ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 57210— 2016

Вибрация

РУКОВОДСТВО ПО ВЫБОРУ ВИБРОСТЕНДОВ

Оборудование для воспроизведения ударов

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2019

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным бюджетным учреждением «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области» (ФБУ «ТЕСТ — С.-Петербург»), Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АО «НИЦ КД»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 183 «Вибрация, удар и контроль технического состояния»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 ноября 2016 г. № 1573-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

5 ПЕРЕИЗДАНИЕ. Март 2019 г.

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, оформление, 2016, 2019

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения. 2
4 Общие положения 2
5 Характеристики вибростенда 4
6 Рекомендации по выбору вибростенда 4
7 Испытания вибростенда. 8
Приложение А (справочное) Возможность использования вибростенда для воспроизведения ударов классической формы 10
Приложение Б (рекомендуемое) Определение коэффициентов неравномерности распределения ускорения и относительного поперечного движения на столе вибростенда 12
Приложение В (рекомендуемое) Определение переходной характеристики вибростенда 13
Библиография 15

Введение

Задача выбора вибростенда встает каждый раз, когда необходимо провести испытания на воздействие вибрации для новой продукции или провести эти испытания в режиме, ранее для данной продукции не применявшемся. При этом приходится решать, какому из вариантов отдать предпочтение: приобрести новое испытательное оборудование, модернизировать имеющееся, арендовать оборудование у другой испытательной лаборатории или передать проведение испытаний в полном объеме специализированной лаборатории. В процессе принятия решения следует учитывать ряд факторов:

- цель испытаний [например, определение вибропрочности и (или) виброустойчивости в заданных условиях окружающей среды (в режиме обычных или ускоренных испытаний); определение динамических характеристик конструкции; диагностирование; калибровка];
- требования к испытаниям;
- условия проведения испытаний [например, с возбуждением одного или нескольких типов вибрации; только на вибрацию или в сочетании с другими воздействиями (например, одновременное проведение вибрационных и климатических испытаний)];
- особенности испытуемого объекта.

Настоящий стандарт распространяется только на вибростенды, применяемые в испытаниях на ударную прочность и ударную устойчивость. Установленная стандартом процедура выбора исходит, в первую очередь, из требований к таким испытаниям. Однако пользователь стандарта должен иметь в виду, что на выбор испытательного оборудования может существенно повлиять специфика как условий испытаний, так и испытуемого объекта.

Если испытательное оборудование предполагается использовать в испытаниях разных видов, то это также должно быть учтено при его выборе. Так, если оборудование будет использовано также в испытаниях на вибропрочность или виброустойчивость, то при выборе следует вместе с настоящим стандартом руководствоваться рекомендациями ГОСТ Р ИСО 10813-1.

Необходимо иметь в виду, что вибростенд (вибровозбудитель) относится к сложным видам оборудования, правильный выбор которого возможен лишь при соответствующей квалификации. В такой ситуации покупатель зачастую вынужден обращаться к помощи третьей стороны. Использование настоящего стандарта может помочь покупателю оценить, насколько обоснованным будет решение по выбору вибростенда, предложенное ему третьей стороной. Кроме того, настоящий стандарт могут использовать проектировщики и изготовители испытательного оборудования, чтобы оценить современные требования рынка данной продукции.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Вибрация

РУКОВОДСТВО ПО ВЫБОРУ ВИБРОСТЕНДОВ

Оборудование для воспроизведения ударов

Vibration. Guidance for selection of vibration generating machines. Equipment to be used in a shock mode

Дата введения — 2017—10—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает руководство по выбору вибрационных установок, используемых в режиме воспроизведения ударов, а также методы проверки характеристик этих установок. Данное руководство позволяет пользователю оценить возможности вибрационной установки и ее составных частей (вибростенда, усилителя мощности и системы управления) по воспроизведению ударных режимов в форме одиночных ударов или временных реализаций, определенных через заданную форму ударного спектра.

Настоящий стандарт распространяется на вибростенды, применяемые для воспроизведения повторяющихся ударов (ударных процессов) с целью воспроизвести условия воздействия на испытуемый объект согласно стандартам серии МЭК 60068 ([1]—[5]), а также в целях выявления «слабых» мест в конструкции объекта.

В настоящем стандарте рассматривается несколько способов обеспечения заданного движения исполнительного органа вибростенда: с помощью импульсов простой формы или через сложные переходные процессы. Воспроизведение требуемых переходных процессов осуществляется через управление испытаниями по заданному ударному спектру.

Испытания на ударную прочность и устойчивость часто сочетают с соответствующими вибрационными испытаниями. Стенд, применяемый в вибрационных испытаниях, может быть также использован в испытаниях на удар в том случае, если он удовлетворяет требованиям к испытаниям по диапазону частот и способен обеспечить заданные предельные значения параметров движения: ускорения, скорости и перемещения. Характеристики основных типов вибростендов приведены в [6]—[7].

Возможность использования вибростенда для воспроизведения импульсов классической формы рассматривается в приложении А. Методы проверки (подтверждения) некоторых характеристик вибростендов приведены в приложениях Б и В.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ ИСО 5348 Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров

ГОСТ Р ИСО 2041 Вибрация, удар и контроль технического состояния. Термины и определения

Издание официальное

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте национального органа Российской Федерации по стандартизации в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р ИСО 2041, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **номинальная нагрузка:** Указанная изготовителем максимальная нагрузка, используемая для испытаний вибростенда.

3.2 **контрольная точка:** Точка крепления образца, ближайшая к центру поверхности стола вибростенда.

Примечание — Если на столе вибростенда есть точка крепления, обладающая более жесткой механической связью с конструкцией стола, то ее принимают в качестве контрольной.

4 Общие положения

4.1 Преимущества применения вибростендов

Применение вибростендов в испытаниях на удар и транспортную тряску обладает следующими преимуществами по сравнению с традиционными ударными стендами:

- возможность использования стандартных приспособлений вибростенда для крепления испытуемого образца;
- сокращение времени на подготовку к испытаниям;
- улучшение воспроизводимости условий испытаний;
- возможность воспроизведения ударных процессов сложной формы;
- простота настройки на новый тип ударного воздействия;
- лучшие возможности управления испытаниями, в том числе возможность более точно воспроизвести форму классического ударного импульса;
- значительно меньший уровень нежелательных (фоновых) колебаний в воспроизводимом воздействии.

4.2 Ограничения на использование вибростендов

Для воспроизведения ударных режимов обычно используют электродинамические или гидравлические вибростенды. Данное испытательное оборудование при наличии соответствующей цифровой системы управления способно генерировать как ударные импульсы классической формы (трапецеидальный, пилообразный в форме полусинусоиды и др.), так и временной процесс произвольного вида, ударный спектр которого соответствует заданному. Вместе с тем электродинамический и гидравлический вибростенды обладают ограниченными возможностями по воспроизведению возбуждения с большими значениями скорости и перемещения.

Другие ограничения применения вибростендов связаны с максимальным ускорением и максимальной длительностью импульса. Если условия испытаний предполагают создание очень высоких ускорений или импульсов большой длительности, то для их реализации может оказаться необходимым использовать традиционные механические ударные стенды.

4.3 Принципы применения вибростенда для воспроизведения ударов

На оценку возможности использования вибрационной установки для генерирования ударов влияет много факторов, среди которых масса испытуемого объекта и его динамические характеристики играют более важную роль, чем, например, в испытаниях на гармоническую или случайную вибрацию. Обычно пиковое значение вынуждающей силы, которое может обеспечить вибростенд при воспроизведении удара, только в два или три раза превышает необходимое для создания гармонической вибрации, чтобы концентрация энергии на небольшом интервале длительности удара не приводила к чрезмерно большому перегреву подвижной системы вибростенда.

Максимально достижимый уровень ускорения (при условии, что вибростенд способен развить достаточную силу) может быть в два или три раза выше среднеквадратичного значения ускорения, применяемого при испытаниях на случайную вибрацию. Максимальное выходное напряжение усилителя мощности и коэффициент усиления по скорости вибростенда определяют ограничения на скорость движения стола, хотя максимальное напряжение можно изменить, используя соответствующий согласующий трансформатор. Самым большим ограничением, определяющим возможности вибростенда воспроизводить удары заданной формы, являются пределы хода стола. Это связано с тем, что стол после воспроизведения импульса должен быть возвращен в свое исходное положение, а значит перед и после основной части импульса ускорения должны быть предусмотрены соответствующие формирующие импульсы. На графиках перемещения (см. рисунки А.1 и А.2) видно, что самые большие перемещения связаны именно с формирующими импульсами, поэтому вид формирующих импульсов и их уровень относительно пикового значения основной части импульса существенно влияют на требования к перемещению, обеспечиваемому вибростендом.

4.4 Классификация испытаний на удар с применением вибростендов

4.4.1 Воспроизведение импульса классической формы

Стандарты, устанавливающие методы испытаний на удар, требуют, чтобы испытательное оборудование было способно воздействовать на испытуемый образец ударным импульсом одной из трех классических форм (пилообразным с пиком в конце, полусинусоидальным или трапецеидальным) с заданной жесткостью. При этом такие стандарты не устанавливают требования к устройствам, воспроизводящим заданные импульсы.

Чтобы вибрационный стол после воспроизведения удара приходил в свое начальное положение, воспроизводимый ударный импульс ускорения классической формы должен дополнительно содержать формирующие импульсы, расположенные непосредственно до и сразу после интервала, на котором определен классический импульс (см., например, рисунок А.1). Амплитуда формирующих импульсов составляет малую долю пикового значения основного импульса. В этом случае стол, на котором установлен испытуемый образец, сначала разгоняют, а основной ударный импульс формируется во время отскока стола в конце его траектории.

Чтобы форма импульса не выходила за заданные пределы допуска, используют итеративный режим управления ударом. Вначале применяют импульсы малого уровня, для которых анализируют сигнал ускорения в контрольной точке. Рассчитывают отклонение от заданной формы и изменяют сигнал задающего генератора таким образом, чтобы скомпенсировать полученные отклонения. Процедуру возбуждения импульсов малого уровня повторяют до тех пор, пока полученная форма импульса не будет находиться в пределах допуска. После этого уровень импульса постепенно повышают, контролируя при этом форму сигнала, до тех пор, пока не будет достигнут уровень, соответствующий заданной жесткости испытаний. Ранее при использовании механических стендов для такой процедуры настройки использовали имитаторы нагрузки, чтобы не перегрузить испытуемый объект до начала основных испытаний.

4.4.2 Воспроизведение воздействия с заданным ударным спектром

Методы испытаний с заданным ударным спектром часто используют в тех случаях, когда нужно максимально похоже имитировать условия динамических воздействий на испытуемое изделие при его реальном применении. Чтобы испытания были воспроизводимыми и соответствовали реальным условиям применения изделия, при их проектировании следует учитывать основные принципы использования ударных спектров.

В настоящее время большую часть испытаний на удар проводят с применением импульсов в форме полусинусоиды. Однако при испытаниях с использованием заданного ударного спектра способность

тестового воздействия стимулировать развитие повреждения испытуемого образца зависит не только от пикового значения и длительности импульса, но и от распределения энергии по его спектру. Поэтому в испытаниях данного вида в качестве задающего сигнала предпочтительнее использовать временную реализацию произвольного вида, но такую, чтобы на соответствующие характерные частоты образца приходилась соответствующая доля энергии сигнала. Такой подход является весьма гибким, поскольку позволяет обойти многие ограничения, связанные с используемым испытательным оборудованием, за счет выбора подходящей формы сигнала. Например, испытания в соответствии с военным стандартом [6] предполагают воспроизведение заданного ударного спектра, но в тех случаях, когда контроль ударного спектра невозможен, допускают использовать возбуждение случайной широкополосной вибрацией или ударными импульсами пилообразной формы с пиком в конце.

В испытаниях данного вида образец обычно возбуждают переходным процессом с небольшим пиковым значением, проводят измерение ударного спектра и сопоставляют его с заданным, после чего система управления вносит в сигнал необходимые изменения. Процедуру повторяют несколько раз до тех пор, пока желаемая форма ударного спектра не будет достигнута, и затем проводят испытания образца с заданной жесткостью воздействия. Вид задаваемого ударного спектра может быть выбран из нескольких стандартизованных форм или получен в результате анализа динамических воздействий на изделие в реальных условиях его применения.

5 Характеристики вибростенда

Движение стола вибростенда может быть определено через ударный спектр или задано в форме соответствующей акселерограммы. Где это необходимо, должны быть определены следующие характеристики вибростенда (вместе с допусками):

а) формы воспроизводимых импульсов;

б) диапазон изменений скорости стола;

в) максимальный размах перемещения стола;

г) диапазон воспроизводимых пиковых значений импульсов ускорения;

д) формирующие импульсы до и после основной части импульса ускорения;

е) диапазон длительностей импульсов;

ж) диапазон частот воспроизводимого ударного спектра;

и) разрешение по частоте;

к) масса стола и общая масса подвижной системы вибростенда;

л) максимальная жесткость, прочность и демпфирование стола вибростенда;

м) частоты собственных колебаний стола;

н) собственные частоты вибростенда после его установки на фундамент;

п) общие размеры вибростенда и его частей, включая размеры стола и их вспомогательных приспособлений;

р) размеры, массы и методы крепления реактивных масс;

с) максимальный размер и масса испытуемого образца;

т) средства крепления испытуемого образца и акселерометров;

у) число ударов (ударных импульсов), которые вибростенд способен воспроизводить в единицу времени, или минимальный интервал времени между двумя последовательными ударами (импульсами);

ф) характеристики измерительной системы;

х) месторасположение центра тяжести стола с указанием влияния на динамику движения стола нецентральной установки испытуемого образца;

ц) допустимый диапазон изменения климатических факторов (температура, влажность и т. д.).

6 Рекомендации по выбору вибростенда

6.1 Общие положения

Характеристики вибростенда, применяемого для воспроизведения ударов, должны быть установлены его изготовителем.

Вследствие особой важности возможности контролировать в процессе испытаний перемещение стола вибростенда желательно, чтобы максимальный размах перемещения при воспроизведении пере-

ходных процессов был не менее 50,8 мм (лучше не менее 63,5 мм). Поэтому целесообразно выбирать вибростенд с большим ходом поршня.

Другими конструктивными особенностями вибростенда, позволяющими генерировать заданные ударные воздействия, являются:

- очень жесткие кронштейны крепления вибростенда, способные обеспечить его надежную опору. Обычно такие кронштейны вместе с сейсмической массой фундамента предусматриваются конструкцией вибростендов, которые предполагается использовать в режиме ударов или в испытаниях на низкочастотную вибрацию;
- наличие внутренней системы опоры (центрирования) корпуса вибростенда, позволяющей перемещать его в вертикальном направлении в зависимости от массы испытуемого образца. В случае мощных вибростендов желательно, чтобы такая система работала в автоматическом режиме;
- легкая прочная катушка подвижной системы (для электродинамических вибростендов), способная обеспечить большие ускорения;
- наличие специального согласующего трансформатора, который позволит применять стенд в широком диапазоне условий испытаний. Он может включать в себя удаленный переключатель отводов, позволяющий изменять вид воспроизводимого возбуждения (гармоническое, случайное, ударные процессы).

При воспроизведении ударов могут наблюдаться ускорения много выше тех, что имеют место при испытаниях на гармоническую или случайную вибрацию, поэтому особое внимание следует уделить силам в направлении, отличном от направления удара, поскольку такие силы способны повредить подвеску вибростенда. Большинство изготовителей вибростендов предоставляют формулу расчета допустимых сил в поперечном направлении, которые необходимо контролировать из расчета некоторого коэффициента запаса (от 10 % до 20 %) с учетом особенностей динамического поведения конкретного испытуемого образца.

В некоторых вибростендах передача сигнала возбуждения осуществляется через индуктивную связь, что приводит к ограничениям возможности воспроизведения колебаний в области низких частот. Если нижняя граница диапазона частот создаваемой вибростендом вибрации не равна нулю, то следует оценить низшую частоту воспроизводимого ударного воздействия и убедиться, что она превышает нижнюю границу диапазона частот вибростенда. В случае воспроизведения ударного ускорения в форме полусинусоиды с применением формирующих импульсов низшая частота сигнала может быть определена по продолжительности формирующего импульса.

Низшая частота сигнала «оптимизированной» формы (см. приложение А) может быть рассчитана по его графику. Эта частота обычно зависит от продолжительности формирующего импульса, ускорение которого мало. Поэтому в принципе достаточно, чтобы мощность передаваемого усилителем сигнала хотя бы незначительно превышала потери на рассеяние при индуктивной связи, даже если нижняя граница полосы пропускания вибростенда превышает низшую частоту воспроизводимого сигнала. Однако при этом следует учитывать, что индуктивные потери вызывают повышение температуры подвижной части вибростенда, поэтому при испытаниях следует соблюдать осторожность и не допускать чрезмерного перегрева.

Оценка возможности использования электродинамического вибростенда в ударном режиме является непростой задачей, поскольку конечный результат зависит от массы испытуемого объекта и особенностей применяемого контроллера системы управления. При выборе испытательного оборудования можно ограничиться достаточно грубыми оценками, однако для обеспечения безопасной работы вибростенда следует точно рассчитать параметры испытаний.

Некоторые контроллеры генерируют импульсы, обеспечивающие перемещение стола только в одну сторону. Для расширения возможностей системы корпус вибростенда может быть несколько смещен по оси воспроизводимых колебаний посредством внутренней системы опоры (если она имеется). Некоторые вибростенды могут быть снабжены устройствами автоматического смещения корпуса, позволяющими корректировать его положение в зависимости от массы испытуемого объекта.

Большинство контроллеров допускают ограничение перемещения, скорости и ускорения стола (каретки) вибростенда программным способом. Если же контроллер такой возможностью не обладает, то для ограничения вынуждающей силы (ускорения) и скорости следует управлять соответственно напряжением и током на выходе усилителя мощности. Переключатели ограничения по току и напряжению должны быть установлены в положение для случайной вибрации.

Существуют контроллеры, способные обеспечивать формирование временного сигнала произвольно заданной формы. Это позволяет обеспечить точное соответствие сигналу (в форме импульса) границе допуска и тем самым несколько снизить требования к возможностям вибрационной установки.

Испытания на удар могут требовать воспроизведения последовательности ударных импульсов. В этом случае необходимо убедиться, что интервалы между основными импульсами достаточны для включения между ними формирующих импульсов.

6.2 Синтез ударного воздействия

В качестве альтернативы создания с помощью электродинамического или гидравлического вибростенда ударов классической формы можно использовать возбуждение по заданной форме ударного спектра. Необходимый сигнал возбуждения может быть получен в виде суммы импульсов (вейвлетов) разной формы и уровня (см. [2]). Заданному ударному спектру соответствует большое разнообразие временных реализаций сигнала. Как следствие, накапливаемые в ходе испытаний усталостные повреждения образца будут в общем случае зависеть от выбранной формы сигнала, в то время как пиковые значения ускорения и пиковые механические напряжения будут приблизительно одними и теми же. Поскольку испытания на удар, как правило, призваны продемонстрировать способность испытуемого изделия выдерживать пиковые кратковременные нагрузки, то с учетом вышесказанного требования к условиям испытаний предпочтительно формулировать в виде заданного ударного спектра, а не акселерограммы процесса. Кроме того, следствием удара зачастую являются колебательные процессы в объекте, и эти процессы могут представлять самостоятельный интерес. С этой точки зрения воздействие также предпочтительнее описывать через ударный спектр, а не через удар классической формы.

Тестовые импульсы классической формы, определенные в [1], могут быть заменены, например, временным сигналом в виде суммы вейвлетов:

$$a(t) = \sum_i A_i \exp(-\varepsilon_i \omega_i t) \sin(\omega_i t + \phi_i), \quad (1)$$

где $a(t)$ — временной сигнал ускорения;

ω_i — угловая частота;

A_i, ϕ_i и ε_i — амплитуда, начальная фаза и коэффициент демпфирования вейвлета соответственно.

Значения A_i, ϕ_i и ε_i обычно выбирают случайно распределенными в диапазоне возможных значений, определяемых возможностями вибростенда и его системы управления. В системе управления требуемый временной сигнал рассчитывается следующим образом:

а) формируют ансамбль осцилляторов с одной степенью свободы, определяемых через набор собственных частот и заданное демпфирование;

б) генерируют сигнал в виде суммы большого числа вейвлетов с разными угловыми частотами ω_i [см. формулу (1)];

в) временной сигнал одновременно подают на входы всех осцилляторов;

г) измеряют пиковое значение на выходе каждого осциллятора и наносят его на график зависимости от собственной частоты осциллятора. Полученная кривая соответствует ударному спектру для временного сигнала, определенного на шаге б);

д) сравнивают полученный ударный спектр с заданным и рассчитывают разность для каждой частоты (собственной частоты осциллятора);

е) посредством отрицательной обратной связи изменяют входной временной сигнал с учетом полученных разностей для приближения формы ударного спектра к заданной.

Повторяют шаги от в) до е) до тех пор, пока получаемый ударный спектр не совпадет с заданным в пределах допуска. В результате получают временной сигнал, который должен быть воспроизведен на столе вибростенда в процессе испытаний. После этого приступают к процедуре согласования отклика стола вибростенда с полученным временным сигналом. Для этого используют переходную характеристику вибростенда, зависящую от испытуемого образца и устройств его крепления.

Примечание 1 — Процедуры синтеза формы временного сигнала и управления движением стола вибростенда иногда совмещают.

Примечание 2 — Максимальный отклик ансамбля осцилляторов не совпадает с максимальным ускорением, наблюдаемым на столе вибростенда, которое равно значению, к которому асимптотически стремится кривая

ударного спектра при возрастании частоты (собственной частоты осциллятора) до бесконечности. Это значение называют ускорением нулевого периода.

Приведенная процедура синтеза сигнала позволяет воспроизвести возбуждение с ударным спектром, в пять раз превышающим тот, что был бы получен, если бы временной сигнал строился с использованием импульсов классической формы (как это делают, например, при применении ударного стенда). Это позволяет получить один и тот же ударный спектр при значительно меньших вынуждающих силах.

6.3 Анализ сигнала

Для простого вычисления начального вида ударного спектра может быть использовано разностное уравнение второго порядка в виде

$$y_n = x_n - a_1 x_{n-1} - a_2 x_{n-2}\,, \tag{2}$$

где y_n — мгновенное значение отклика осциллятора с одной степенью свободы на текущее (x_n) и предшествующие (x_{n-1}, x_{n-2}) значения входного сигнала;

a_1, a_2 — коэффициенты, определяемые по формулам

$$a_1 = 2\exp\left(-2\pi\varepsilon f_0 T_d\right)\cos\left(2\pi f_0 T_d\right), \tag{3}$$

$$a_2 = \exp\left(-4\pi\varepsilon f_0 T_d\right), \tag{4}$$

где f_0 — недемпфированная собственная частота осциллятора с одной степенью свободы;

ε — коэффициент демпфирования;

T_d — интервал (период) дискретизации.

Для получения устойчивого решения с достаточной точностью можно ограничиться пятью выборочными значениями на периоде колебаний, определяемом частотой f_0. Если коэффициент демпфирования не равен нулю, то для определения ударного спектра следует использовать блок выходных данных соответствующей длительности.

Если коэффициент демпфирования близок к нулю, тогда основная энергия отклика содержится на временном интервале, который следует за интервалом ударного воздействия. В этом случае наиболее эффективный способ расчета ударного спектра заключается в выполнении Фурье-преобразования с последующим умножением коэффициентов Фурье на значения угловых частот.

Алгоритм расчета ударного спектра следует проверить, используя для этого тестовый сигнал с известным ударным спектром. В качестве такого тестового сигнала рекомендуется использовать импульс прямоугольной формы, для которого погрешность вычисления будет максимальна.

Если вибростенд производит удары сложной формы со случайными значениями амплитуды и фазы на заданных частотах, то рекомендуется проводить усреднение по нескольким реализациям случайного процесса. Также рекомендуется использовать процедуру сглаживания получаемого ударного спектра. Если значительная доля ударного спектра лежит в высокочастотной области, то для его представления целесообразно использовать логарифмический масштаб по частоте.

Для стендов, производящих одиночные ударные импульсы, важной характеристикой является коэффициент наложенных колебаний r_{so}. Этот коэффициент должен быть установлен изготовителем стенда и проверяться в ходе его испытаний. Коэффициент наложенных колебаний для ударного воздействия заданной формы рассчитывают по формуле

$$r_{\text{so}} = \frac{1}{2a_{peak}} \sum_{\text{i}=1}^{n+1} \left|a_i - a_{i-1}\right|, \tag{5}$$

где a_{peak} — пиковое значение сглаженного ускорения ударного воздействия;

a_i — значение максимума (i нечетное) или минимума (i четное) ускорения ударного воздействия;

i — номер экстремума ускорения ударного воздействия;

n — число экстремумов в сигнале ускорения ударного воздействия.

6.4 Инерционное тело

Если при работе вибростенда используют инерционное тело, то его масса и жесткость должны существенно превышать массу и жесткость стола вибростенда.

Инерционное тело должно иметь достаточно высокие резонансные частоты, чтобы те не влияли на форму самого короткого ударного импульса, воспроизводимого вибростендом.

В случаях, когда необходимо изолировать окружающие предметы и снизить динамическую нагрузку на пол от воздействий ударов, создаваемых вибростендом, инерционное тело устанавливают на подвесах с низкой собственной частотой колебаний. Инерционное тело может также использоваться для управления возвратом стола после совершения удара за счет переданного этому телу количества движения.

Изготовитель вибростенда должен указать рекомендуемые геометрические размеры, значения и соотношение между движущимися массами, включая испытуемый образец и инерционное тело, а также указать методы их установки.

7 Испытания вибростенда

7.1 Общие положения

Соответствие характеристик вибростенда, применяемого для воспроизведения ударов, заявленным значениям должно периодически подтверждаться в ходе его испытаний согласно установленной методике.

Изготовитель вибростенда указывает рекомендуемую периодичность испытаний, которая может быть скорректирована пользователем на основе опыта эксплуатации вибростенда, интенсивности его использования, стабильности проверяемых характеристик.

7.2 Метод испытаний

В ходе испытаний выполняют следующие процедуры:

а) проводят предварительный контроль работы вибростенда;

б) определяют метрологические временные характеристики вибростенда для каждого режима работы, включая:

- переходную характеристику (см. приложение В),
- диапазон пиковых значений ускорения,
- диапазон длительностей ударных импульсов,
- формы воспроизводимых ударных импульсов,
- коэффициент наложенных колебаний для заданной временной реализации ударного процесса;

в) определяют точность воспроизведения заданных ударных спектров в разных режимах работы;

г) определяют стабильность воспроизведения пиковых значений ускорения или ударных спектров в повторных испытаниях;

д) определяют число ударов, воспроизводимых вибростендом в единицу времени;

е) определяют коэффициент неравномерности распределения ускорения по столу вибростенда;

ж) определяют коэффициент относительного поперечного движения стола вибростенда при воспроизведении ударов;

и) определяют магнитное поле рассеяния над столом вибростенда (для вибростендов электродинамического типа).

7.3 Средства измерений и вспомогательное оборудование

В комплект поставки вибростенда должны входить две эквивалентные нагрузки с массами $m_{ном}$ и $0{,}5m_{ном}$, где $m_{ном}$ — масса номинальной нагрузки. Если вибростенд используют для испытаний образцов, чья масса вместе с массой приспособлений для крепления не превышает 0,1 $m_{ном}$, то допускается проводить калибровку стенда без нагрузки. В качестве эквивалентной нагрузки рекомендуется использовать цельнометаллическую отливку в форме цилиндра или правильной призмы, для которых отношение высоты к диаметру (наибольшей диагонали основания) находится в диапазоне от 0,2 до 1,0.

Примечание 1 — Допускается проводить калибровку вибростенда с использованием модели изделия с соответствующими переходниками и устройствами крепления. В этом случае результаты калибровки будут привязаны к конкретному изделию и могут быть использованы только для испытаний образцов данного изделия.

Форма эквивалентной нагрузки должна обеспечивать возможность установки акселерометра в контрольной точке на столе вибростенда. Обычно координаты контрольной точки совпадают с геометрическим центром поверхности стола, если изготовителем не рекомендовано иное.

Средства измерений удара, используемые при испытаниях, должны обеспечивать измерения в диапазонах ударных ускорений и длительностей импульсов, воспроизводимых вибростендом. Инструментальная неопределенность измерений, включая нелинейность амплитудной характеристики и динамическую погрешность измерительной цепи, должна обеспечивать измерение параметров ударных процессов в контрольной точке в заданном направлении измерений в пределах допуска, установленных в [1] или изготовителем вибростенда.

Примечание 2 — Если односторонний допуск составляет 20 %, то расширенная инструментальная неопределенность не должна превышать 7 % при уровне доверия 95 %. Калибровку акселерометров, входящих в состав средства измерений, выполняют согласно [7].

Установка акселерометров на столе вибростенда — по ГОСТ ИСО 5348. Для уменьшения погрешности измерений, связанной с деформацией стола вибростенда, а также при необходимости измерений поперечного движения используют вспомогательное переходное устройство в виде металлического кубика или цилиндра с максимальным габаритным размером не более 30 мм, на поверхностях которого устанавливают акселерометры.

Поскольку испытания на удар или тряску сопровождаются высокими значениями ускорения и перемещения, особые меры предосторожности должны быть приняты в отношении сигнальных кабелей. Они должны быть проложены и закреплены таким образом, чтобы в ходе испытаний подвергаться минимальным изгибам и механическим напряжениям, особенно в месте соединения с преобразователем вибрации.

7.4 Калибровка и обработка результатов испытаний

Во время предварительного контроля работы вибростенда проверяют:

- наличие руководства по эксплуатации вибростенда;
- соответствие установки и конфигурации вибростенда рекомендациям изготовителя;
- наличие свидетельств о поверке (калибровке) средств измерений удара, применяемых с данным вибростендом;
- возможности включения и выключения вибростенда;
- настройки вибростенда для работы в режиме воспроизведения ударов;
- функционирование системы измерений;
- выполнение требований безопасности в соответствии с технической документацией изготовителя.

Метрологические характеристики определяют для каждого режима воспроизведения ударного возбуждения. Измерения выполняют для минимального, максимального и промежуточного значений пикового ускорения, воспроизводимого вибростендом, при эквивалентной нагрузке с номинальной массой $m_{ном}$, 0,5 $m_{ном}$ и без нагрузки.

Эквивалентные нагрузки и пиковые значения ускорения определяет пользователь вибростенда.

Для каждого из указанных сочетаний пиковых ускорений и массы нагрузки ударное воздействие повторяют не менее трех раз. Оценку пикового значения ускорения и длительности импульса для каждого режима и каждой нагрузки получают по усредненной временной реализации ударного процесса. За длительность импульса принимают точку первого пересечения усредненной реализации с осью абсцисс.

Если стандартами на испытания на воздействие ударных процессов не установлено иное, то ударные импульсы классифицируют, сравнивая усредненную временную реализацию с формами и допусками импульсов по [1].

Если в усредненной временной реализации присутствуют наложенные колебания, то определяют коэффициент наложенных колебаний согласно 6.3.

Ударный спектр рассчитывают в соответствии с 6.3. Полученный ударный спектр сравнивают с заданным в технических условиях испытаний на удар или в документации изготовителя.

В качестве характеристики нестабильности воспроизведения ударного воздействия принимают максимальное отклонение пикового значения в серии испытаний от его среднего значения.

Число ударов, воспроизводимых вибростендом в единицу времени в заданном режиме работы вибростенда, определяют как среднее число ударов в единицу времени в ходе повторных испытаний.

Приложение А
(справочное)

Возможность использования вибростенда для воспроизведения ударов классической формы

Для воспроизведения многократных ударных воздействий разной формы могут использоваться электродинамические вибростенды. Удары классической формы (полусинусоидальной, пилообразной, трапецеидальной) получают с использованием цифровых систем управления, позволяющих добиться высокой точности воспроизведения.

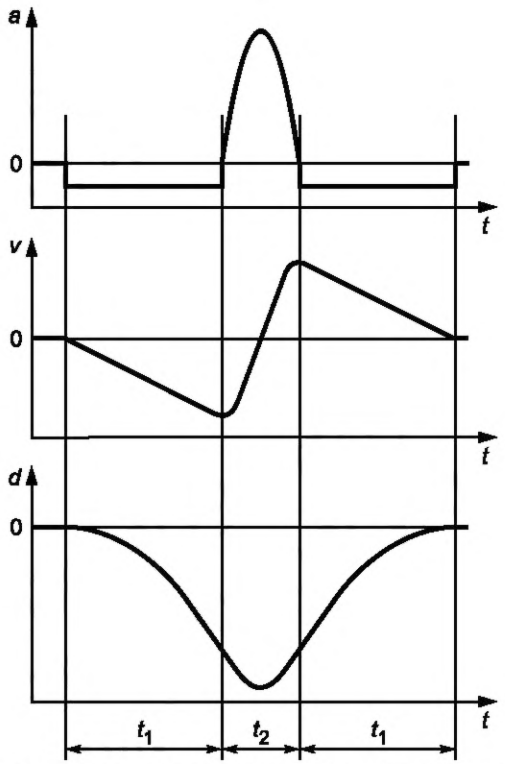
При воспроизведении сигнала ускорения (например, в форме полусинусоиды) система управления должна следить за тем, чтобы максимально допустимые значения силы, ускорения, скорости и перемещения не были превышены. При этом наибольшие проблемы связаны с правильным заданием формирующих импульсов ускорения до и после основного сигнала, обеспечивающих воспроизведение требуемых сигналов в максимально широком диапазоне пиковых значений.

Если основной сигнал представляет собой полусинусоиду, а формирующие сигналы имеют прямоугольную форму (см. рисунок А.1), то максимально допустимое пиковое значение ускорения A_p для заданного диапазона перемещений R зависит от ускорения в обратном направлении P. На практике в большинстве технических условий на испытания требуют, чтобы P не превышало 10 % A_p.

Если масса корпуса вибростенда M_b, а масса подвижной системы с нагрузкой M_a, то в пиковое ускорение A_p следует ввести поправку, учитывающую движение корпуса вибростенда в направлении, противоположном движению подвижной системы.

Кроме того, следует учитывать допустимые диапазоны вынуждающей силы и скорости для данного вибростенда. Как правило, при испытаниях с воспроизведением ударных процессов можно использовать силу вдвое большую, чем при испытаниях на гармоническую вибрацию, при условии, что при этом все остальные характеристики вибростенда остаются в пределах допусков.

Максимально возможное изменение скорости во время удара определяется максимальным выходным напряжением усилителя мощности и зависит от конструкции вибростенда и усилителя мощности.



a — ускорение ударного импульса; v — скорость; d — перемещение; t — время; t_1 — длительность предударного (послеударного) формирующего импульса; t_2 — длительность основной части импульса

Рисунок А.1 — Сигналы ускорения, скорости и перемещения для импульса полусинусоидальной формы

Для импульса полусинусоидальной формы с прямоугольными формирующими импульсами справедливы следующие соотношения:

$$\Delta v = \frac{2A_p t_2}{\pi}, \quad A_p = \frac{2\pi^2 R P}{t_2^2 (1+2P)} \cdot \frac{M_b}{M_b + M_a}, \tag{A.1}$$

где Δv — диапазон изменения скорости во время удара;

A_p — пиковое значение ускорения;

t_2 — длительность основной части импульса;

R — диапазон перемещений;

P — относительное обратное ускорение;

M_b — масса корпуса вибростенда;

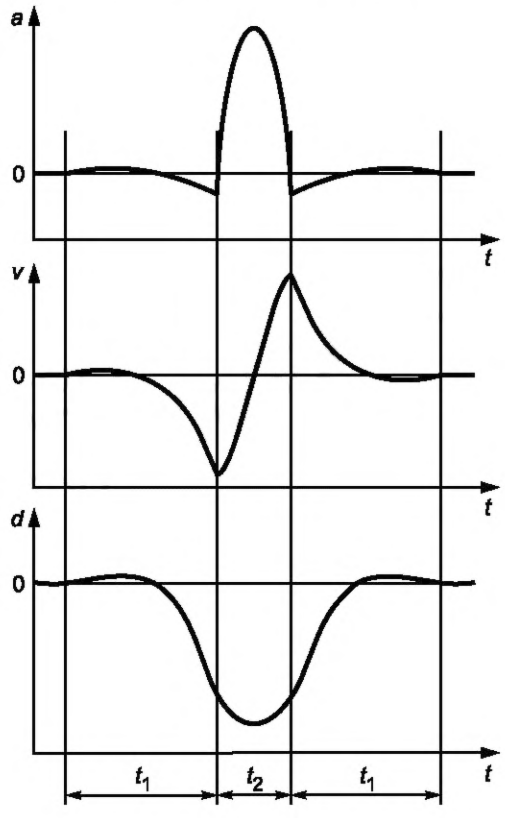
M_a — сумма масс подвижной системы и нагрузки.

В таблице А.1 приведены типичные значения A_p и t_2 для электродинамических вибростендов с ходом (размахом перемещения) катушки возбуждения 51 мм для P = 0,1.

Таблица А.1

A_p, м/с^2	t_2, мс
5	30
10	16
15	11
25	6
30	11
40	11
50	11
75	11

Приведенные соотношения могут быть использованы только как ориентировочные, поскольку в действительности вид формирующих импульсов отличается от прямоугольного (см. рисунок А.2).



a — ускорение ударного импульса; *v* — скорость; *d* — перемещение; *t* — время; t_1 — длительность предударного (послеударного) формирующего импульса; t_2 — длительность основной части импульса

Рисунок А.2 — Сигналы ускорения, скорости и перемещения при воспроизведении ударного импульса полусинусоидальной формы с оптимизированными предударными и послеударными участками

Приложение Б
(рекомендуемое)

Определение коэффициентов неравномерности распределения ускорения и относительного поперечного движения на столе вибростенда

Б.1 Коэффициент неравномерности распределения ускорения

Неравномерность распределения ускорения на столе вибростенда определяют методом замещения. Для измерений используют два акселерометра. Акселерометр *A* устанавливают в контрольной точке, акселерометр *B* — в точке на столе вибростенда, максимально удаленной от контрольной.

Сначала определяют среднее значение отношения пиковых значений напряжений на выходах пары акселерометров при заданном ударном ускорении и длительности импульса $(U_{pA}/U_{pB})_1$.

Затем акселерометры меняют местами (замещают один другим) и для того же ударного воздействия определяют новое среднее значение отношения: $(U_{pA}/U_{pB})_2$.

Коэффициент неравномерности распределения ускорения на столе ударного стенда K_{un}, в процентах, определяют по формуле

$$K_{un} = \left| 1 - \sqrt{\frac{\left(U_{pA}/U_{pB}\right)_1}{\left(U_{pA}/U_{pB}\right)_2}} \right| \cdot 100 . \qquad (Б.1)$$

Б.2 Коэффициент относительного поперечного движения

Вначале в нескольких экспериментах определяют коэффициент поперечных составляющих ускорения на столе вибростенда $K_{tr,\,i}$, в процентах, при заданном ударном ускорении и длительности импульса по формуле

$$K_{tr,i} = \max\left\{ \frac{\sqrt{a_{xi}^2(t) + a_{yi}^2(t)}}{\max\left[a_{zi}(t)\right]} \right\} \cdot 100 , \qquad (Б.2)$$

где a_{zi} — ускорение в направлении удара в *i*-м эксперименте;

$a_{xi}(t)$, $a_{yi}(t)$ — ускорения в двух произвольных взаимно перпендикулярных направлениях, перпендикулярных к направлению удара, в *i*-м эксперименте;

t — время.

В каждом эксперименте измерения во всех трех взаимно перпендикулярных направлениях *x*, *y* и *z* проводят одновременно.

После завершения всех экспериментов коэффициент относительного поперечного движения K_{tr}, в процентах, при заданном ударном ускорении и длительности импульса определяют по формуле

$$K_{tr} = \max\{K_{tr,i}\}. \qquad (Б.3)$$

Если измерения проводят с использованием кубика, к которому крепят три однокомпонентных датчика ускорения, то должно быть соблюдено условие

$$\frac{c}{4L} \geq \frac{5}{t}, \qquad (Б.4)$$

где c — скорость звука в материале кубика, м/с;

L — длина ребра кубика, м;

t — длительность наиболее короткого импульса, с.

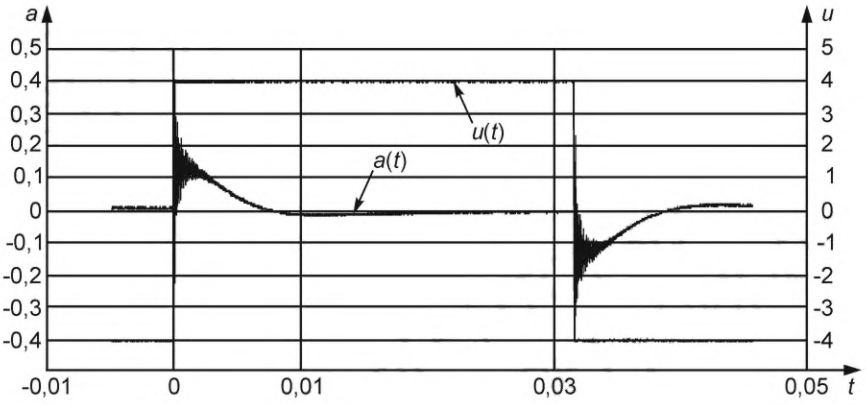
Приложение В
(рекомендуемое)

Определение переходной характеристики вибростенда

Анализ переходной характеристики вибростенда, используемого для воспроизведения ударных воздействий произвольной формы, включает в себя следующие этапы:

а) заменяют гармонический сигнал напряжения на входе усилителя мощности вибростенда прямоугольным сигналом $u(t)$ с тем же пиковым значением;

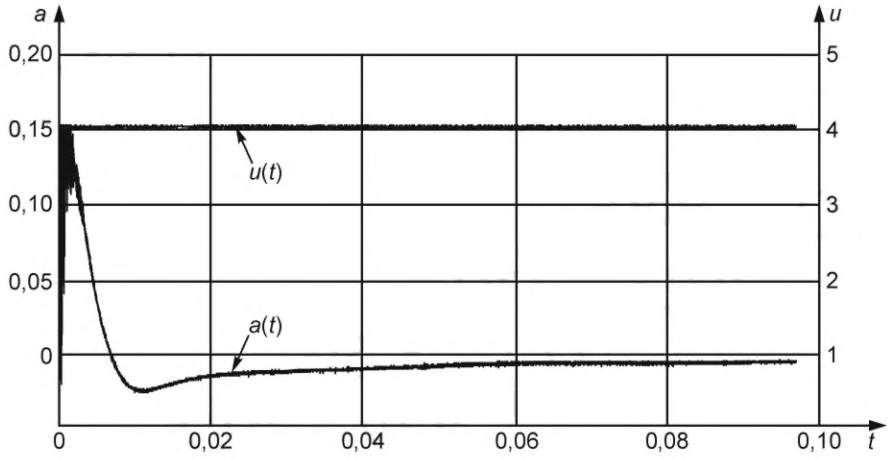
б) регистрируют сигнал ускорения $a(t)$ на столе вибростенда и регулируют амплитуду и длительность входного сигнала $u(t)$ так, чтобы воспроизведенный сигнал $a(t)$ находился в линейном диапазоне амплитуд вибростенда (см. рисунок В.1);



$a(t)$ — ускорение на столе вибростенда; $u(t)$ — напряжение на входе усилителя мощности вибростенда; t — время, с

Рисунок В.1 — Входной и выходной сигналы, используемые для расчета переходной характеристики вибростенда

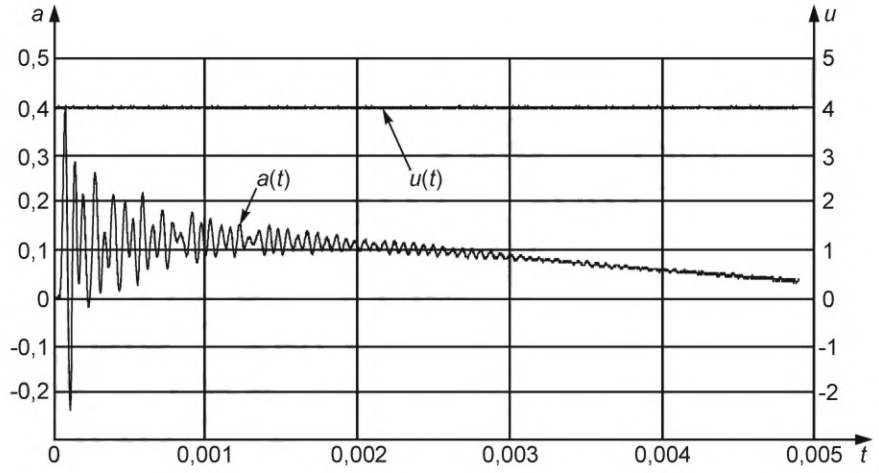
в) регистрируют и анализируют низкочастотный сигнал на столе вибростенда (см. рисунок В.2);



$a(t)$ — ускорение на столе вибростенда; $u(t)$ — напряжение на входе усилителя мощности вибростенда; t — время, с

Рисунок В.2 — Отклик вибростенда в области низких частот

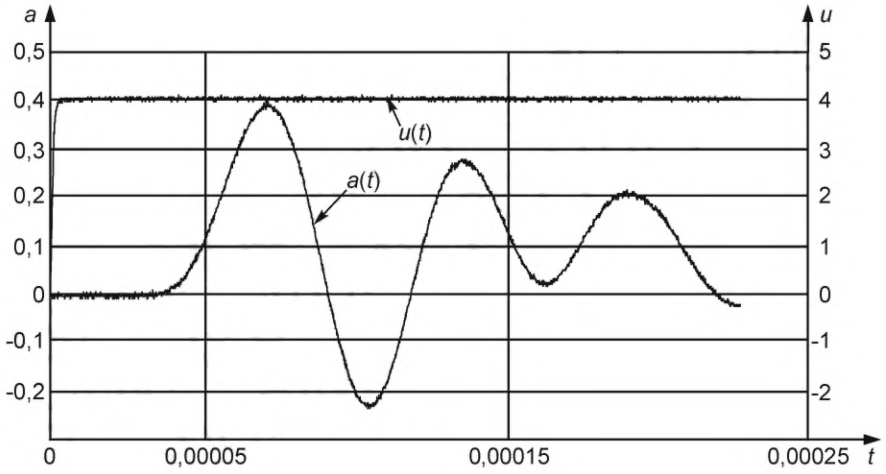
г) регистрируют и анализируют сигнал на столе вибростенда в области средних частот (см. рисунок В.3);



$a(t)$ — ускорение на столе вибростенда; $u(t)$ — напряжение на входе усилителя мощности вибростенда; t — время, с

Рисунок В.3 — Отклик вибростенда в области средних частот

д) регистрируют и анализируют сигнал на столе вибростенда в области высоких частот (см. рисунок В.4);



$a(t)$ — ускорение на столе вибростенда; $u(t)$ — напряжение на входе усилителя мощности вибростенда; t — время, с

Рисунок В.4 — Отклик вибростенда в области высоких частот

е) полученные результаты используют для аппроксимации переходной характеристики вибростенда;

ж) с помощью полученной переходной характеристики через свертку функций рассчитывают отклик вибростенда на произвольный входной сигнал.

Библиография

[1] МЭК 60068-2-27 Испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Часть 2-27: Испытания. Испытание Ea и руководство: Удар (Environmental testing — Part 2-27: Tests — Test Ea and guidance: Shock)

[2] МЭК 60068-2-31 Испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2-31. Испытания. Испытание Ec: Воздействия при грубом обращении, в основном, с образцами аппаратуры (Environmental testing — Part 2-31: Tests — Test Ec: Rough handling shocks, primarily for equipment-type specimens)

[3] МЭК 60068-2-55 Испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2-55. Испытания. Испытание Ee и руководство. Испытание навалочных сыпучих грузов, включая тряску (Environmental testing — Part 2-55: Tests — Test Ee and guidance — Loose cargo testing including bounce)

[4] МЭК 60068-2-75 Испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2-75. Испытания. Испытание Eh: Ударные испытания (Environmental testing — Part 2-75: Tests — Test Eh: Hammer tests)

[5] МЭК 60068-2-81 Испытания на воздействия внешних факторов. Часть 2-81: Испытания. Испытание E. Удар. Синтезированный спектр ударной реакции (Environmental testing — Part 2-81: Tests — Test E: Shock — Shock response spectrum synthesis)

[6] MIL-STD-810D Military standard: Environmental test methods and engineering guidelines (19.07.1983)

[7] ИСО 16063 (все части) Методы калибровки датчиков вибрации и удара (Methods for the calibration of vibration and shock transducers)

УДК 534.322.3.08:006.354 ОКС 17.160

Ключевые слова: вибрационные испытания, вибрационная установка, испытания на удар, выбор испытательного оборудования

Редактор *Е.И. Мосур*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *Е.Д. Дульнева*
Компьютерная верстка *А.Н. Золотаревой*

Сдано в набор 20.03.2019 Подписано в печать 08.04.2019 Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 2,10.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru