

**В. А. ШМЕЛЕВ**  
(Москва)

### НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ УДАРЕ

В процессе эксплуатации, а также при исследовании и испытании разного рода оборудования и установок довольно часто приходится иметь дело с внешними механическими воздействиями, имеющими характер «удара». Это относится не только ко всякого рода подвижным объектам и движущимся узлам устройств и механизмов. В настоящее время даже приборы, устанавливаемые на щитках, при изготовлении рассчитываются на воздействие тряски и ударов. Все электронные и полупроводниковые приборы выпускаются с определенными допусками на ускорения при ударе.

Между тем измерение ускорений, возникающих при ударе, имеет ряд особенностей, которые далеко не всегда учитываются при экспериментальных работах, хотя этим вопросам и посвящена обширная литература. В одних случаях к датчикам и измерительному тракту в целом предъявляются чрезмерно жесткие требования, вызывающие необходимость применения очень сложной малоприспособленной для условий эксперимента аппаратуры, что ведет к резкому снижению достоверности получаемых данных. В других случаях подходят к таким измерениям слишком упрощенно и получают заведомо искаженные результаты.

Если для периодических или почти-периодических процессов выбор частотной характеристики аппаратуры может быть определен непосредственно (нужно лишь, чтобы частоты всех составляющих периодических (для данного промежутка времени) колебаний находились в пределах плоского участка частотной характеристики аппаратуры), то для импульсных процессов такого непосредственного критерия оценки правильности записи нет. Это объясняется тем, что удар является довольно сложным процессом.

График кривой нарастания и спадания ускорения имеет вид импульса. Величина максимального ускорения, возникающего при ударе, и длительность его действия (длительность импульса) зависят от ряда факторов — соотношения масс соударяющихся тел, скорости в момент соударения, вида поверхности в точке соударения, упругих и пластических свойств материалов.

В момент соударения в соударяющихся телах возникают волны деформации, а также собственные колебания отдельных узлов или деталей конструкции. При записи ускорений на основной процесс (дви-

жение тела после начального соприкосновения с ускорением, общим для всего тела) накладываются местные ускорения в точке установки датчика, являющиеся результатом действия прямой или отраженной волны деформации, распространяющейся по телу, а также распространяющихся волн деформаций, исходящих от элементов конструкции, возбужденных на собственных частотах.

Длительность мгновенного импульса ускорения, возникающего при начальном соприкосновении соударяющихся тел и являющегося источником волны деформации, очень невелика. Если начальное соприкосновение происходит в виде удара металла по металлу (это имеет место не всегда), то длительность соприкосновения может измеряться долями миллисекунды. Распространение возникающих при этом волн деформаций и их отражений происходит со скоростью звука в данной среде (для стали около 5000 м/сек). Частотный спектр местных ускорений в точке установки датчика, вызванных прохождением волн деформаций, поэтому лежит в области очень высоких частот.

Волны деформации через сочленения в узлах конструкции и через защитные амортизирующие устройства, как правило, не проходят или проходят очень ослабленными, а в отдельных случаях (мягкий удар) могут и не возникать.

Так как целью измерения ускорений при ударе является обычно определение возможности воздействия их на аппаратуру, узлы и детали, установленные на исследуемом объекте, то основное значение имеет определение ускорений движения тела, рассматриваемого как единое целое, а местные деформации могут не учитываться.

Таким образом, при определении требуемой частотной характеристики измерительного тракта следует исходить из необходимости записать основного импульса ускорений (кроме, очевидно, отдельных специальных случаев).

Для определения требуемой частотной характеристики аппаратуры имеет значение не только длительность импульса, но и его форма. Наиболее близко действительный процесс изменения ускорения при ударе может быть описан отрезком синусоиды (полусинусоидальный импульс). Прямоугольный импульс в чистом виде не может иметь места для механических систем, так как процесс нарастания ускорения происходит во времени. Как известно, в идеальном случае при упругом соударении тела, обладающего некоторой массой, с телом, имеющим бесконечно большую массу, движение тела после момента соприкосновения происходит по закону синусоиды. По этому же закону, следовательно, изменяется и ускорение. Так, при вертикальном ударе тела с массой  $m$ , имеющего начальную скорость  $v_0$ , о пружину с жесткостью  $c$  движение происходит по закону [1]

$$x = -f_{ст} \cos \omega_0 t + \frac{v_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t,$$

где  $f_{ст}$  — статический прогиб пружины под действием веса груза;  $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$  — частота колебаний системы. Максимальное ускорение при

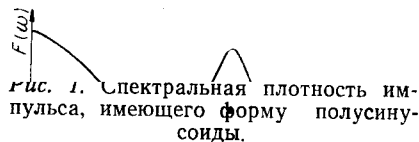
$$\text{ударе } a_{max} = \left( f_{ст} + \sqrt{f_{ст}^2 + \frac{v_0^2}{\omega_0^2}} \right) \omega_0^2.$$

На рис. 1 приведен спектр (модуль спектральной плотности) такого импульса. Для воспроизведения импульса с минимальными искажениями требуется, чтобы частотная характеристика датчика (с измерительной цепью) перекрывала основную часть спектра импульса.

Как видно из графика, в первом приближении для этого требуется по- лоса пропускания от нуля до  $f = \frac{1}{\tau} \div \frac{1,5}{\tau}$ .

Однако простое сопоставление спектра импульса и частотной ха- рактеристики еще не дает ответа на вопрос, какова же величина ис- кажений, возникающих при этом. Для оценки получаемых искажений можно воспользоваться способами, применяемыми при расчете пере- ходных процессов.

Если известно аналитическое вы- ражение спектра импульса  $s(\omega)$  и ком- плексный коэффициент передачи сис- темы (комплексная передаточная функция), то



Этот путь является, однако, слож- ным.

Если форма импульса задана графически и имеется эксперимен- тальная частотная характеристика измерительной системы, по которой может быть определен отклик системы на единичную функцию (функ- цию включения), для получения отклика системы на заданную функцию пользуются методом интеграла Дюамеля в любой его форме. Этот путь также очень трудоемок.

Наконец, если известно аналитическое выражение импульса и из- мерительная система (датчик) описывается соответствующим диффе- ренциальным уравнением, воспроизводимый сигнал (запись импульса) определяется полным решением этого уравнения.

Для полусинусоидального импульса наиболее простым является последний путь — решение соответствующего дифференциального урав- нения. Такие решения используются для частного случая, когда вся измерительная система состоит из датчика, описываемого уравнением второго порядка [3]. Эти решения для различных видов импульса и различных параметров системы приведены в многочисленных справоч- никах по переходным процессам [4]. Некоторые затруднения при их использовании возникают в связи с тем, что эти данные рассматри- ваются обычно применительно к электрическим контурам.

Полная измерительная система включает, помимо датчика, пове- дение которого может описываться непосредственно соответствующим дифференциальным уравнением, также, как правило, усилительный тракт и фильтр. Общая частотная характеристика измерительного трак- та может очень существенно отличаться от характеристики датчика.

Наиболее целесообразно поэтому воспользоваться тем обстоятель- ством, что отклик любой линейной системы определяется частотными характеристиками системы независимо от того, из каких звеньев она состоит.

Следовательно, вся измерительная система, включая датчик, уси- литель, фильтр, регистрирующее устройство, может быть заменена эквивалентной системой, состоящей только из одного датчика (или элек- трического аналога — контура), описываемой простым дифференциаль- ным уравнением второго порядка и обладающей такой же характери- стикой. В качестве такой эквивалентной системы можно принять дат- чик (электрический *LRC*-контур) с затуханием, равным 0,707 от кри-

тического. Такая система на частоте воздействия, равной ее собственной частоте ( $f=f_0$ ), имеет коэффициент передачи, равный также 0,707. Полоса пропускания системы в радиотехническом смысле равна  $\Delta f=f_0$  (на граничной частоте коэффициент передачи равен 0,7).

Следовательно, любая сложная измерительная система с некоторой граничной частотой  $0,7\Delta f$  может быть заменена очень простой системой, описанной выше. Полной идентичности может, конечно, и не быть, так как спадающая ветвь частотной характеристики действительной системы может быть различной крутизны, что скажется на несколько неодинаковом смещении вершины.

На рис. 2 даны графики, рассчитанные указанным выше методом, характеризующие прохождение полусинусоидального импульса через измерительную систему, пропускающую постоянную составляющую

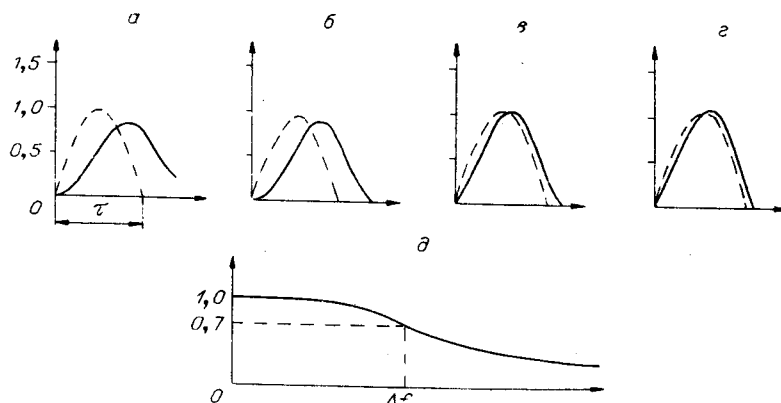


Рис. 2. Запись импульсов полусинусоидальной формы при различных соотношениях длительности импульса и полосы пропускания системы (штриховая линия — импульс, сплошная — запись):

$$a - \Delta f = \frac{0,6}{\tau}; \quad б - \Delta f = \frac{1}{\tau}; \quad в - \Delta f = \frac{1,8}{\tau}; \quad г - \Delta f = \frac{3}{\tau}; \quad д - \text{частотная характеристика системы.}$$

(ее частотная характеристика приведена на этом же рисунке). Из приведенных графиков следует, что в тех случаях, когда некоторым сдвигом максимума по времени можно пренебречь и достаточно точность определения максимальной величины импульса порядка 4—6%, для определения требуемой полосы пропускания при регистрации импульса ускорений в виде полусинусоиды можно пользоваться следующим выражением:

$$\Delta f \geq \frac{1}{\tau},$$

где  $\tau$  — длительность импульса в сек.

В тех относительно редких случаях, когда смещением максимума пренебречь нельзя, полоса пропускания должна быть более широкой. Так, при допускаемом сдвиге в 10% от длительности импульса полоса пропускания должна составлять  $\Delta f \geq \frac{3}{\tau}$ . Искажение по максимуму в этом случае практически отсутствует.

Очевидно, что, если спад импульса происходит более полого, чем нарастание, это на точность измерения не повлияет.

Иногда для измерения относительно растянутых импульсов, например, с длительностью порядка 0,01—0,1 сек, применяют аппаратуру, частотная характеристика которой не начинается от нуля, например, аппаратуру с пьезоэлектрическими или электродинамическими датчиками. Ошибки, которые при этом произойдут, могут быть весьма значительными. На рис. 3 показаны графики записи полусинусоидального

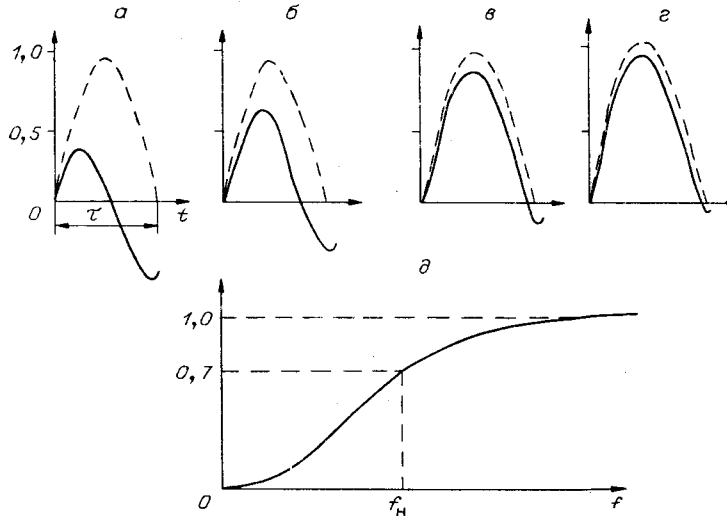


Рис. 3. Запись импульсов полусинусоидальной формы аппаратурой с полосой пропускания, ограниченной снизу:

$$a - f_n = \frac{0,4}{\tau}; \quad б - f_n = \frac{0,1}{\tau}; \quad в - f_n = \frac{0,03}{\tau}; \quad г - f_n = \frac{0,02}{\tau};$$

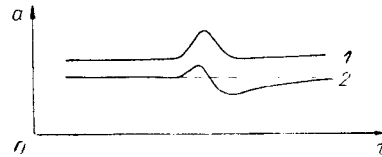
д — частотная характеристика системы.

импульса измерительной аппаратурой, имеющей полосу пропускания, ограниченную нижней частотой  $f_n$ , для различных соотношений длительности импульса и нижней граничной частоты.

На рис. 4 показана полученная экспериментально запись полусинусоидального импульса длительностью 0,025 сек индуктивным датчиком ДУ-5 аппаратуры ВИБ-5МА с полосой пропускания 0—200 гц и пьезодатчиком с полосой пропускания от 10 гц (масштаб одинаковый).

Рис. 4. Запись импульса полусинусоидальной формы длительностью  $\tau=0,025$  сек (экспериментальные данные):

1 — запись индуктивной аппаратурой с полосой пропускания 0—200 гц; 2 — запись пьезоаппаратурой с полосой пропускания 10—10 000 гц.



Приведенные примеры показывают, насколько осторожно нужно подходить к выбору датчиков и измерительных цепей в целом при измерении ускорений при ударе. При относительно растянутом («мягком») ударе с длительностью от нескольких миллисекунд до долей секунды наиболее целесообразно применять измерительные цепи с несущей частотой, например индуктивные датчики, дающие в то же время мощный полезный сигнал. При импульсах очень малой длительности («жестком ударе») порядка десятков и сотен микросекунд, по-видимо-

му, практически пригодны только пьезодатчики, имеющие наиболее широкую полосу пропускания. Ограничением частотной характеристики снизу в этом случае можно пренебречь, но необходимо считаться с наличием на записи наложения «местных» ускорений, вызванных волнами деформации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Д. Пономарев и др. Основы современных методов расчета на прочность в машиностроении, т. II. Расчеты при динамической нагрузке. М., Машгиз, 1952.
2. А. А. Харкевич. Теоретические основы радиосвязи. М., Гостехиздат, 1957.
3. М. И. Субботин. О точности записи импульсных ускорений.— Изв. АН СССР, Механика и машиностроение, 1963, № 3.
4. И. И. Теумин. Справочник по переходным электрическим процессам. М., Связьиздат, 1951.

*Поступила в редакцию  
20 апреля 1966 г.,  
окончательный вариант —  
29 августа 1966 г.*