

## К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ НАГРУЗОК НА АППАРАТУРУ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

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

*Рассмотрен набор параметров, характеризующих ударный процесс от срабатывания пиротехнических средств систем разделения КА. К ним относятся как исходные параметры ударного процесса – осциллограмма удара (зависимость амплитуды ускорения от времени), так и результаты обработки исходных данных с применением функций спектра удара, полосовой фильтрации, спектра Фурье. Показано теоретическое и экспериментальное различие указанных параметров, определена рациональная область их применения. Проведён расчёт спектра удара вектора нагрузки на основе данных компонентов по трём осям.*

**Ключевые слова:** ударное воздействие, испытания, расчёт, спектр удара, спектр Фурье, осциллограмма.

Для отделения космического аппарата (КА) от ракеты-носителя (РН) и при развёртывании установленных на нём трансформируемых конструкций широко используются пиротехнические средства разделения (СР) различных мощностей и конструктивных исполнений. Возникающие при их срабатывании механические импульсы имеют характер кратковременных процессов со временем действия до 5 мс и амплитудами в ближней зоне от СР свыше 3000÷5000 g.

В настоящее время нет единого методологического подхода относительно того, какие параметры являются наиболее информативными и физически понятными для проведения расчётов на ударостойкость изделий, а также для оценки самих импульсных ударных нагрузок, действующих на изделия.

Для характеристики ударных процессов используют параметры, получаемые непосредственно при проведении измерений ускорений, а также косвенные расчётные оценки самих процессов по известным алгоритмам.

Открытым остаётся вопрос и о способе обработки измерительной информации, т. е. как интерпретировать результаты измерений для адекватной оценки реакции конструкции на приложенное входное воздействие.

Представляется, что наиболее информативными могут быть следующие подходы для оценок ударных процессов.

**Анализ осциллограмм.** Осциллограммы импульсных нагрузок представляют собой результаты измерений, и несут в себе ограниченную информацию. По осциллограммам можно оценить такие общие характеристики, как длительность, размах,

наличие свободных колебаний после завершения ударного воздействия.

Независимо от того, по какому пути в дальнейшем обрабатывается информация, осциллограммы остаются тем первичным материалом, на базе которого и производятся следующие процедуры.

**Использование ударного спектра.** Для инженерного анализа ударных перегрузок, действующих на навесное оборудование КА, используют ударные спектры или спектры удара (СУ), представляющие зависимость максимальных абсолютных ускорений или относительных перемещений осциллятора с различными частотами собственных колебаний. СУ является характеристикой переходного вибрационного процесса, позволяющей нормировать режимы испытаний оборудования, сравнивать различные виды ударно-импульсных воздействий, заменять при испытаниях штатные воздействия другими, эквивалентными и технически реализуемыми в лабораторных условиях.

Согласно ГОСТ Р 53190-2008, СУ имеет следующее определение: «Ударный спектр (SRS) – это график зависимости максимального отклонения (перемещения, скорости, ускорения) на заданное входное воздействие ансамбля осцилляторов с заданным значением добротности от собственных частот колебаний этих осцилляторов без учёта демпфирования».

При анализе нагрузок, действующих на КА, предполагается, что входное воздействие выражается в виде ускорений в единицах g, а демпфирование – с добротностью равной 10. Кроме этого, осцилляторы полагаются независимыми, а сами отклонения при расчёте СУ анализируются, как правило, в

абсолютных величинах. Таким образом, СУ не является измеряемой величиной, а расчётным параметром с условно взятыми импульсными переходными функциями (ИПФ) с определённой добротностью.

Процедура расчёта СУ состоит в следующем.

Пусть измеренный входной ударный импульс будет  $x(t)$ . Тогда, при его воздействии на осциллятор с собственной частотой  $f_i$  (без учёта демпфирования) сигнал на выходе  $y_i$  будет равен:

$$y_i(t) = \int_0^t h_i(t - \tau)x(\tau)d\tau.$$

Здесь  $h_i(t)$  – ИПФ для осциллятора с  $f_i$ .

Затем определяется модуль максимума  $y_i(t)$ , который является составляющей СУ на частоте  $f_i$ :

$$СУ(f_i) = \max | \int_0^T h_i(t - \tau)x(\tau)d\tau |.$$

В связи со спецификой расчёта СУ обратное преобразование, т. е. переход от него к временному фрагменту, по которому производился расчёт СУ, невозможно из-за потери фазовой информации.

К свойствам СУ также можно отнести нелинейность подобного преобразования, т. е. СУ суммы сигналов не является суммой СУ этих сигналов.

Следует также отметить, что алгоритмы расчёта СУ могут быть разными в зависимости от схемы возбуждения осциллятора (ГОСТ Р 53190-2008).

**Фильтрация сигнала.** Фильтрация сигналов используется для выделения составляющих в заданном диапазоне частот, подавления помех и выделения узкополосных процессов. Расчёт уровней в полосах фактически построен на результатах обработки сигнала гребёнкой полосовых фильтров.

Импульс также может быть охарактеризован среднеквадратичными значениями его составляющих в частотных полосах при полосовой фильтрации.

Пусть  $x(t)$  есть измеряемый импульс, тогда в полосе с центральной частотой  $f_0$  и ИПФ фильтра  $h_1(t)$  на его выходе будем иметь следующее значение:

$$\hat{y}(f_0, T) = [\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t, f_0)dt]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $y(t, f_0) = \int_0^t h_1(t - \tau)d\tau$ ;  $T$  – время осреднения при фильтрации.

Результат представления сигнала  $x(t)$  даётся в виде среднеквадратичных значений составляющих в выбранном диапазоне частот.

Такой спектр также не может быть использован для обратного преобразования – получения временной реализации.

Как можно видеть из соотношения (1), величины составляющих зависят от времени осреднения  $T$ , которое выбирается исходя из частотной характеристики процесса.

**Спектральный анализ импульса.** Для кратковременных переходных процессов наиболее полной характеристикой является нестационарный спектр мощности (НСМ), который представляет распределение дисперсии сигнала в частотной и во временной областях.

Для расчёта НСМ используют как полосовую фильтрацию, так и на перекрывающихся коротких временных интервалах преобразование Фурье.

Импульсный сигнал может быть представлен в виде спектрального разложения по ортогональным функциям. Преимуществом такого описания является его обратное преобразование, а также его энергетическая характеристика.

Наибольшее распространение в анализе временных процессов нашло преобразование Фурье (СФ), использующее в качестве ортогональных функций синус и косинус.

Представление процесса в таком виде хорошо отображает его физические свойства и распределение энергии по частотам.

Для физически осуществимых сигналов, описываемых функцией  $x(t)$ , можно найти их частотный спектр по соотношению:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt. \quad (2)$$

Здесь  $f$  – текущая частота;  $j$  – мнимая единица;  $X(f)$  – спектральная плотность процесса  $x(t)$ , которая может быть преобразована в ряд удобных для расчётов спектров: мощности, спектральной плотности, среднеквадратичного спектра и т. п.

Спектральный анализ Фурье позволяет производить и обратное преобразование:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df. \quad (3)$$

Пара преобразований (2) и (3) связана энергетически:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df,$$

что является следствием теоремы Парсеваля.

Несомненным достоинством такой спектральной оценки является информация о том, какие ча-

стотные диапазоны определяют мощность сигнала. Анализ спектров позволяет более точно, чем при СУ рассмотреть физическую сущность протекающего процесса, связать его с реальными характеристиками испытуемой конструкции, оценить демпфирование и собственные частоты.

Обычно СФ представляют энергетически в виде спектральных плотностей мощности, либо в виде среднеквадратичных автоспектров, которые по своей физической сущности являются фильтрацией в полосе.

Анализ полного импульса зачастую малопродуктивен, так как осреднение идёт по всему выбранному времени. Более продуктивным представляется анализ отдельных временных фрагментов процесса.

Спектральное преобразование Фурье импульсных сигналов, по мнению авторов, не является лучшим способом их анализа. Для этой цели могут быть использованы разложения на базе других ортогональных функций.

Одно из таких разложений затухающего переходного процесса было предпринято на базе полиномов Лаггера [1]. Целью такого анализа было определение дискретных составляющих Лаггер-спектров функции  $x(\tau)$ :

$$C_n = \int_0^{\infty} x(\tau) l_n(\tau) d\tau,$$

где  $C_n$  – составляющая спектра  $n$ -го порядка,  $l_n(\tau)$  – полином Лаггера  $n$ -го порядка, затухающий с ростом  $\tau$ .

Возможно и обратное преобразование:

$$x(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n l_n(\tau).$$

Хотя такого рода разложение для описания затухающих процессов производится довольно редко, оно нашло своё применение в области акустической диагностики механизмов [1].

Представляется, что такой подход к анализу импульсных сигналов может найти практическое применение, наряду с другими видами анализа.

### Выбор нормирующего параметра при расчёте СУ

При анализе импульсных сигналов необходимо учитывать особенности используемых средств измерения.

В связи с большими величинами импульсных воздействий при срабатывании пиротехнических устройств и анализируемым диапазоном частот при измерениях используют однокомпонентные датчики-



Рис. 1. Розетка акселерометров

акселерометры, скомпонованные в розетку. Эта розетка – металлический кубик, на котором с помощью резьбовых шпилек закрепляются акселерометры, с трёхкомпонентной ориентацией главных осей чувствительности. Сама розетка крепится к измеряемой поверхности шпилькой (рис. 1).

Таким образом, в осях розетки акселерометров измеряются составляющие вектора нагрузки, действующие на розетку.

Остаётся открытым вопрос выбора параметров для расчёта СУ: использовать данные сигналов по каждому направлению или же значение вектора.

Расчёт модуля нагрузки можно производить исходя из анализа движения осциллятора.

Пусть осциллятор единичной массы движется под действием произвольно направленного воздействия. Уравнение движения можно записать в проекциях на оси  $x, y, z$  розетки датчиков в виде:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2n_k \cdot \dot{x} + \omega_k^2 \cdot x &= -a_x, \\ \ddot{y} + 2n_k \cdot \dot{y} + \omega_k^2 \cdot y &= -a_y, \\ \ddot{z} + 2n_k \cdot \dot{z} + \omega_k^2 \cdot z &= -a_z, \end{aligned}$$

где  $k=1, 2, \dots, m$  – порядок осциллятора с  $n_k = \frac{\omega_k}{Q}$ ;

$\omega_k$  – циклическая собственная частота  $k$ -го осциллятора,  $Q$  – добротность,  $a_x, a_y, a_z$  – результаты измерений ударных воздействий по осям  $X, Y, Z$  в исследуемой точке.

Для каждого фиксированного момента времени и частоты осциллятора  $\omega_k$ , рассчитывается текущее значение модуля вектора по уравнению (4):

$$|\bar{s}(t)| = \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t) + \dot{z}^2(t)}. \quad (4)$$

Далее определяется максимум модуля вектора и строится СУ вектора и его компонентов.

Для обработки массива данных измерений можно получить решение уравнения в виде рекуррентных формул при помощи аппроксимации дискретизированного ударного процесса сплайн-функцией. Наиболее удобной формой аппроксимации будут полиномы второго порядка:

$$c_{1x} = \frac{\widetilde{a}_x(2h) + c_{3x} - 2\widetilde{a}_x(h)}{2h^2},$$

$$c_{2x} = \frac{4\widetilde{a}_x(h) - 3c_{3x} - \widetilde{a}_x(2h)}{2h}.$$

$$\widetilde{a}_x = c_{1x} \cdot t^2 + c_{2x} \cdot t + c_{3x},$$

$$\widetilde{a}_y = c_{1y} \cdot t^2 + c_{2y} \cdot t + c_{3y},$$

$$\widetilde{a}_z = c_{1z} \cdot t^2 + c_{2z} \cdot t + c_{3z}.$$

Коэффициенты полиномов для каждого момента времени  $t$  определяются по трём значениям. Так, для компоненты  $x$  это  $\widetilde{a}_x(t)$ ,  $\widetilde{a}_x(t+h)$ ,  $\widetilde{a}_x(t+2h)$ , где  $h$  – шаг дискретизации осциллограммы.

$$c_{3x} = \widetilde{a}_x(t).$$

Аналогично вычисляются коэффициенты и для остальных координат.

Таким образом, для каждого момента времени  $t$  определяются коэффициенты  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ , а затем рассчитываются по соотношениям (4) значения  $\ddot{x}(t)$ ,  $\ddot{y}(t)$ ,  $\ddot{z}(t)$  и их модули.

Наряду с численным интегрированием системы уравнений расчёты можно производить на базе рекуррентных соотношений:

$$x_{j+1} = (D_{1x} \cos \omega_1 h + D_{2x} \sin \omega_1 h) e^{-nh} + I_{1x} h^2 + I_{2x} h + I_{3x},$$

где 
$$I_{1x} = \frac{c_{1x}}{\omega^2}, \quad I_{2x} = \frac{1}{\omega^2} \left( C_{2x} - \frac{4nC_{1x}}{\omega^2} \right),$$

$$I_{3x} = \frac{1}{\omega^2} \left[ C_{3x} - \frac{2C_{1x}}{\omega^2} - \frac{2n}{\omega^2} \left( C_{2x} - \frac{2nC_{1x}}{\omega^2} \right) \right], \quad (5)$$

$$D_{1x} = x_j - I_{1x}, \quad D_{2x} = \frac{1}{\omega} (x_j + nD_{1x} - I_{2x});$$

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_k^2 - n^2}, \quad n = \omega\pi\delta/2.$$

При малом демпфировании  $\delta \leq 0,5$  с точностью до 0,5 %  $\omega_1 \approx \omega_k$ .

Аналогичные (5) соотношения применяются и для компонент  $Y, Z$ .

Из решения (5) определяется зависимость экстремальных амплитуд модуля вектора от частоты осциллятора  $\omega_k$ . Для расчёта СУ скорости и ускорения экстремальные амплитуды СУ розетки акселерометров по перемещениям умножаются на коэффициенты  $\omega_k$  и  $\omega_k^2$  соответственно. Следует отметить, что спектр удара вектора ускорений является огибающей СУ его компонентов, что удобно при оценке верхней границы ударной нагрузки. Таким образом, при обработке розетки акселерометров целесообразно проводить полный анализ СУ модуля вектора и его составляющих.

**Экспериментальные результаты.** Рассмотрим несколько конкретных примеров анализа.

На рис 2, 3 представлены осциллограммы, СУ и СФ реальных импульсов, являющихся следствием подрыва пиросредств при испытании приборов. Проанализируем полученные результаты.

Прежде всего, стоит отметить совпадение пиковых уровней СУ и СФ на частотах 1000, 2000 и 9500 Гц. В то же время пиковые уровни 2500 и 4600 Гц в СУ не проявляются. Можно также видеть, что отношение уровней СУ и СФ на частоте 6200 Гц почти вдвое отличаются при различных испытаниях.

Таким образом, можно констатировать, что связь между соответствующими СУ и СФ носит только качественный характер – можно наблюдать совпадение положения пиковых уровней только по частоте, ибо оба вида спектров характеризуют различные свойства системы: СУ – кинематику, СФ – энергию.

На рис. 4 представлены результаты измерения СУ по трём ортогональным осям и по вектору. Можно видеть, что в некоторых частотных диапазонах СУ вектора определяется разными компонентами. В низкочастотной области – до 1000 Гц определяющей составляющей является СУ по  $X$ , а в более высокочастотной области по оси  $n$  (нормаль к поверхности отсека). При этом СУ вектора совпадает в своём наибольшем значении с СУ по оси  $n$ . Для ударного нагружения использовался стендовый пиродарник, патрон Д4, упруго-пластический демпфер-шайба из АМГ6 толщиной 10 мм.

**Выводы.** Проведённый анализ способов оценок ударных нагрузок показывает, что каждый из них имеет свои достоинства и недостатки.

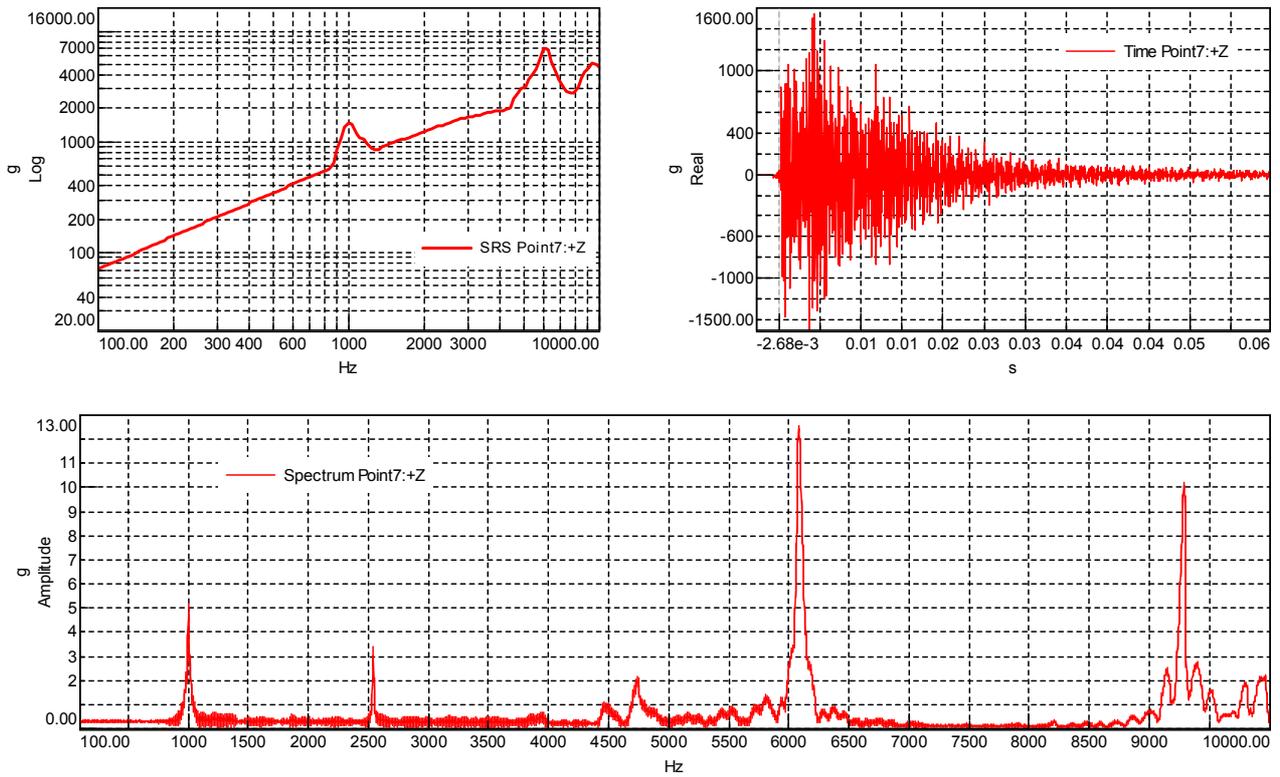


Рис. 2. Воздействие по оси Z, патрон Д1

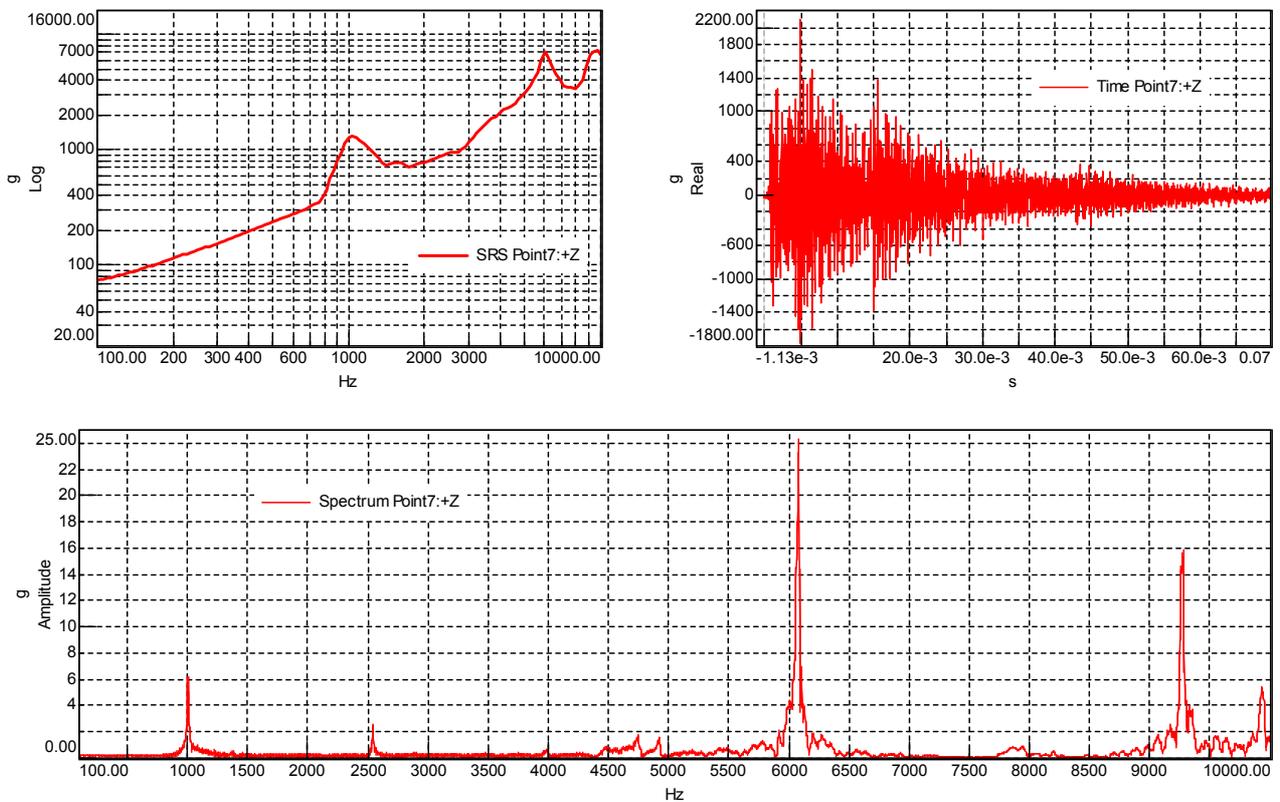


Рис. 3. Воздействие по оси Z, патрон Д2

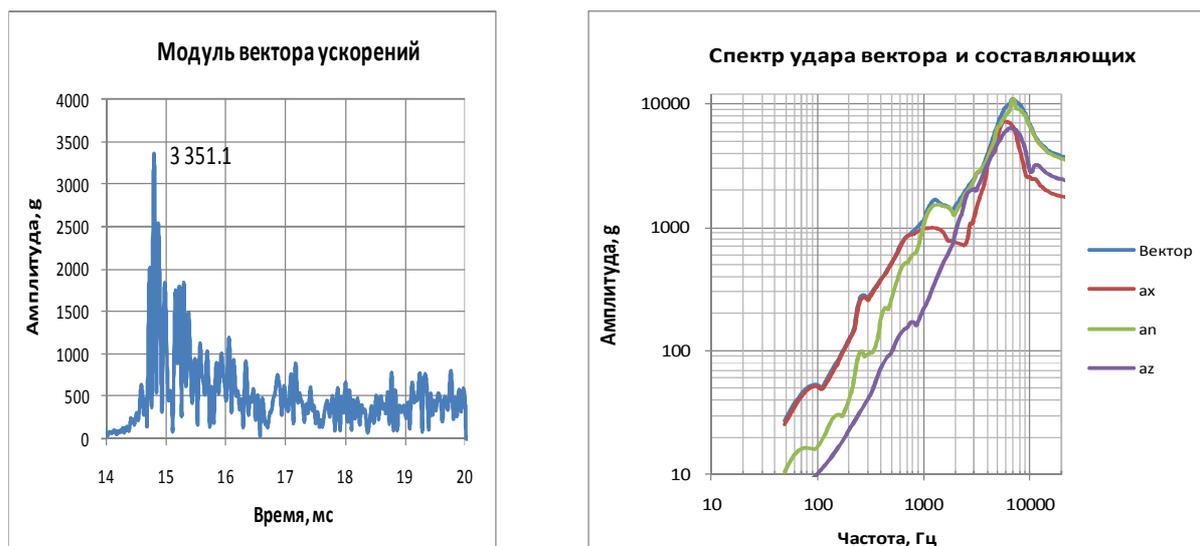


Рис. 4. Нагружение по оси X переходного отсека модели бака

Оценка по СУ является косвенной характеристикой, основанной на действии реального процесса на колебательную систему, далёкую по своим свойствам от реальной конструкции. Большое демпфирование таких моделей не позволяет оценить воздействия на низких частотах. СУ оценивает не энергетическую, а кинематическую сущность измеряемого сигнала, его максимальное перемещение, скорость и ускорение.

Оценка по СФ или с помощью фильтрации сигнала характеризует распределение колебательной энергии по всему диапазону частот, выделяя резонансные области, и является прямой оценкой интенсивности процесса. Однако она связана с временными параметрами, характеризующими ударную нагрузку – длительность временного интерва-

ла, в котором производится оценка, что затрудняет сравнение различных ударных нагрузок.

Количественной связи между СУ и СФ нет – так как они отражают различную природу оценок процесса.

Расчёт вектора СУ имеет смысл для получения верхней оценки СУ составляющих (модуль вектора всегда больше значений составляющих).

Следует отметить, что эти способы оценок не являются альтернативными, а лишь дополняют друг друга, позволяя сформулировать более обоснованные требования к конструкциям по ударостойкости.

#### Литература

1. Арботолевский И. И., Бобровицкий Ю. И., Генкин М. Д. Введение в акустическую динамику машин / И. И. Арботолевский и др. – М.: Наука, 1979.

Поступила в редакцию 10.09.2014

*Александр Олегович Граблин, инженер.  
Борис Иванович Зубренков, канд. техн. наук, вед. научн. сотрудник.  
Михаил Викторович Пустобаев, аспирант, мл. научн. сотрудник.  
Анатолий Дмитриевич Судомоев, канд. техн. наук, вед. научн. сотрудник.  
Александр Валентинович Шматков, начальник лаборатории,  
т. (495) 366-79-52,  
e-mail: mikhail.pustobaev@gmail.com.*