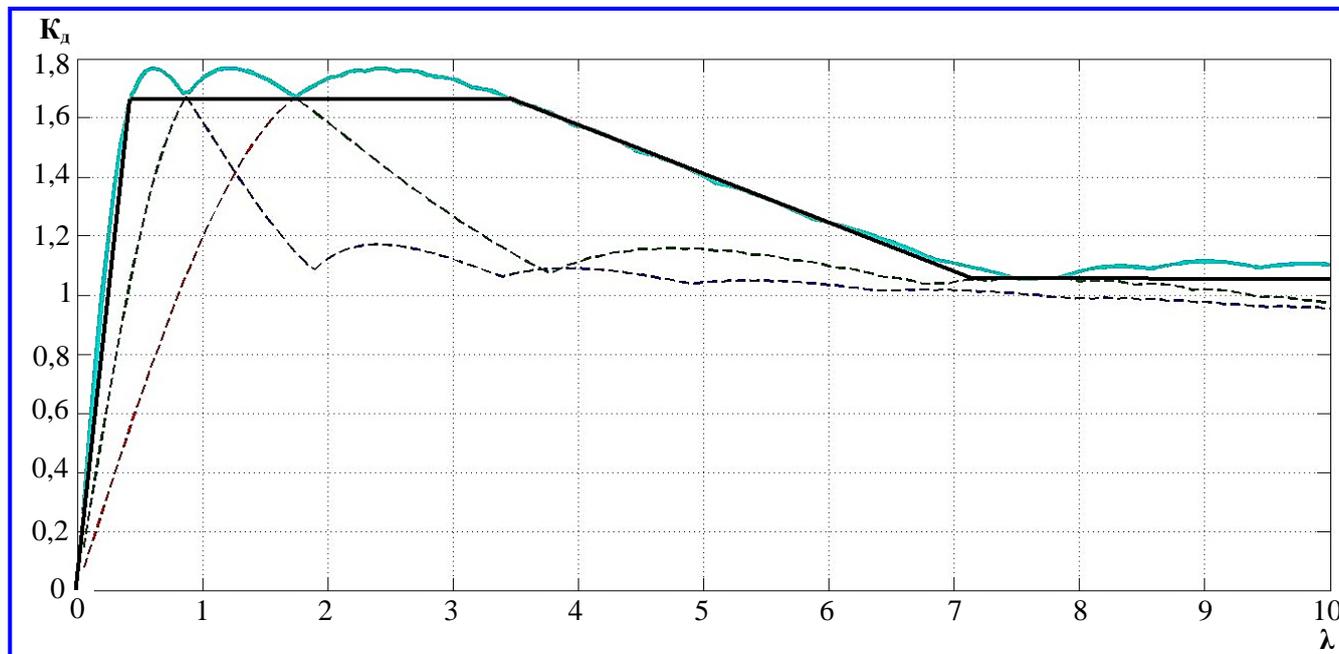


Рис. 2. Спектры ответа ряда из трёх импульсов. Пунктиром показаны спектры ответа от трёх импульсов разной длительности, сплошной – их огибающая (голубая линия), которая охватывает требуемый спектр (черная линия)

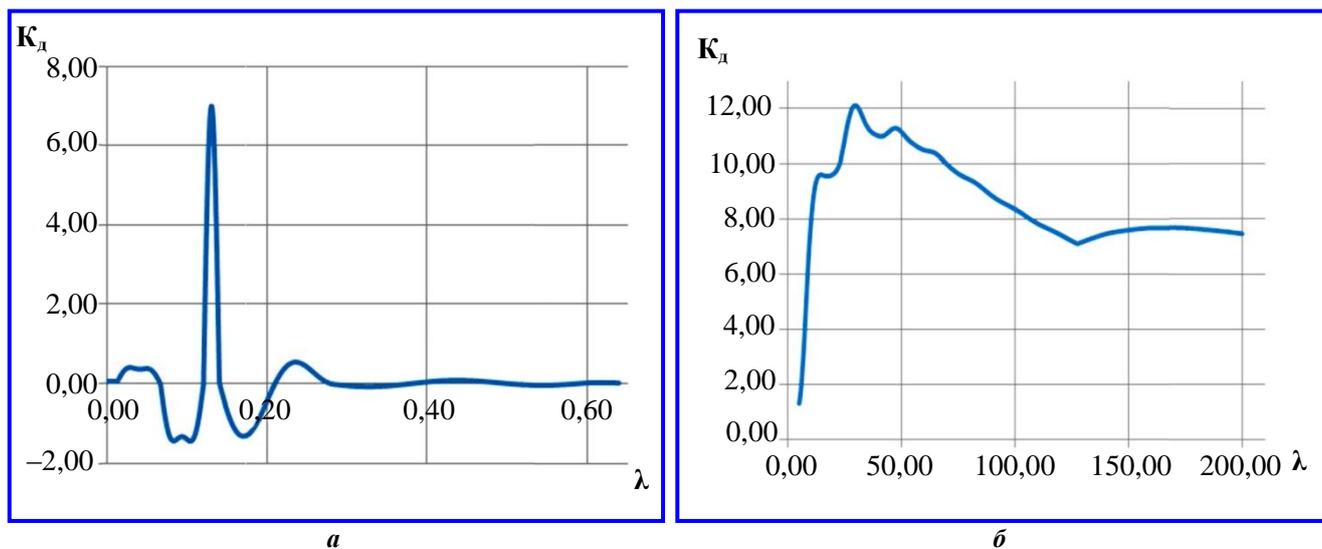


Рис. 3. Эталонный испытательный импульс (а), спектр отклика от воздействия эталонного испытательного импульса (б)

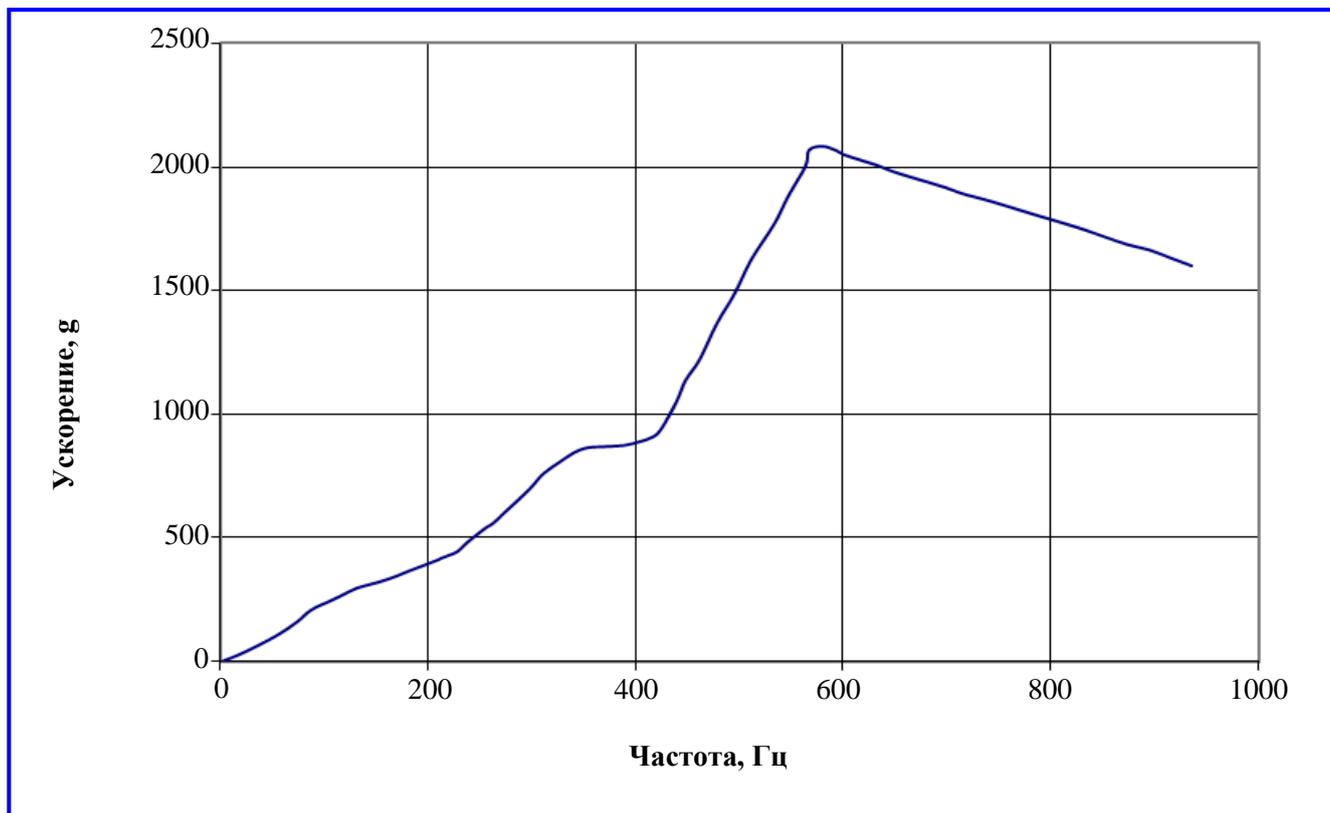


Рис. 4. Типичный спектр отклика для копровых испытаний

нём представлена зависимость коэффициента, динамичности K_d от частоты осциллятора, относённой к частоте импульса λ .

Испытания на вибростенде. При испытаниях на вибростенде ударное воздействие имитируется одним или несколькими полусинусоидальными импульсами. Эталонный полусинусоидальный им-

пульс (рис. 3) состоит из основного импульса, который определяется пиковым уровнем воздействия, а также предварительного и последующего импульса, которые необходимы для правильной работы стенда.

Сложность метода состоит в получении высоких уровней воздействий во всём частотном диа-

пазоне. Возможности современных вибростендов в создании ударных импульсов ограничены: как правило, по амплитуде ускорения импульс не превышает 100 – 200g, по длительности составляет не менее 1,0 мс (при точном задании времени импульса), что ограничивает возможность применения метода.

В связи с этим рациональная область применения – испытания БА относительно небольшой массы (~до 10 – 20 кг) при требуемом спектре отклика, который имеет относительно небольшое значение высокочастотной составляющей (не более 100 – 200g на частоте свыше 2000 Гц).

График построен в безразмерных осях, на нём представлена зависимость коэффициента динамичности K_d от частоты осциллятора, отнесённой к частоте импульса λ .

Копровые испытания. Копровые испытания активно используются в авиации и судостроении. Суть этих испытаний заключается в сбрасывании испытываемого объекта, установленного на копровую плиту, с высоты, и замера уровней ускорений при его ударе о поверхность. Также допускается проводить удар по плите копра с аппаратурой движущимся ударным молотом. Типичный спектр копровых испытаний представлен на рис. 4 [4].

Первая схема испытаний, когда объект испытаний имеет начальную скорость, приводит к перегрузкам конструкции БА от скачка скорости, в то время как реальное пиротехническое воздействие имеет другую природу. При этом спектр отклика имеет пик амплитуды в низкочастотной области, не поддающийся «отстройке» вследствие физики процесса деформации, что существенно перегружает БА в области низких частот и недогружает в области высоких – т. е. воспроизведение спектра, схожего с представленным на рис. 1, невозможно.

Второй случай копровых испытаний связан с ударом молота по неподвижной платформе копра.

Особенность данного случая копровых испытаний – для получения значений спектра ответа, близких к показанному на рис. 1 спектру от срабатывания СО, необходимо значительно сдвинуть «точку перегиба» спектра из области низких частот в область высоких, для чего варьируются многочисленные параметры: масса молота, скорость удара, форма наконечника, материал и размеры «подложки» в месте удара молота о плиту копра.

В итоге спектр, аналогичный представленному на рис. 1, можно охватить данным методом испытаний: перекрыть серией ударов, параметры которых определяются подбором. Однако подбор пара-

метров стенда для реализации импульсов для всей БА КА потребует значительное время, что и является серьезным недостатком метода.

Рациональная область применения метода – испытания на соударение при падении (натурное воспроизведение режимов посадки КА – приземления/прилунения и т. п.). Для БА космических аппаратов, функционирующих только на орбите Земли, данный метод представляется малоэффективным.

Испытания БА на специализированном стенде с пороховым источником энергии. Альтернативным способом экспериментальной отработки на ударные нагрузки является использование специализированного стенда с пороховым источником энергии для ударного воздействия.

При этом способе объект испытаний монтируется штатным образом на плиту стенда. Плита нагружается при помощи механического ударного устройства с пиротехническим источником энергии, плита передаёт на объект испытаний определённый спектр от проведённого удара. Проводится серия ударов для перекрытия спектра, при этом варьируются параметры (параметры приспособлений или ударных источников).

Как правило, предварительно проводится подбор значений параметров стенда, обеспечивающих перекрытие необходимого ударного спектра в результате серии испытаний, далее данная серия испытаний проводится на испытываемой БА.

Существуют различные вариации стендов подобного типа, используемые в РФ и за рубежом [3]. Для подбора необходимых испытательных режимов для испытаний БА в общем случае используются варьирование кинетической энергии удара, использование приспособлений с собственной частотой в районе частоты изгиба требуемого спектра удара, обезвешивание плиты и некоторые другие способы [3, стр. 28.10].

Рациональная область применения метода – автономные ударные испытания практически любой БА КА.

Каждый из перечисленных экспериментальных методов испытаний БА имеет свою рациональную область применения, при этом наиболее перспективным и универсальным является проведение автономных испытаний БА на специализированном ударном стенде.

Таким образом, выше рассмотрены методы определения ударных нагрузок, воздействующих на БА КА, и испытаний БА на эти нагрузки. При этом значения нагрузок на БА определялись с учё-

том размещения БА в КА и с учётом особенностей конструкции КА.

Однако возможен другой подход к проведению квалификационных испытаний БА для обеспечения ударной стойкости БА КА, который подразумевает независимость БА от конструкции КА.

Испытания БА на завышенные значения нагрузок. Если БА пройдёт автономные испытания на относительно большие по сравнению с эксплуатационными значения нагрузок (например спектр удара с амплитудой до 5000g), то данную БА можно устанавливать в любое место КА без измерения ударных нагрузок в местах крепления.

Данный подход применяется за рубежом – в европейском космическом агентстве – и в США (военный стандарт MIL-STD-883 и другие).

Для обеспечения такого подхода к испытаниям разрабатываемой БА следует в первую очередь убедиться в том, что составные части БА – элементная база – являются стойкими к удару такой амплитуды и длительности.

Испытания элементной базы БА

Испытания элементной базы БА на ударные нагрузки является одним из эффективных мероприятий, которые позволят повысить стойкость разрабатываемой БА к ударным нагрузкам. Это также является необходимым условием подтверждения надёжности проектируемой БА: при компоновке БА из такой элементной базы существенно снизятся риски выхода БА из строя после прохождения удара через конструкцию БА.

При этом предельные значения уровней ударных нагрузок, при которых функционирует элементная база БА, позволят дать первичную оценку стойкости, т. е. если ожидаемый уровень нагрузок превышает предельные значения для элементной базы БА, то при проектировании БА необходимо предусмотреть средства для уменьшения воздействий, например, амортизаторы и т. п.

Для проведения испытаний элементной базы необходимо, во-первых, проанализировать существующую элементную базу и выбрать необходимые типы элементов для испытаний – создать своего рода репрезентативную выборку по всем типам электронных компонентов с учётом типовых вариантов компоновок микросхем. Во-вторых, задать испытательные уровни нагрузок. В-третьих, необходимо провести испытания выбранных элементов и сделать вывод о соответствии отечественной элементной базы современным требованиям по стойкости к ударным нагрузкам.

Для выполнения этого комплекса шагов могут использоваться данные по элементной базе и уровням нагрузок из следующих источников:

1. Военный стандарт США MIL-STD-883, где в зависимости от типа элементной базы и предполагаемого уровня её надёжности определяется значение пикового ускорения от 500 до 30 000g при длительности воздействия от 0,1 до 1 мс.

2. Книга Б.А. Карпушина «Вибрации и удары в радиоаппаратуре». Там представлены типы элементной базы и предъявляемые к ней требования для элементной базы периода 1970-х гг. Книга может быть взята за основу при детализации списка электронных компонентов – резисторов, реле и т. п., современные аналоги которых требуется определить и испытать.

Выводы

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Проанализированы способы оценки ударных нагрузок на БА. Показано, что для подтверждения стойкости БА к ударным нагрузкам необходимо предъявлять адекватные требования по уровням ударных нагрузок, чтобы избежать завышения нагрузок при их определении по ГОСТ В 24880-81 или занижения при использовании традиционных испытательных режимов (импульс 40 – 150g длительностью 1 – 3 мс). Определение нагрузок для вновь разрабатываемых конструкций КА возможно только при испытаниях ДИ КА. Для оценки нагрузок на БА КА при наличии данных испытаний аналогов КА могут применяться опытные данные и расчётные методы.

2. Проанализированы способы испытаний БА КА на стойкость к ударным нагрузкам, и определена их рациональная область применения. В процессе испытаний ДИ КА со штатными пироструйными средствами целесообразно подтверждать (без учёта коэффициента безопасности) стойкость элементов КА, имеющих многоточечное крепление к конструкции КА и влияющих на динамические характеристики ДИ КА (например батареи фотоэлектрические, антенны). Для остальной БА рекомендуется проводить автономные стендовые испытания на увеличенные значения нагрузок с учётом коэффициента безопасности. Универсальным способом является проведение испытаний БА на специализированном стенде с пороховым источником энергии. В отдельных случаях при небольшой массе БА (до 10 – 20 кг) и невысоких уровнях нагрузок (спектр ответа с амплитудой не более 100 – 200g

на частоте свыше 2000 Гц) возможны испытания на вибростенде.

3. Предложен метод, позволяющий повысить стойкость разрабатываемых БА к ударным воздействиям, который заключается в исследовании ударостойкости элементной базы при проектировании БА. Для этого необходимо определить типы, количество и конфигурацию испытываемой элементной базы и испытать её на определенных уровнях нагрузок. В качестве ориентира по типам элементов и предъявляемым к ним требованиям по ударным нагрузкам целесообразно рассмотреть открытые зарубежные стандарты, например, MIL-STD-883, а также отечественные источники,

в том числе книгу Б.А. Карпушина «Вибрации и удары в радиоаппаратуре».

Литература

1. ISO Standard 18431-4, 2007 Mechanical Vibration and Shock – Signal Processing. – Part 4: Shock Response Spectrum Analysis.
2. Pyroshock explained by Patric L. Walter (http://www.pcb.com/techsupport/docs/vib/VIB_TN_23_0406.pdf).
3. Harris' Shock and Vibration Handbook, edited by Harris and Piersol. – McGraw Hill. – 5th Edition. – 2002. – 1199 с.
4. Абрамович С. Ф., Крючков Ю. С. Динамическая прочность судового оборудования / С. Ф. Абрамович, Ю. С. Крючков. Л. : Судостроение», 1967. – 512 с.

Поступила в редакцию 19.03.2013

Наталья Алексеевна Красова, мл. научн. сотрудник, e-mail: tinkal-88@list.ru.

Михаил Викторович Пустобаев, аспирант, мл. научн. сотрудник,
e-mail: Mikhail.pustobaev@gmail.com, т. (495) 366-79-52.

Андрей Павлович Тютнев, д-р физ.-мат. наук, ведущий научн. сотрудник,
т. (495) 366-38-38.