

УДК 621.039:004.942:006.354

ФОРМИРОВАНИЕ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПО ЗАДАНЫМ СПЕКТРАМ ОТВЕТА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ

Е.А. Канунникова, Н.А. Красова, И.А. Мещихин
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Рассмотрено развитие методов стендовых испытаний оборудования и аппаратуры для подтверждения стойкости к воздействию ударных нагрузок. Подробно рассмотрены вопросы формирования, реализации и контроля режимов испытаний в виде ударных импульсов, соответствующих заданному спектру ответа.

Ключевые слова: ударные импульсы, стендовые испытания, стойкость аппаратуры к воздействию ударных нагрузок, формирование режимов испытаний.

При разработке и эксплуатации оборудования, особенно электронной аппаратуры, возникает задача обеспечения её функционирования при действии механических нагрузок, в том числе ударных. В зависимости от области применения и, соответственно, от условий эксплуатации, эти нагрузки обусловлены различными внешними воздействиями.

Так для аппаратуры космического назначения ударные воздействия возникают при разделении ступеней ракеты-носителя, при отделении аппарата, а также при раскрытии механических систем, например, солнечных батарей. Ударные нагрузки на судовое оборудование обусловлены разнообразными причинами от столкновения судов до действия взрыва [1]. Для электрооборудования АЭС, которое должно безопасно функционировать при внешних экстремальных воздействиях, помимо сейсмических воздействий, в последние годы стали также предъявляться требования по стойкости к воздействиям от воздушно-ударной волны (ВУВ) и удара самолёта (УС) [2].

Несмотря на различие условий эксплуатации, источников внешних воздействий и требований к конкретному оборудованию, процедура подтверждения этих требований имеет много общего. В частности:

- все перечисленные требования задаются, как правило, в виде ударных спектров (спектров ответа), которые являются результатом расчётов конструкции, на которой установлено оборудование – космического аппарата, судна, здания АЭС;

- стойкость оборудования и аппаратуры подтверждается стендовыми испытаниями.

В связи с этим возникает задача преобразования заданного спектра ответа в испытательное воздействие и реализация его на конкретном испытательном оборудовании.

Одним из самых распространённых видов испытаний является воздействие полусинусоидальными импульсами, для которых обычно задаются

амплитуда и длительность. Однако при выборе необходимых импульсных воздействий, удовлетворяющих заданному ударному спектру, возникает ряд задач как теоретического, так и практического плана, решению которых посвящена данная статья.

В статье рассмотрена процедура вычисления спектра ответа, в том числе сравнение аналитического и численного решений для полусинусоидального импульса, а также влияние различных факторов на реализацию ударного импульса на вибростенде. Практические аспекты рассмотрены применительно к испытательному оборудованию предприятия.

Вычисление спектра ответа

В основе анализа ударных процессов лежит процедура вычисления спектра ответа для произвольной зависимости ускорения от времени.

Спектр ответа [3] характеризует максимальный отклик одномассовой колебательной системы (осциллятора) при ударном воздействии, определённом в зависимости от собственной частоты ω и значений демпфирования осциллятора.

Для произвольного воздействия спектр ответа определяется численным интегрированием уравнения колебаний осциллятора на каждой частоте с заданным параметром демпфирования.

Уравнение колебаний осциллятора имеет вид

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2x = -a(t), \quad (1)$$

где x – относительное перемещение; ζ – коэффициент демпфирования (относительно критического); ω – частота осциллятора; $a(t)$ – зависимость ускорения от времени на основании.

При нулевых начальных условиях решение (1) может быть представлено интегралом Дюамеля:

$$x(t) = -\frac{1}{\beta_0} \int_0^t e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin\beta(t-\tau)a(\tau)d\tau, \quad (2)$$

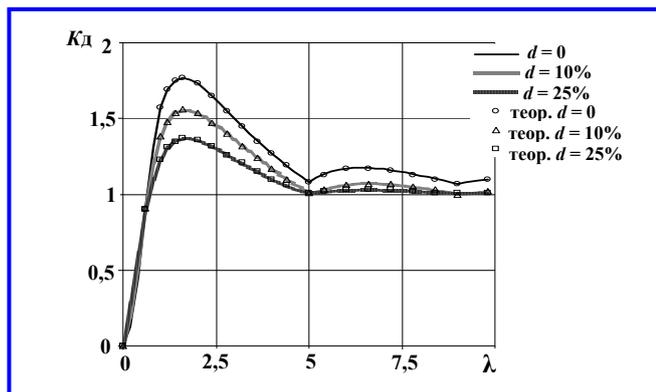


Рис. 1. Спектр ответа для полусинусоидального импульса в безразмерных осях

где $\beta^2 = \omega^2(1 - \zeta^2)$; τ – переменная интегрирования.

С учётом ненулевых начальных условий x_0, \dot{x}_0 решение (2) имеет вид

$$x(t) = x_0 e^{-\zeta\omega t} \cos \beta t + \frac{\zeta\omega x_0 + \dot{x}_0}{\beta} e^{-\zeta\omega t} \sin \beta t - \frac{1}{\beta} \int_0^t e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin \beta(t-\tau) a(\tau) d\tau. \quad (3)$$

Относительную скорость осциллятора можно получить продифференцировав выражение (3).

При известных значениях x, \dot{x} относительное ускорение легко получить из (1):

$$\ddot{x} = -a - \omega^2 x - 2\zeta\omega \dot{x}. \quad (4)$$

Абсолютное ускорение вычисляется как сумма относительного ускорения и ускорения основания:

$$\ddot{x}_a = \ddot{x} + a.$$

Таким образом, задача определения спектров ответа сводится к пошаговому выполнению вычислений (1), (4) и определению максимального значения \ddot{x}_a . Увеличение точности достигается использованием квадратичной интерполяции исходной функции $a(t)$, что позволяет формализовать процедуру вычисления интеграла (3). При этом численное интегрирование дифференциальных уравнений заменяется алгебраическими операциями и позволяет проводить вычисления с заданной точностью.

Спектры ответа строятся для различных значений демпфирования и представляют собой семейство кривых, как показано на рис. 1.

Заметим, что для некоторых функций могут быть получены аналитические зависимости для

спектра ответа, которые удобно использовать для проверки правильности численных методов.

На рис. 1 приведены аналитическое решение из [4] и соответствующие результаты численного расчёта по формулам (3), (4) спектров ответа для полусинусоидального импульса для трёх значений демпфирования – 0, 10 и 25 %, построенные в безразмерных осях – зависимость коэффициента динамичности K_d от частоты осциллятора λ , отнесённой к частоте импульса. Маркерами показаны численные решения, сплошными линиями – аналитические решения. В масштабе рисунка расчётные и аналитические кривые совпадают.

Формирование режимов испытаний в виде импульса

В математическом смысле задача формирования режима испытаний сводится к нахождению функции, зависящей от времени, имеющей требуемый спектр ответа. Разумеется, эта зависимость должна быть реализуема на применяемом испытательном оборудовании.

Из определения спектра ответа следует, что построение временной функции, соответствующей заданному спектру ответа, не является однозначной задачей, так как может быть построено бесконечное множество временных зависимостей (различных по виду, пиковым значениям, продолжительности), имеющих одинаковый спектр ответа. Однако для известного вида функции, описывающей воздействие, это решаемая задача. В работе [5] было рассмотрено формирование воздействий в виде гармонических колебаний с плавно меняющейся частотой, имитирующих сейсмические воздействия.

Воздействия от ударной волны и падения самолёта являются существенно более кратковременными и высокочастотными и при испытаниях их целесообразно имитировать кратковременными ударами, например, полусинусоидальными импульсами.

При этом параметры испытательного импульса подбираются в соответствии с зависимостью, показанной на рис. 2, так, чтобы соответствующий ему спектр ответа охватывал заданный спектр ответа. В случае, если спектр ответа одиночного импульса не полностью перекрывает заданный, выбираются дополнительные импульсы другой длительности и амплитуды так, чтобы огибающая спектров всех выполненных ударов перекрывала заданный спектр, как показано на рис. 3. Здесь пунктиром показаны спектры ответа от трёх импульсов разной длительности и сплошной красной их огибающая, которая охватывает требуемый спектр (черная линия). Как видно из рис. 3, применение нескольких импульсов

позволяет расширить область максимальных значений спектра, однако не даёт возможности получить спектр произвольного вида.

Реализация ударного импульса на испытательном оборудовании

Следует отметить, что входной сигнал, фактически реализуемый вибростендом, представляет собой довольно сложную функцию, содержащую основной импульс, параметры которой позволяют обеспечить требуемый уровень нагрузки на изделия с одной стороны и корректную работу вибростенда с другой. В связи с этим зависимость на рис. 3 можно использовать только в качестве первого приближения для определения длительности и амплитуды импульсов, а более точный расчёт спектра ответа провести с учётом фактической формы испытательного воздействия. Результаты этого расчёта сравниваются с требуемым спектром ответа, определяются масштабные коэффициенты, и корректируются параметры импульсов. Указанная процедура повторяется некоторое количество раз до достижения заданной степени точности по принципу минимума среднеквадратичных отклонений.

Рассмотрим испытательный сигнал (эталонный импульс), который формируется с использованием программного обеспечения системы управления вибростендом – в нашем случае программа LMS «Test Lab».

Эталонный импульс состоит из основного импульса, который определяется пиковым уровнем воздействия, а также предварительного и последующего импульса, которые обеспечивают в начале и в конце основного воздействия значения смещения и скорости равные нулю и, кроме того, выставляют вибратор в его исходное положение.

Форма дополнительных импульсов может быть различна и описывается в [6] как тип компенсации импульса. Из имеющихся в [6] вариантов нами был выбран «оптимизированный» тип компенсации, позволяющий максимально использовать имеющийся ход вибростенда для реализации максимального ускорения.

В этом случае предварительный и последующий импульсы описываются следующими зависимостями:

– для предварительного импульса

$$R A_1 (1,55 \sin(2\pi f_1 t) + 0,231 \sin(6\pi f_1 t)), \text{ если } \frac{1}{2f_1} < t < \frac{1}{f_1}; \quad (5)$$

$$A_1 (1,55 \sin(2\pi f_1 t) + 0,231 \sin(6\pi f_1 t)), \text{ если } 0 < t < \frac{1}{2f_1}; \quad (6)$$

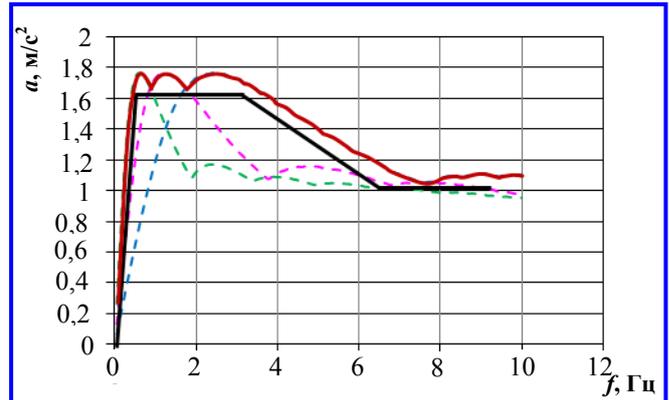


Рис. 2. Спектры ответа набора из трёх импульсов

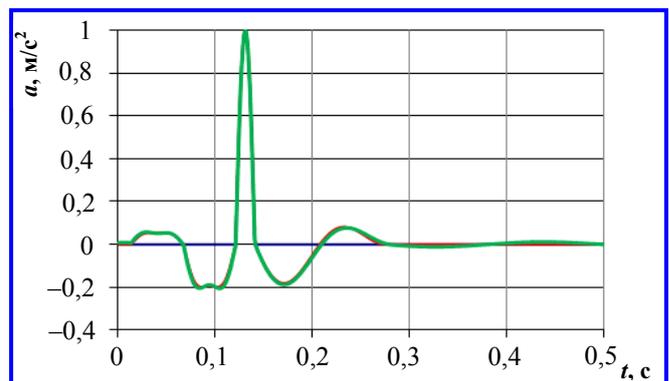


Рис. 3. Синтезированный испытательный импульс – красный, зеленый – эталонный испытательный импульс

– для последующего импульса

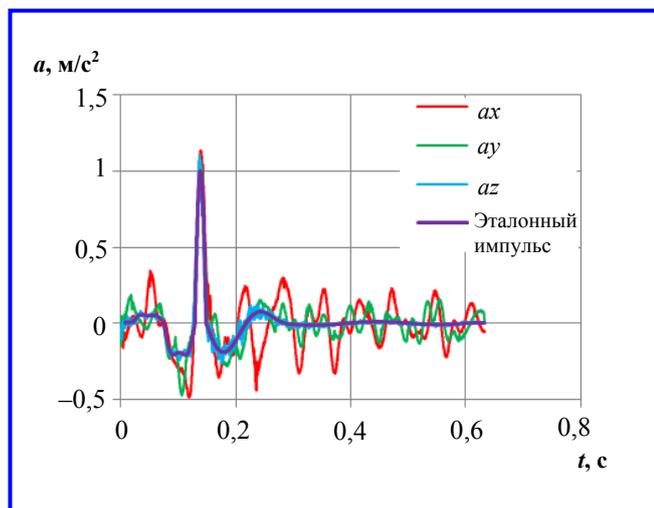
$$A_3 \left(\frac{1}{f_3} - t\right)^y \sin\left(2\pi f_3 \left(\frac{1}{f_3} - t\right)\right), \text{ если } 0 < t < \frac{1}{2f_3}. \quad (7)$$

Построим такую функцию для основного эталонного оптимизированного импульса с единичной амплитудой. Зададим значения параметров, входящих в выражения (5) – (7), отнесённых к амплитуде A_0 и частоте f_0 основного импульса: A_1/A_0 – относительная амплитуда предварительного импульса – 4%; A_3/A_0 – относительная амплитуда последующего импульса – 18%; f_1/f_0 – относительная частота предварительного импульса – 15,7%; f_3/f_0 – относительная частота последующего импульса – 12,6%; R – отношение между амплитудами в первой и второй половинах периода предварительного импульса – 3,7; y – показатель степени, характеризующий отношение в первой и второй половинах периода последующего импульса – 0,8.

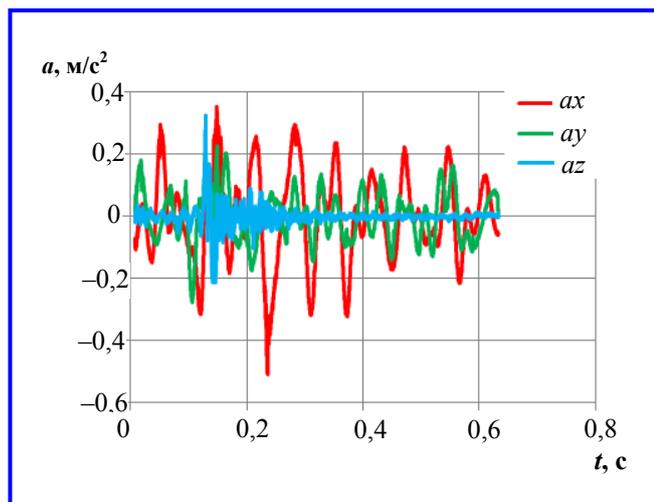
Синтезированная по формулам (5) – (7) функция с амплитудой основного импульса равной 1 м/с² показана на рис. 3. Там же для сравнения показана функция, программно синтезированная LMS. Видно, что



Рис. 4. Спектры ответа в безразмерных осях: синий – основного импульса, красный и зеленый – эталонного испытательного импульса



a



б

Рис. 5. Реализации ударного импульса в различных направлениях: *a* – полный отклик; *б* – отклонение от эталонного импульса

синтезированные функции (красная и зеленая кривые) совпадают.

Сравнение спектров ответа испытательного импульса от чистой полусинусоиды (рис. 4), приведённых к безразмерному виду аналогично рис. 1, показывает, что спектр ответа испытательного импульса лежит ниже спектра полусинусоиды в области начальных частот $ff_0 < 0,3$, однако в остальной частотной области он достаточно близко повторяет спектр основного импульса. В связи с этим с учётом квалификационных запасов при испытаниях, такое изменение формы спектра является незначительным.

При формировании режима испытаний необходимо также учитывать, что его конкретная реализация является случайным процессом, зависящим от динамических характеристик испытательного оборудования и испытуемого изделия, и будет отличаться от эталонного импульса. Величины допустимых отклонений задаются при испытаниях и обычно составляют ± 3 дБ.

Зависимость реализации режима от динамических характеристик проиллюстрирована на рис. 5, *a*, где показаны графики замеренных ускорений на вибростенде при испытаниях одного изделия в трёх различных направлениях, разделённые на амплитуду основного импульса. Графики отклонения от эталонного сигнала представлены на рис. 5, *б*. На рис. 5, *a*, *б* видно, что основная полусинусоида имеет достаточно близкую форму во всех трёх случаях (максимальное отклонение на пике $\sim 5\%$), а отклонение фактических реализаций вне основного импульса не превышает 0,5 – 50 % от амплитуды.

Для оценки частотного состава этих отклонений построим спектр Фурье (рис. 6). Анализ этого спектра показывает, что максимальные отклонения возникают на низших собственных частотах конструкции в каждом из направлений и зависят от их близости к частоте импульса.

Как уже говорилось, требования к ударным испытаниям часто задаются ударным спектром, поэтому представляет интерес влияние на него выявленных отклонений. На рис. 7, *a* показаны ударные спектры измеренных воздействий, а на рис. 7, *б* – отклонения в долях от эталонного. Видно, что значительные искажения возникают также на низших собственных частотах конструкции и достигают 50% (выше, чем отклонения самого режима), однако при условии достаточно сильной отстранённости основной частоты от характерных частот конструкции (например, как для оси Z на рис. 7, *a*), его наличие не сказывается существенно на значимой части ударного спектра.

Хотя опыт показывает, что испытательный спектр обычно превышает заданный, возможны и провалы на отдельных частотах, что следует предусмотреть при задании режима, так как в противном случае испытательный спектр не во всём диапазоне охватывает заданный и возникают дополнительные трудности при подтверждении заданных требований.

Выводы

1. Продемонстрировано совпадение результатов для аналитического решения и численного расчёта спектров ответа для полусинусоидального импульса, что подтверждает применимость численного решения для произвольного воздействия.

2. Анализ спектра ответа применяемого испытательного импульса с учётом пре- и постимпульсов показал, что он достаточно близко повторяет спектр основного импульса (чистой полусинусоиды). В связи с этим с учётом квалификационных запасов при испытаниях для его оценки может использоваться та же аналитическая зависимость.

3. Выявлено, что при реализации режима на вибростенде максимальное отклонение на пике импульса составляет примерно 5% для различных реализаций, а отклонение вне основного импульса может достигать 50% от амплитуды в зависимости от динамических характеристик объекта испытаний. Отклонения же ударного спектра для отдельных реализаций могут достигать 50% даже в области максимальных ускорений (основной области спектра).

4. Таким образом, основные отклонения режима испытаний от заданных требований связаны с соотношением частот конструкции и характерной частоты импульса, поэтому при недостаточной взаимной удалённости этих частот следует на этапе формирования режима предусмотреть дополнительный коэффициент запаса (примерно 1,5), чтобы избежать провалов в ударном спектре.

5. Полученные данные позволят до проведения ударных испытаний оборудования на этапе формирования режимов прогнозировать возникновение погрешностей при их реализации на испытательном оборудовании предприятия и применить необходимые коэффициенты запаса с тем, чтобы обеспечить безусловное выполнение заданных требований.

Литература

1. Динамическая прочность судового оборудования / С. Ф. Абрамович, Ю. С. Крючков. – Л : Судостроение. – 1967. – 511 с.
 2. Экстремальные воздействия на сооружения / А. Н. Бирбрайер, А. Ю. Роледер. – СПб. : Издательство политехнического университета, 2009. – 594 с.

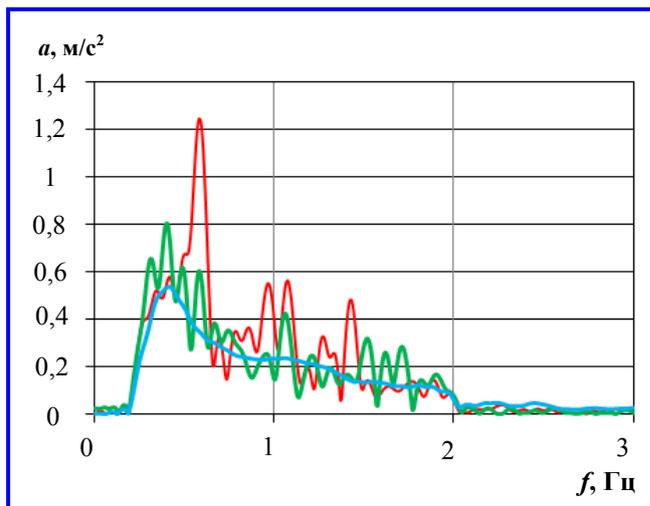
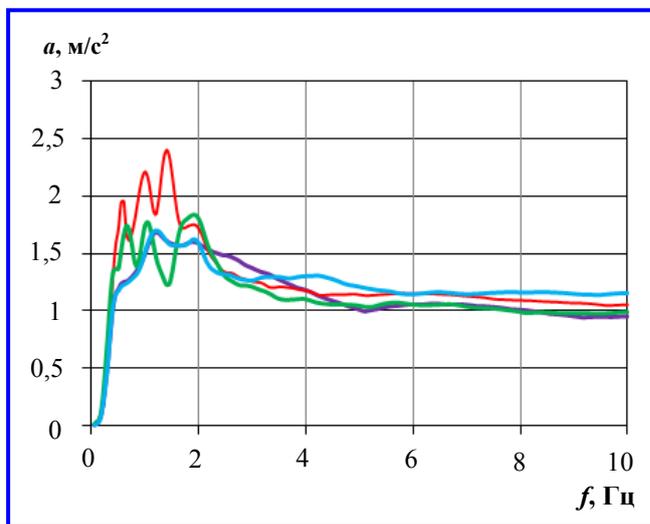
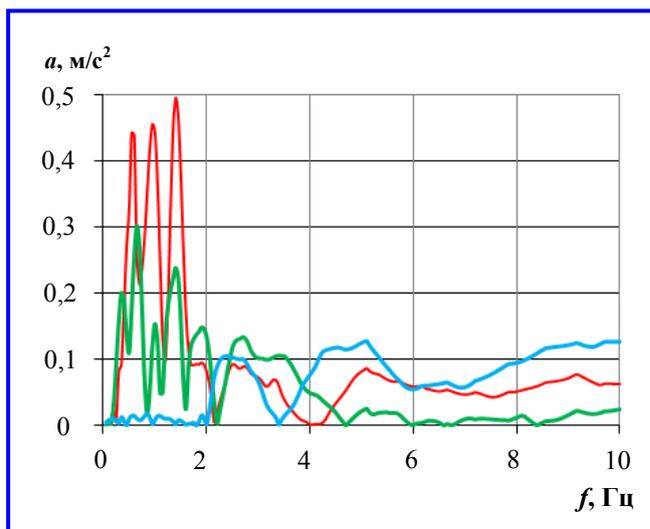


Рис. 6. Спектр Фурье отклонения



a



б

Рис. 7. Ударные спектры измеренных воздействий (a); отклонение от эталонного импульса (б)

3. Расчёт конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бир-брайер. – СПб. : Наука, 1998. – С 34 – 40.
4. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев [и др.]. – М. : Машиностроение. 1977. – 240 с.
5. Определение режима испытаний на сейсмостойкость оборудования для АЭС на основе заданных спектров / А. И Горшков, Е. А. Канунникова, Д. Н. Блинников // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2004. – Т. 101. – С. 69 – 78.
6. Управление ударом (Shock Control). Руководство пользователя // Copyright LMS International.

Поступила в редакцию 16.05.2012

***Елена Александровна Канунникова**, канд. техн. наук, начальник лаборатории.*

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

***Илья Александрович Мешихин**, мл. научн. сотрудник.*

Т. (495) 366-33-66.