

УДК 620.178.4/6

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА АППАРАТУРУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ СРАБАТЫВАНИИ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РАЗДЕЛЕНИЯ

А.О. Грабилин, Б.И. Зубренков, М.В. Пустобаев,
А.Д. Судомоев, А.В. Шматков
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Представлен метод моделирования ударных нагрузок от пиротехнических средств по спектру удара с использованием разработанного стенда. Выявлены параметры конфигурации стенда, влияющие на составляющие спектра удара и амплитуду спектра удара. Проанализированы особенности воспроизведения составляющих спектра удара, сформулированы рекомендации по заданию полей допуска составляющих спектра удара при испытаниях.

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

В процессе срабатывания пиротехнических средств систем разделения и раскрытия элементов космических аппаратов (КА) возникают силовые ударные нагрузки, действующие как на саму конструкцию КА, так и на установленную в КА бортовую аппаратуру (БА).

Эти нагрузки по своей физической природе представляют собой кратковременные силовые импульсы, вызывающие как переходную реакцию самой конструкции КА после срабатывания пиротехнических зарядов и распространения волн напряжений, так и последующие свободные затухающие колебания, определяемые упругими свойствами конструкции КА. Особенно интенсивно ударные воздействия реализуются на собственных частотах конструкции в верхнем диапазоне значений.

По своему характеру виброударные нагрузки от пиротехнических воздействий на некотором расстоянии от источника проявляются в виде централированных быстро затухающих процессов, наибольшая интенсивность которых в течение $3 \div 5$ мс может достигать величин свыше $3000 \div 5000$ g.

Аппаратура КА по ударостойкости должна соответствовать требованиям ОСТ 92-5100-2002 либо технических условий (ТУ). При этом действующие нагрузки нормируются в виде ударных спектров (СУ) по трём взаимно ортогональным осям в соответствии с ГОСТ Р 53190-2008.

Нагрузки от пиротехнических средств имеют свою специфику – малую продолжительность в сочетании с большой интенсивностью. В связи с этим для проведения испытаний аппаратуры на ударостойкость на существующем стендовом оборудовании, предназначенном для ударных испытаний, режимы испытаний не всегда реализуются.

Кроме того, натурные испытания требуют значительных материальных затрат и не всегда технически целесообразны при отработке стойкости к ударным воздействиям БА КА.

В связи с этим для имитации ударных воздействий от пиротехнических средств был разработан специализированный стенд, на котором с помощью патронов для промышленных монтажных пистолетов воспроизводятся требуемые нагрузки.

Стенд (рис. 1) состоит из сварной рамы, на которой установлена технологическая платформа в виде стальной плиты толщиной 40 мм и размером 500×500 мм.

По трём осям платформы 2 смонтированы ударные устройства 4, в которых после подрыва патрона при помощи пороховых газов разгоняется ударный поршень и воздействует на платформу через

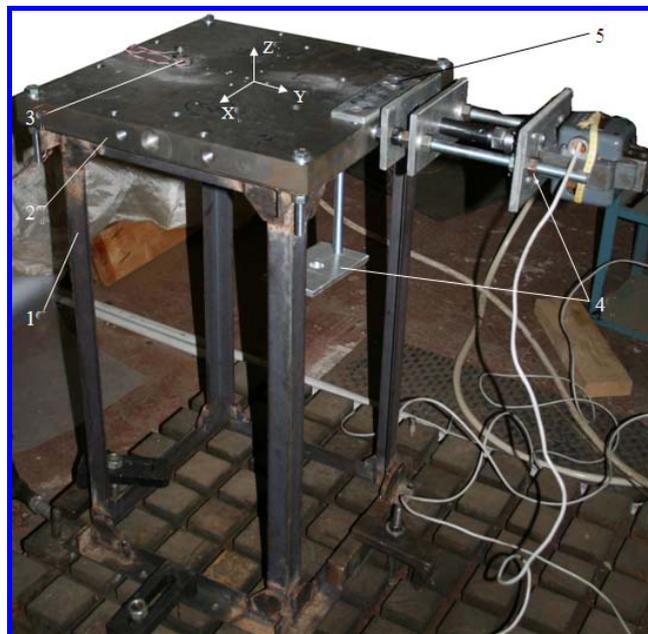


Рис. 1. Общий вид виброударного стенда (ВС): 1 – рама; 2 – стальная плита (платформа); 3 – «розетка» с тремя ударными акселерометрами; 4 – устройство (механизм) ударного нагружения; 5 – демпфирующие проставки из АМгЗ



Рис. 2. Комплект деталей для формирования заданного СУ

различного рода демфирующие прокладки. Подрыв патрона осуществляется с помощью электромагнитного устройства с подвижным сердечником, ударяющим при помощи бойка по капсулю.

Платформа 4 стенда служит для установки испытуемой аппаратуры с соответствующей оснасткой. Предусмотрена также возможность установки на платформе дополнительных технологических плит толщиной 10 и 20 мм. С помощью подбора различных втулок и прокладок можно регулировать конфигурацию необходимого СУ. На рис. 2 показан комплект деталей, комбинация которых создаёт необходимую конфигурацию.

Задаваемые техдокументацией испытательные режимы в виде СУ предусматривают создание различных амплитудно-частотных составляющих в диапазоне частот от 100 до 10 000 Гц.

Для того, чтобы провести испытания БА на стенде на требуемые ударные нагрузки, необходимо:

- выбрать конструктивную схему установки испытуемого изделия, чтобы обеспечить схему крепления изделия к платформе стенда, наиболее приближенную к штатной, а также воспроизведение характерных частотных составляющих заданного в ТЗ СУ;
- выбрать места воздействия ударных механизмов и мощность заряда, чтобы обеспечить необходимую амплитуду удара в контрольных точках;
- установить поле допустимых отклонений составляющих СУ от нормированных значений.

Выбор конструктивной схемы проведения испытаний

Для каждой испытуемой БА КА подбирается индивидуальная установочная оснастка, которая состоит из приспособлений, необходимых для монтажа аппаратуры в штатных условиях, и тех или иных конструктивных решений, обеспечивающих необходимую форму СУ.

Испытания проводятся в два этапа. На первом этапе на оснастку устанавливается весовой макет испытуемой БА, закрепляющийся на оснастке штатным креплением.

Выбор схемы установки проводится экспериментально путём механического возбуждения платформы ударным молотком, возбуждающим достаточно короткие импульсы, спектры которых обычно не превышают $4 \div 5$ кГц. Таким ударным молотком, например, является молоток 8201 фирмы Брюль и Кьер со сферическим стальным наконечником.

Поскольку колебательная система, состоящая из платформы и оснастки с макетом изделия, предполагается линейной, то и форма СУ от пиропатрона и ударного молотка будут отличаться, в основном, по уровням частотных составляющих.

Если изделие установлено вместе с оснасткой на платформе, то возможна коррекция формы СУ путём установки дополнительной технологической плиты под оснастку. Дополнительная плита может устанавливаться на различного рода втулки, шайбы, а также на мягкие прокладки. Одним из приёмов коррекции формы СУ является несимметричная установка опорных элементов дополнительной плиты для возбуждения изгибных форм колебаний.

Другим вариантом, дополнительно расширяющим возможности подбора необходимой формы СУ, является мягкая установка платформы на раме с помощью амортизаторов или резиновых прокладок.

Контроль при изменении СУ можно проводить, наблюдая плотность собственных частот в том или ином диапазоне, возбуждая их ударным молотком.

Выбор мест и направлений воздействия

Места установки и ориентация ударных устройств определяются конструкцией стенда. Проблема состоит в том, сколько одновременно должны срабатывать возбудителей и в каком направлении по отношению к осям изделия. Так как по существующим нормам на ударные нагрузки характерные частотные составляющие СУ задаются одинаковыми по трём осям изделия, необходимо обеспечить в контрольных точках плат-

формы также одинаковые испытательные режимы. При этом для нормированных режимов нагружения выбирается воздействие по одной оси платформы стенда, а положение осей изделия по отношению к осям стенда меняется при помощи оснастки. Для квалификационных испытаний при моделировании ударного нагружения от штатного пиротехнического устройства положение изделия на платформе стенда не меняется, а настройка параметров составляющих вектора ускорений проводится за счёт выбора параметров нагружения в нескольких точках платформы и подбора съёмных элементов стенда.

По результатам экспериментальных исследований было установлено, что главным направлением следует считать ось Z (см. рис. 1). Срабатывание пиросредств в этом направлении возбуждает преобладающие отклики по всем трём осям. Ударное воздействие в этом направлении возбуждает существенно больше форм колебаний платформы, чем при продольных воздействиях по осям X, Y.

Открытым является вопрос о применении одновременно двух и более возбудителей.

Опыт испытаний показал, что при одновременной работе двух возбудителей по осям Z и Y, СУ, как правило, заметно не увеличивается по сравнению с воздействием только одного из них по оси Z. В ряде случаев наблюдалось даже уменьшение составляющих СУ.

Причины этого могут быть следующие.

Пусть $x_1(t)$ – ударный импульс, возбуждаемый только первым источником, $x_2(t)$ – возбуждается только вторым источником.

Реакция осциллятора $y_i(t)$, определяющая составляющую СУ на i -й частоте, будет:

– от работы 1-го источника: $y_{i1}(t) = \int_0^{\infty} h_i(t-\tau)x_1(\tau)d\tau$;

– от работы 2-го источника: $y_{i2}(t) = \int_0^{\infty} h_i(t-\tau)x_2(\tau)d\tau$;

– от двух источников: $y_{i3}(t) = \int_0^{\infty} h_i(t-\tau)[x_1(\tau)+x_2(\tau)]d\tau$,

где $h_i(t)$ – импульсная переходная функция от i -го осциллятора.

Процедура определения i -й составляющей СУ состоит в отыскании максимума функций $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$.

Таким максимумам соответствуют временные координаты

$$t_{1m}, t_{2m}, t_{3m}, \text{ и } y_{i1}(t_{1m}) > y_{i1}(t_{3m}), y_{i2}(t_{2m}) > y_{i2}(t_{3m}),$$

отсюда

$$y_{i3}(t_{3m}) = |y_{i1}(t_{3m}) + y_{i2}(t_{3m})| < |y_{i1}(t_{1m})| + |y_{i2}(t_{2m})|.$$

Учитывая, что $y_{i1}(t_{3m})$ и $y_{i2}(t_{3m})$ могут иметь разные знаки, можно сделать вывод, что амплитуда СУ от подключения 2-го источника может не увеличиться. Для модуля вектора имеем:

$$y_{i3}(t_{3m}) = \sqrt{(y_{i1}^2(t_{3m}) + y_{i2}^2(t_{3m}))} \geq |y_{i1}(t_{1m})|; \tag{1}$$

$$y_{i3}(t_{3m}) = \sqrt{(y_{i1}^2(t_{3m}) + y_{i2}^2(t_{3m}))} \geq |y_{i1}(t_{2m})|,$$

где $y_{i3}(t_{3m})$ – отклик вектора ускорений.

Таким образом, СУ вектора ускорений в идеальном случае всегда больше СУ его составляющих. Следует отметить, что при частоте дискретизации 25 кГц в районе высоких частот из-за грубой аппроксимации временного процесса имеют место случаи, когда СУ вектора меньше СУ составляющих. В связи с этим для расчёта СУ в диапазоне до 10 кГц частота дискретизации процесса не должна быть меньше 50 кГц.

Мощность импульса от пиропатронов

Ударная нагрузка от пиротехнического возбудителя определяется массой ударного поршня и скоростью его движения в конце разгонного ствола.

Поскольку скорость поршня непосредственно измерить невозможно, она оценивается косвенным путём – расчётом, в основе которого лежат результаты измерений объёмов остаточных вмятин на пластине-прокладке, контактирующей с поршнем и платформой (рис. 3).

При этом полагается, что вся кинетическая энергия поршня в процессе удара полностью переходит в потенциальную энергию пластической деформации прокладки.

Исходя из этих представлений, можно определить скорость поршня по соотношению



Рис. 3. Остаточные деформации на пластине-прокладке

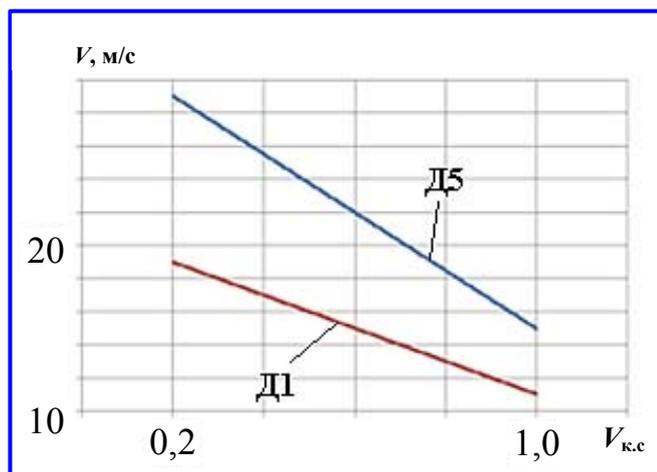


Рис. 4. Зависимость скорости поршня V от объёма камеры сгорания $V_{к.с.}$

$$V = \sqrt{\frac{2Q\sigma_T}{m}}$$

где V – скорость поршня, м/с; Q – объём вмятины, м³; m – масса поршня, кг; σ_T – предел текучести материала пластины, Па.

На рис. 4 представлены зависимости рассчитанных по соотношению (1) скоростей движения поршня от объёма камеры сгорания $V_{к.с.}$ для патронов различной мощности. Расчёты сделаны для пластины из АМгЗ с пределом текучести $\sigma_T = 65$ МПа или $65 \cdot 10^6$ Н/мг при массе ударного поршня $m = 0,116$ кг.

По оси абсцисс приведены относительные значения объёма камеры сгорания. Объём регулируется при помощи добавления к камере части объёма ствола установкой между пробкой и торцом ударника цилиндрической вставки различной длины.

Максимальную мощность заряда имеют патроны Д5, минимальную – патрон Д1.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- мощность заряда эффективно проявляется только при уменьшении объёма камеры;
- полученные результаты позволяют ориентироваться при подборе типа пиропатрона для получения необходимых ударных воздействий.
- чем больше камера сгорания, тем больше СУ и уменьшается амплитуда импульса.

Метрологические аспекты проведения ударных испытаний

Одним из важнейших этапов проведения ударных испытаний является определение поля допустимых значений составляющих СУ, заданного

технической документацией на испытания. В рамках данной статьи рассматриваются только вопросы воспроизведения заданного спектра удара, а не основанное на статистических данных задание уровня нагрузок для отработочных (квалификационных) испытаний БА.

Как правило, в ТУ на проведение испытаний приводятся нагрузки в виде СУ, причём зачастую не оговаривается, насколько возможны отклонения амплитуды той или иной составляющей СУ от заданного значения.

В международной практике (стандарт ISO 15864 «Системы космические. Общие методы испытаний для космического корабля, подсистем и блоков») также не сформулированы требования по допускам при воспроизведении требуемых уровней воздействий. При этом утверждается, что поле допуска при испытаниях (также как и точность измерений) зависит от параметров конкретного испытательного (измерительного) оборудования.

Воспроизведение указанного в ТУ СУ зависит от многих факторов, которые определяют поле возможных отклонений амплитуды СУ. Однако данные факторы, как правило, не учитывают, что некоторые составляющие СУ не возбуждаются импульсными нагрузками, и их величина обусловлена особенностями методики расчёта.

Остановимся на некоторых вопросах, связанных с возможностью создания заданных нагрузок и получаемых при этом отклонениях.

1. Процедура формирования заданного СУ состоит в проведении пробных испытаний весового макета прибора, чтобы подобрать для него необходимую форму СУ. При этом возникает проблема повторяемости полученных результатов испытаний при одних и тех же условиях. Поле рассеяния нагрузок определяется во многом вариацией мощности используемых пиропатронов одного и того же типа, а также нестабильностью работы ударного механизма.

Проведённые эксперименты показали, что наблюдается повторяемость как по СУ, так и по временным характеристикам возбуждающего импульса – его размахам.

На рис. 5 в качестве примера представлены результаты трёх испытаний весового макета одной БА КА, выполненные в одних и тех же условиях. Можно видеть, что повторяемость СУ при этом достаточно высока и не превышает ± 3 дБ.

Таким образом, можно заключить, что повторяемость результатов испытаний в аналогичных условиях составляет не более ± 3 дБ от

среднего значения, и при испытаниях БА СУ испытательный импульс будет иметь разброс амплитуды в пределах этих значений.

2. Необходимую форму заданного СУ в ряде случаев реализовать не удастся. Особенно это проявляется на низких частотах до $800 \div 1000$ Гц, и на высоких свыше $7000 \div 8000$ Гц.

Низкочастотная часть СУ может в ряде случаев не иметь в этом диапазоне возбуждающихся резонансных частот, а проследиваться вследствие наличия низкочастотных помех измерительного сигнала и принятого при расчёте СУ декремента затухания.

На рис. 6 представлен результат моделирования СУ с помощью затухающей синусоиды с периодом 1 мс. На рисунке можно увидеть наличие составляющих СУ на частотах ниже 1000 Гц, которые не имеют в этом диапазоне частот возбуждений. Если при расчёте СУ взять декремент выше 10, то значения амплитуды в низкочастотной области могут существенно уменьшиться. Вследствие этого целесообразно увеличить поле допуска в области низких уровней.

На частотах свыше $7000 \div 9000$ Гц обычно наблюдаются повышенные уровни СУ. Причина этого явления следующая. Во-первых, плотность собственных частот увеличивается с ростом частоты и, поэтому, по своей физической сущности уровень СУ на высоких частотах должен быть выше, так как здесь имеют место резонансные отклики.

Во-вторых, отклики колебательной системы «стенд – оснастка» измеряются с помощью «розеток» – обычно стальных кубиков, на которых устанавливаются ударные акселерометры. Розетки крепятся к оснастке, на которой устанавливается исследуемый прибор, с помощью резьбовых шпилек. Масса розетки-кубика с резьбовой шпилькой образуют колебательную систему, собственная частота которой расположена, как правило, в этом высокочастотном диапазоне. На рис. 7 представлен фрагмент осциллограммы и соответствующий спектр свободных колебаний такого кубика, возбуждённый импульсным воздействием от ударного молотка.

Представляется, что в этом частотном диапазоне поле допуска должно быть расширено вверх, так как реально испытываемое изделие не подвергается повышенным нагрузкам, а их регистрация происходит вследствие резонанса системы датчик-переходник средств крепления к платформе стенда.

Таким образом, СУ, задаваемый технической документацией, должен быть дополнен указанием долей допускаемых значений. Можно предположить, что для разработанного стенда, и иных

стендов подобного типа, по всему частотному диапазону должно применяться поле с допуском ± 3 дБ, на низких частотах от -6 до $+3$ дБ, на высоких частотах от -3 до $+6$ дБ.

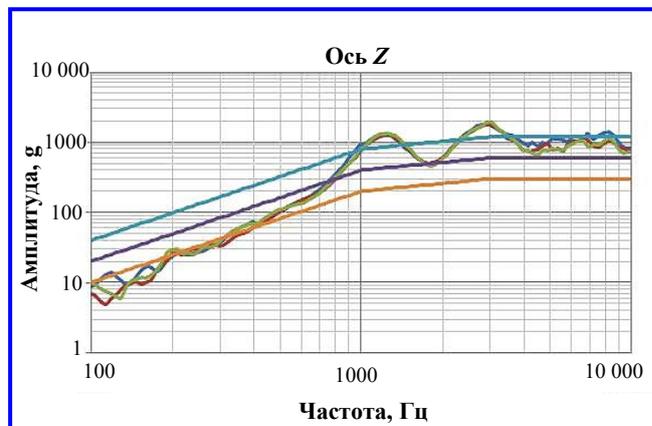


Рис. 5. Результаты трёх испытаний БА в одних и тех же условиях

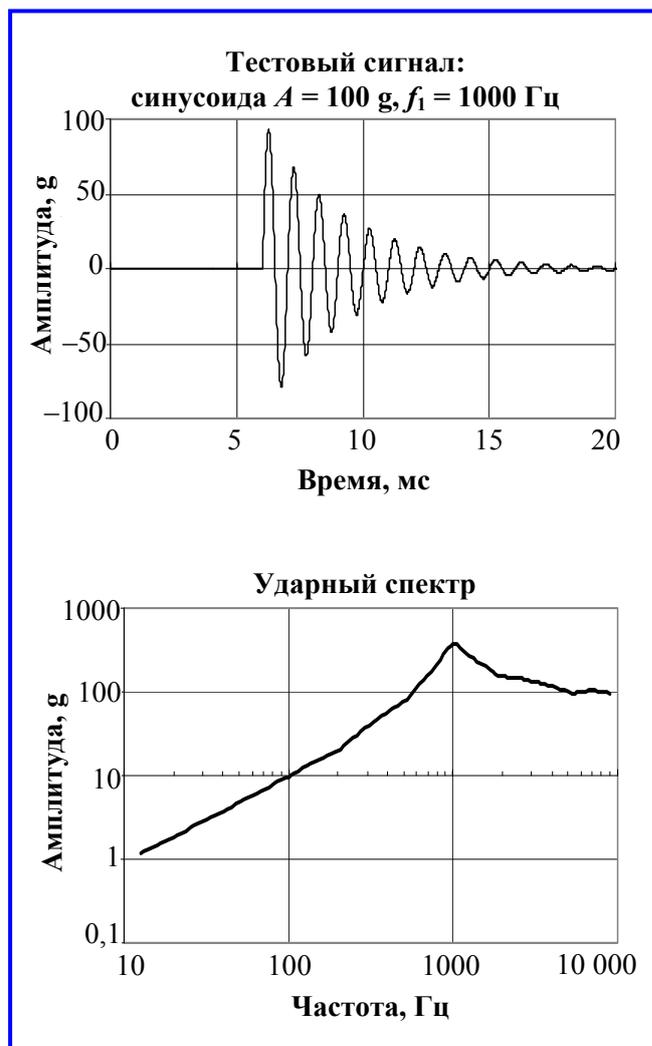


Рис. 6. Моделирование СУ с помощью синусоиды с периодом 1 мс

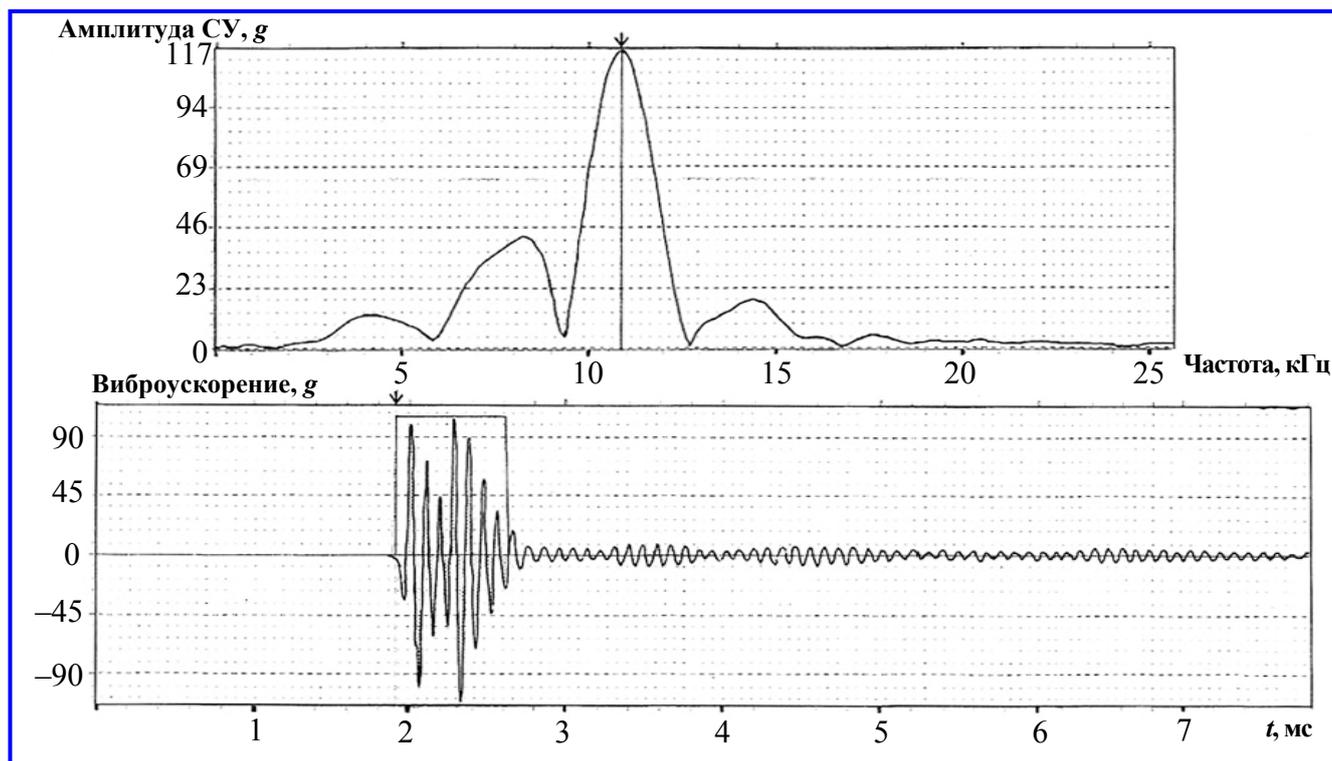


Рис. 7. Спектр и осциллограмма свободных колебаний «розетки» от воздействия ударного молотка

3. Существенным является сам измеряемый параметр. По ТУ и ГОСТ измерение и нормирование СУ проводится по показаниям акселерометров по трём ортогональным направлениям.

Представляется, что нормирование СУ должно производиться также по модулю отклика, т. е. по результирующей, действующей на систему осцилляторов. Это даёт оценку реально действующей на БА нагрузки. Кроме того, такая оценка позволяет уменьшить число испытаний вследствие того, что не потребуются повторные ударные воздействия по трём осям.

Реализация такого подхода выполняется на базе обычного расчёта СУ по программе, куда вносится фазовая коррекция исходных сигналов.

4. Большое влияние на результаты расчётов СУ при проведении испытаний на объекте – непосредственно на КА или его динамическом макете, могут оказать наводки в виде электрических импульсов, возникающих при включении штатных пирострелков. Вследствие кратковременности их действия, они могут существенно увеличивать величины высокочастотных составляющих измеряемого СУ, а также вызывать существенные низкочастотные тренды от перегрузки канала измерения.

Заключение

На разработанном стенде можно успешно проводить испытания БА КА с габаритами до 300 мм и

массой до 15 кг на нормированные СУ по отдельным осям изделия, а также трёхкомпонентный СУ от штатных пиротехнических средств разделения. При этом повторяемость режимов испытаний по экстремальным амплитудам и составляющим СУ – не более 3 дБ.

Для обеспечения испытаний на стенде разработана технология настройки определяющих параметров заданной нагрузки путём конструктивных манипуляций элементов технологической оснастки и подбора нужного импульса за счёт необходимой мощности заряда и объёма камеры сгорания ударного устройства.

При испытаниях на стенде допустимые уровни составляющих СУ на низких частотах до 1000 Гц, должны иметь значения -6 , $+3$ дБ, и на высоких частотах свыше 7000 Гц, значения -3 , $+6$ дБ.

В качестве средств контроля режима испытаний рекомендуется использовать розетку из трёх акселерометров для расчёта СУ вектора и его составляющих. При этом СУ вектора даёт оценку верхней границы значений во всем заданном частотном диапазоне.

Ниже приведены несколько примеров ударных и недостаточно удовлетворительных воспроизведений нагрузочных режимов, характерных для стенда. Там же приведены границы одного из испытательных режимов при допуске ± 3 дБ.

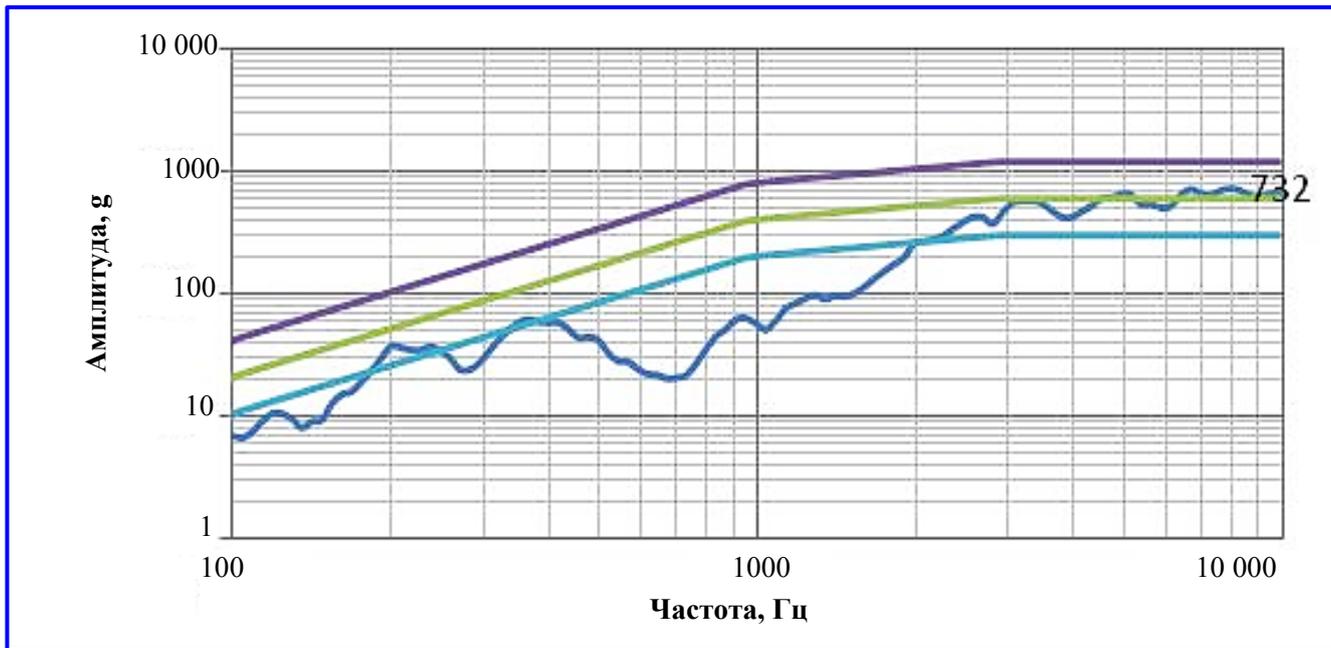


Рис. 8. Спектр удара с недогрузкой в среднечастотном диапазоне 400 ÷ 2000 Гц

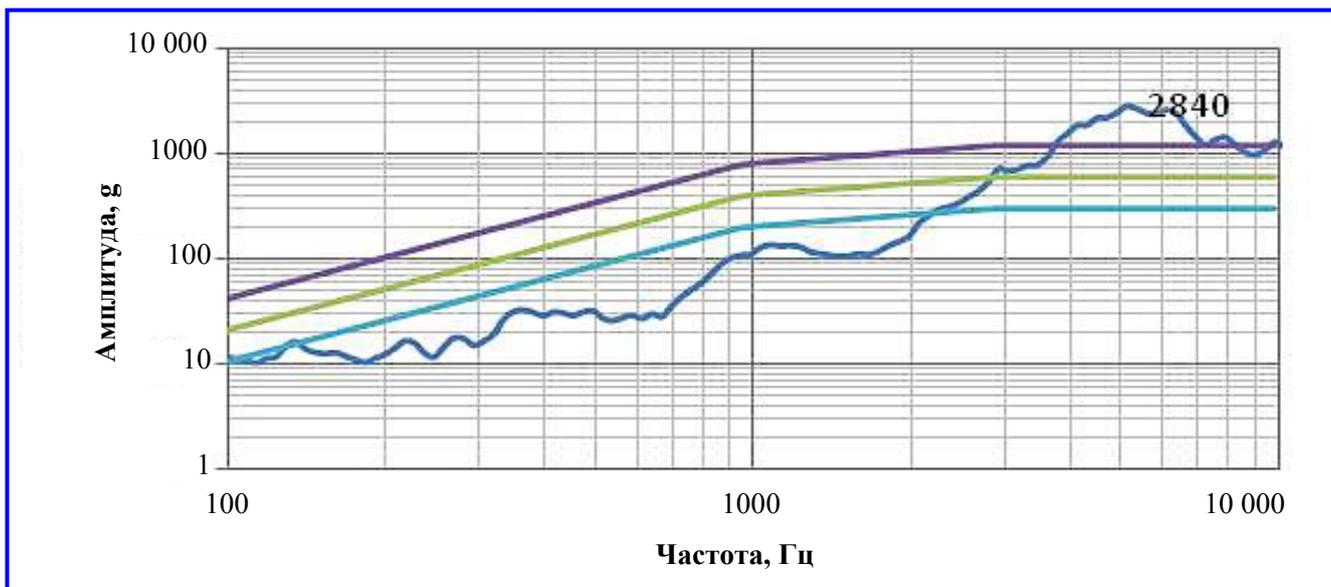


Рис. 9. Спектр удара с недогрузкой в среднечастотном диапазоне 400 ÷ 2000 Гц и перегрузкой на высоких

На рис. 8 приведён спектр удара с недогрузкой в среднечастотном диапазоне 400 ÷ 2000 Гц, но с удачно подобранной нагрузкой в диапазонах 200 ÷ 400 Гц и 2000 ÷ 10 000 Гц.

На рис. 9 приведён спектр удара с недогрузкой в низкочастотном диапазоне 400 ÷ 2000 Гц, и существенной перегрузкой в высокочастотном диапазоне 4000 ÷ 6000 Гц.

На рис. 10, 11 приведены спектры ударов, полученные после коррекции с помощью втулок и изменения конфигурации расположения крепёжных болтов, путём их несимметричной установки, хотя и здесь не

удалось полностью уложиться в допускаемые отклонения от требуемого нормированного нагружения.

В нормах по виброударным нагрузкам от пиротехнических систем разделения допускаются отклонения амплитуд модельных нагрузок за пределы заданных допусков. Однако при этом оговаривается, что эти аномальные области полученного при испытаниях спектра удара не должны превышать 30% заданного частотного диапазона и по амплитуде ±3 дБ от границ. Это связано с тем, что при пиротехническом высокочастотном ударе определяющим параметром

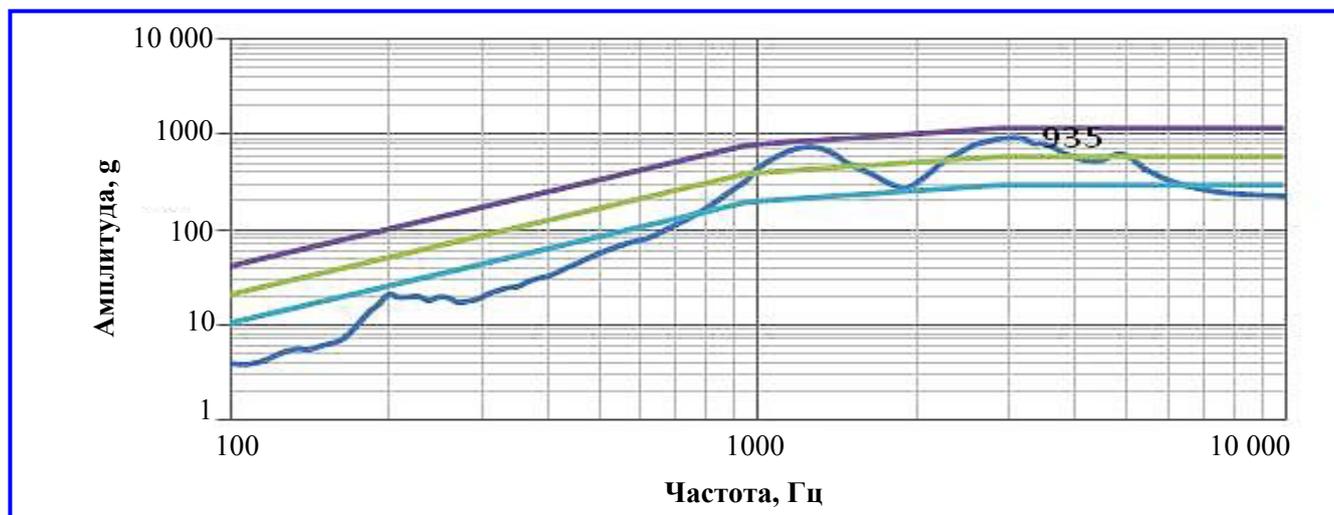


Рис. 10. Спектр удара с небольшой недогрузкой на низких частотах

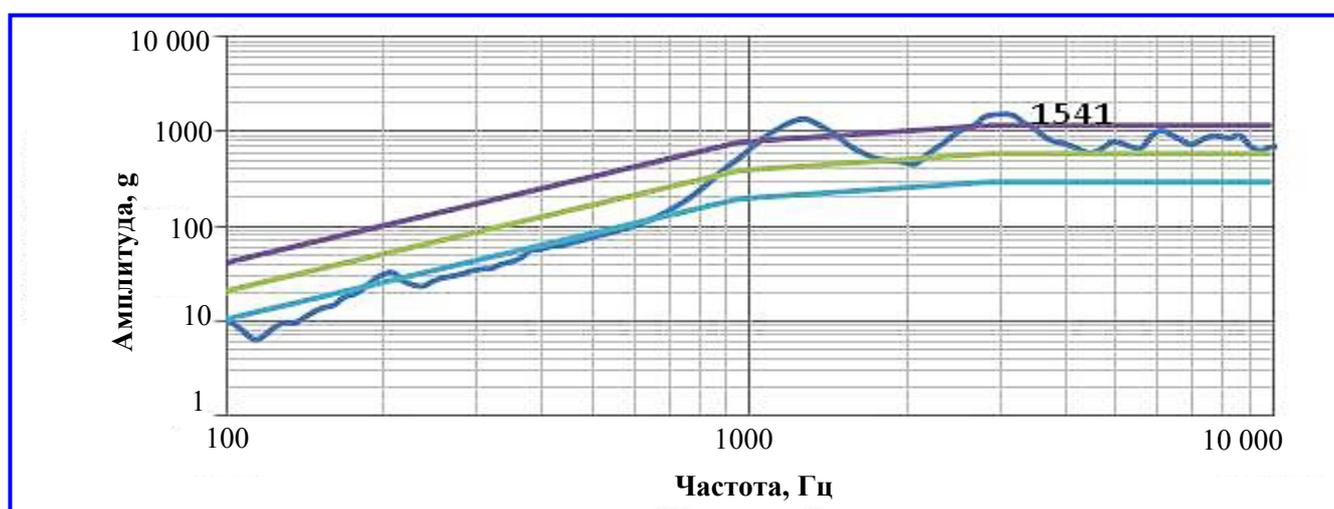


Рис. 11. Спектр удара с небольшой недогрузкой на низких частотах и перегрузкой на средних

нагружения является площадь спектра удара в осях амплитуда – частота, а не составляющие на отдельных частотах. Если учесть соображения, изложенные в разделе «Метрологические аспекты проведения ударных испытаний», для анализа спектра удара следует брать частотный диапазон

от 500 до 10 000 Гц, так как амплитуды в низкочастотной области при амплитудах суммарного временного процесса порядка 1000 g и выше лежат в области погрешности системы измерения ускорений (10 – 12 %) и порог достоверных данных по СУ начинается с амплитуды 200 g.

Поступила в редакцию 24.12.2013

*Александр Олегович Граблин, инженер, т. (495) 366-21-01.
 Борис Иванович Зубренков, канд. техн. наук, зам. главного метролога.
 Михаил Викторович Пустобаев, аспирант, мл. научн. сотрудник,
 e-mail: Mikhail.pustobaev@gmail.com, т. (495) 366-79-52.
 Анатолий Дмитриевич Судомоев, канд. техн. наук, ведущий научн. сотрудник.
 Александр Валентинович Шматков, начальник лаборатории, т. (495) 366-27-56.*