МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

Вибрация и удар

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДВИЖНОСТИ

Часть 5

Измерения, использующие ударное возбуждение возбудителем, не прикрепляемым к конструкции

Издание официальное

БЗ 4—99/63

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ
ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ
Минск

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 183 «Вибрация и удар»

ВНЕСЕН Госстандартом России

2 ПРИНЯТ Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 16—99 от 8 октября 1999 г.)

За принятие проголосовали:

Наименование государства	Наименование национального органа по стандартизации
Азербайджанская Республика	Азгосстандарт
Республика Армения	Армгосстандарт
Республика Беларусь	Госстандарт Беларуси
Грузия	Грузстандарт
Республика Казахстан	Госстандарт Республики Казахстан
Киргизская Республика	Киргизстандарт
Республика Молдова	Молдовастандарт
Российская Федерация	Госстандарт России
Республика Таджикистан	Таджикгосстандарт
Республика Узбекистан	Узгосстандарт
Украина	Госстандарт Украины

3 Настоящий стандарт представляет собой аутентичный текст международного стандарта ИСО 7626-5—94 «Вибрация и удар. Экспериментальное определение механической подвижности. Часть 5. Измерения, использующие ударное возбуждение возбудителем, не прикрепляемым к конструкции»

4 Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии от 21 июня 2000 г. № 161-ст межгосударственный стандарт ГОСТ ИСО 7626-5—99 введен в действие непосредственно в качестве государственного стандарта Российской Федерации с 1 января 2001 г.

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

© ИПК Издательство стандартов, 2000

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания на территории Российской Федерации без разрешения Госстандарта России

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Определения 1
4 Общие особенности метода ударного возбуждения 2
5 Опора испытуемой конструкции 4
6 Приложение возбуждения 5
7 Датчики 7
8 Обработка сигналов датчиков 8
9 Контроль правильности измерений 14
Приложение А Коррекция результатов измерений, полученных с использованием экспоненциального окна 15
Приложение В Библиография 16

Введение

Измерение частотных характеристик объекта, таких, как подвижность, ускоряемость или динамическая податливость, проводят, как правило, в целях решения следующих задач:

- оценка реакции объекта на известное входное возбуждение;
- определение модальных характеристик объекта (форм мод, собственных частот и коэффициентов демпфирования);
- описание динамического взаимодействия составных частей конструкций;
- проверка адекватности математических моделей;
- определение динамических свойств (комплексных модулей упругости) материалов.

Все положения настоящего стандарта справедливы для измерений любой частотной характеристики (подвижности, ускоряемости, динамической податливости и т.д.), однако для простоты везде в тексте использовано понятие подвижности. Для перехода от одной частотной характеристики к другой достаточно произвести соответствующие преобразования параметров движения, например виброускорения в виброскорость.

Распространение ударного метода возбуждения конструкции при измерении подвижности обусловлено его простотой и относительно низкой стоимостью реализации. К недостаткам этого метода относится сильная зависимость его точности от характеристик конструкции и испытательного оборудования. В некоторых случаях с помощью данного метода весьма затруднительно или даже невозможно получить точность, достигаемую с помощью непрерывного возбуждения присоединенным вибровозбудителем. Однако в ряде случаев применение ударного метода возбуждения может быть весьма полезным.

То, что в данном методе возбудитель не крепится к конструкции, позволяет проводить серию измерений подвижности, последовательно возбуждая различные точки конструкции и измеряя отклик в одной фиксированной точке и в одном направлении. При выполнении принципа взаимности и линейности отклика исследуемого объекта такие измерения эквивалентны получаемым при возбуждении в той же фиксированной точке и фиксированном направлении и перемещении датчика вибрации по точкам конструкции. В ряде случаев, однако, бывает невозможно нанести удар по конструкции в необходимой точке и желательном направлении. Тогда целесообразно использовать ударное возбуждение в фиксированной точке и направлении и перемещать многокомпонентный датчик вибрации по конструкции.

Следует учесть, что использование многокомпонентного датчика в фиксированной точке не позволяет получить информацию об отклике по разным направлениям в другой точке. Например, при проведении модальных испытаний, при установке измерительного преобразователя в фиксированной точке и применении ударного возбуждения в ряде точек в одном направлении можно получить только одну составляющую моды конструкции.

На основе настоящего стандарта могут быть разработаны методики выполнения измерений механической подвижности с использованием ударного возбуждения для конкретных объектов.

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

Вибрация и удар

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДВИЖНОСТИ

Часть 5

Измерения, использующие ударное возбуждение возбудителем, не прикрепляемым к конструкции

Vibration and shock. Experimental determination of mechanical mobility.
Part 5. Measurements using impact excitation with an exciter which is not attached to the structure

Дата введения 2001—01—01

1 Область применения

Настоящий стандарт служит общим руководством для измерения входной и переходной механической подвижности и других частотных характеристик (ускоряемости, динамической податливости и т.п.) конструкций с помощью возбуждения импульсной силой, развиваемой возбудителем, не прикрепленным к испытуемой конструкции.

Методы возбуждения импульсным воздействием, требующие крепления возбудителя к конструкции, в данном стандарте не рассматриваются.

В настоящем стандарте рассматривается только обработка сигналов на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Это не исключает использования, при необходимости, других методов анализа.

Настоящий стандарт не распространяется на методы получения качественных оценок без проведения калибровки измерительного тракта в целях, например, получения приближенных значений собственных частот или форм мод.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ ИСО 5347-1—96 Вибрация. Калибровка датчиков вибрации и удара. Часть 1. Первичная вибрационная калибровка методами лазерной интерферометрии

ГОСТ ИСО 7626-1—94 Вибрация и удар. Экспериментальное определение механической подвижности. Основные положения

ГОСТ ИСО 7626-2—94 Вибрация и удар. Экспериментальное определение механической подвижности. Измерения, использующие одноточечное поступательное возбуждение присоединенным вибровозбудителем

ГОСТ 24346—80 Вибрация. Термины и определения

3 Определения

В настоящем стандарте применяют термины по ГОСТ 24346.

Кроме того, в настоящем стандарте применяют следующие термины с соответствующими определениями и обозначениями:

3.1 **частотная характеристика объекта**: Отношение комплексной амплитуды отклика к комплексной амплитуде вынуждающей силы как функция частоты.

Издание официальное

Примечания

1 Отклик конструкции может быть выражен в единицах скорости, ускорения или перемещения. В соответствии с этим частотная характеристика называется подвижностью, ускоряемостью или динамической податливостью.

2 При выполнении принципа линейности можно дать эквивалентное определение частотной характеристики как комплексного отношения преобразования Фурье отклика к преобразованию Фурье вынуждающей силы. На практике в качестве приближенного преобразования Фурье используют дискретное преобразование Фурье. Ошибки такого приближения могут быть сведены до уровня, не превышающего других ошибок измерения, поэтому использование ДПФ не приводит к ограничениям на точность измерения.

3.2 **входная (точечная) подвижность,** Y_{jj}: Частотная характеристика, определяемая отношением виброскорости в точке конструкции j к вынуждающей силе, приложенной в той же точке j, когда на другие точки конструкции не наложено никаких дополнительных связей, препятствующих их перемещению, кроме тех, которые определяются нормальным опиранием конструкции, соответствующим условиям ее эксплуатации. Измеряют в метрах на ньютон-секунду [м/(Н·с)].

Примечание — Здесь и далее под словом «точка» понимают как местоположение, так и направление.

3.3 **переходная подвижность,** Y_{ij}: Частотная характеристика, определяемая отношением виброскорости в точке конструкции i к вынуждающей силе, приложенной в точке j, причем на все другие точки конструкции, за исключением точки j, не должно быть наложено никаких дополнительных связей, препятствующих их перемещению, за исключением тех, которые определяются нормальным опиранием конструкции, соответствующим условиям ее эксплуатации. Измеряют в метрах на ньютон-секунду [м/(Н·с)].

3.4 **частотный диапазон измерений**: Диапазон частот от самой низкой до самой высокой частоты, в пределах которого должны быть получены значения подвижности в данной серии измерений.

3.5 **спектральная плотность энергии**: Произведение спектральной плотности мощности на длину записи в секундах, которая используется при вычислении спектра переходного процесса.

Примечание — Данное определение предполагает, что переходный сигнал содержится в записи полностью. Такое уточнение необходимо, для того чтобы значения спектральных составляющих не зависели от длины записи, используемой в конечном преобразовании Фурье.

4 Общие особенности метода ударного возбуждения

4.1 Общее описание метода

Для проведения измерений с использованием ударного возбуждения требуется следующее оборудование:

- ударник с встроенным датчиком силы;
- один или несколько датчиков вибрации с согласующими усилителями;
- система реализации ДПФ-анализа или анализатор, обеспечивающий ввод данных как минимум по двум каналам одновременно.

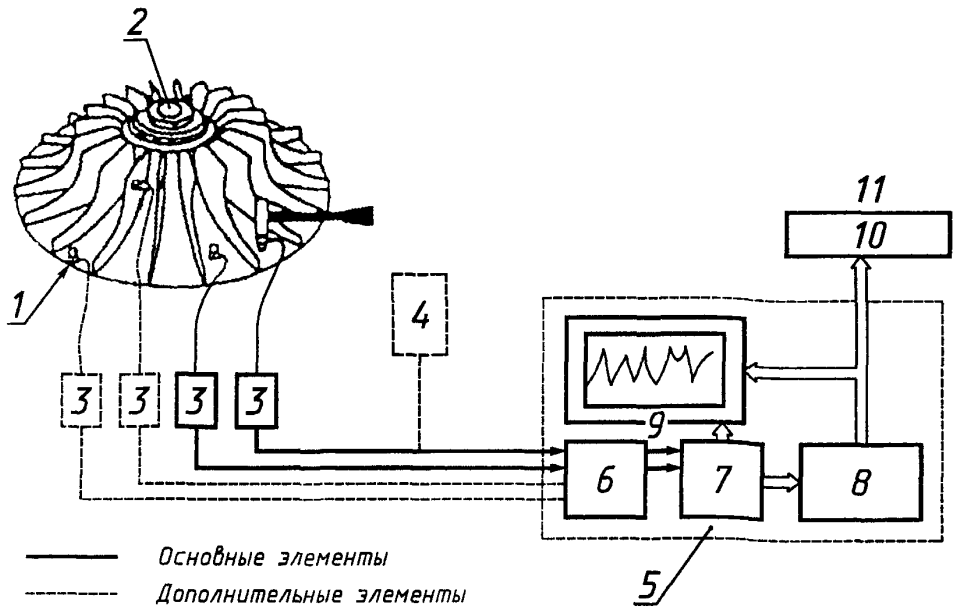
Схема измерительной системы приведена на рисунке 1. В стандарте содержатся рекомендации по выбору и использованию компонентов этой системы.

Сигналы с датчиков силы и вибрации после каждого удара поступают на фильтры нижних частот (ФНЧ), позволяющие избежать переноса высокочастотных составляющих в диапазон частот измерений при дискретизации, после чего производится их аналого-цифровое преобразование (АЦП) для формирования выборки. Каждая цифровая запись должна соответствовать одному ударному воздействию. Для каждой записи вычисляют ДПФ. Для улучшения оценки может быть применено усреднение по частотной области нескольких реализаций частотной характеристики, полученных для одних и тех же точек измерения и возбуждения.

4.2 Преимущества и недостатки метода ударного возбуждения

Ударное возбуждение имеет по сравнению с непрерывным возбуждением посредством прикрепляемого вибровозбудителя следующие преимущества:

- оперативность измерения;
- отсутствие крепления;
- простота переноса возбуждения от точки к точке;
- минимальное влияние на испытуемую конструкцию со стороны возбудителя;



1 — датчик вибрации; *2* — испытуемая конструкция; *3* — устройства согласования; *4* — запоминающий осциллограф; *5* — блок анализа; *6* — ФНЧ; *7* — АЦП; *8* — ДПФ, расчет частотной характеристики; *9* — дисплей; *10* — печатающее устройство; *11* — выходное устройство

Рисунок 1 — Блок-схема измерительной системы

- относительная дешевизна аппаратуры;
- компактность и удобство проведения испытаний в местах и условиях эксплуатации испытуемого объекта.

С другой стороны, следует принимать во внимание недостатки ударного возбуждения:

- возможное влияние нелинейности конструкции;
- уменьшение отношения сигнал/шум;
- ограниченная разрешающая способность по частоте;
- проблемы, вызываемые демпфированием;
- зависимость получаемых результатов от квалификации оператора.

Данные недостатки обсуждены в 4.2.1 — 4.2.5.

4.2.1 Ограничения метода вследствие нелинейности конструкции

Измерения механической подвижности конструкций, обладающих значительной нелинейностью, следует проводить с особой осторожностью. Целесообразно в таких случаях использовать вместо метода ударного возбуждения синусоидальное или случайное возбуждение присоединенным вибровозбудителем.

При осуществлении ударного возбуждения энергия, требуемая для возбуждения отклика достаточного уровня, подводится к конструкции в течение ограниченного периода времени. Поэтому в сравнении с синусоидальным или случайным возбуждением сила, развиваемая при ударе, должна быть много выше, что может способствовать проявлению нелинейности.

При измерениях подвижности систем со значительной нелинейностью важно поддерживать стабильность вынуждающей силы. С этой точки зрения также предпочтительнее синусоидальное возбуждение. Так, при нанесении ударов обычным ручным молотком амплитуда силы может существенно варьироваться, что в условиях нелинейности системы не позволяет обеспечить хорошую повторяемость измерений. Малый диапазон изменения силы между уровнем недовозбуждения и уровнем перегрузки может усложнить получение однозначных и стабильных оценок характеристик конструкции.

4.2.2 Уменьшение отношения сигнал/шум

Поскольку при ударном возбуждении среднее квадратическое значение анализируемого сигнала на интервале измерения переходного процесса мало по сравнению с его пиковым значением, это накладывает требования малости внешнего шума и максимально возможного динамического диа-

пазона измерительной системы. Как правило, такие требования исключают использование аналоговой записи сигнала.

Существенные проблемы, связанные с шумом, могут появиться вследствие того, что длительность импульса силы мала в сравнении с общей длиной записи. При этом собственный электрический шум измерительного тракта и фоновый шум механической природы в конструкции могут быть сравнимы по величине (среднему квадратическому значению) с вынуждающим воздействием и сигналом от датчика силы. Для уменьшения влияния шума может быть использован метод временных окон, описанный в 8.5.

4.2.3 Ограничение разрешающей способности по частоте

Интервал дискретизации по частоте, определяемый дискретным преобразованием Фурье, в герцах, равен величине, обратной длительности записи, в секундах, в том числе и при анализе в ограниченной полосе частот для увеличения масштаба с помощью метода частотной «лупы». Поскольку каждая запись соответствует одному ударному возбуждению, длина записи ограничена временем спада отклика конструкции до уровня фонового шума. Вследствие этого достижимое разрешение по частоте зависит как от отклика конструкции, так и от уровня фонового шума. В некоторых случаях может оказаться весьма затруднительным (и нецелесообразным) достижение такого же частотного разрешения, что и для метода возбуждения присоединенным возбудителем; однако в большинстве практических приложений могут быть получены точные значения подвижности на дискретных частотах с относительно высоким разрешением. Хорошее разрешение получить трудно, если плотность резонансов для испытуемой конструкции велика. В этом случае целесообразно использовать постоянное возбуждение и применить метод увеличения масштаба частоты при анализе.

Особенностью удара является то, что его спектр занимает область от нулевой частоты до некоторой верхней границы (см. раздел 6). Такая протяженность спектра ограничивает возможность использования метода увеличения масштаба для повышения разрешения по частоте, и это определяет требования к динамическому диапазону измерительной системы. Указанное обстоятельство повышает также опасность необнаруженных перегрузок (ограничения сигнала) в измерительной системе вследствие появления маскирующих составляющих с высокими амплитудами на частотах, выходящих за полосу частот системы (см. 6.3 и 8.4).

4.2.4 Проблемы, вызываемые демпфированием

Ограничения метода ударного возбуждения при испытании сильно демпфированных конструкций вызваны малой длительностью сигнала отклика, что, как было указано в 4.2.3, приводит к низкому разрешению по частоте. Это ограничение можно рассматривать и как следствие того, что данной силе удара соответствует отклик с более низкой энергией. Для сильно демпфированных конструкций может потребоваться непрерывное возбуждение с большой энергией, чтобы компенсировать значительное рассеяние энергии и обеспечить достаточный отклик.

Совершенно другая проблема возникает в случае конструкции с малым демпфированием. Частотная характеристика такой конструкции имеет острые резонансные пики, что требует высокого разрешения по частоте и применения метода увеличения масштаба, как указано в 4.2.3. Для таких конструкций полезным может оказаться применение окон с экспоненциальным затуханием, когда в данные вносится заранее известное «искусственное» затухание. При этом для определения подвижности следует воспользоваться методикой коррекции результатов, как описано в 8.5 и приложении А.

4.2.5 Зависимость от квалификации оператора

Точность данных, полученных при измерении подвижности с помощью ударов ручным ударником молоткового типа, зависит от умения оператора наносить стабильные удары в точно определенное место в заданном направлении. Как правило, при тщательном проведении эксперимента влияние этого фактора невелико, но он может сказаться для конструкции малых размеров, требующей высокого пространственного разрешения.

Кроме того, оператор не должен допускать повторных ударов после отскока ударника (см. 6.4).

5 Опора испытуемой конструкции

Измерения механической подвижности могут быть проведены как для конструкций в безопорном (свободно подвешенном) состоянии, так и для конструкций в опертом положении (с использованием одной или нескольких опор) в зависимости от целей испытаний.

5.1 Безопорная конструкция

Измерения в безопорном положении предполагают использование податливого подвеса для

испытуемой конструкции. Значения всех составляющих матрицы входных подвижностей подвеса в точках крепления к конструкции должны по крайней мере в десять раз превышать значения соответствующих составляющих матрицы подвижности конструкции в тех же точках.

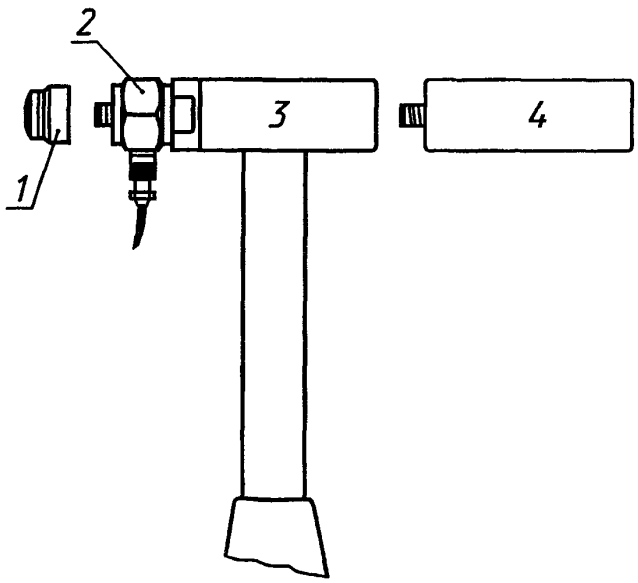
5.2 Конструкция в опертом положении

Данный тип измерений, если иное не определено, предполагает использование для конструкции опоры, аналогичной той, что используется при обычном эксплуатационном применении этой конструкции. В отчет об испытаниях следует включать описание и характеристики опоры и крепления.

6 Приложение возбуждения

6.1 Конструкция ударника

Типичный ударник состоит из жесткой массы с прикрепленным к ней датчиком силы, на другой стороне которого крепят сменную насадку, как схематично изображено на рисунке 2. Жесткость насадки и массу ударника выбирают в соответствии с 6.3 таким образом, чтобы обеспечить необходимую длительность импульса силы и избежать отскоков ударника.



1 — сменная насадка; *2* — датчик силы; *3* — основная масса; *4* — сменная масса

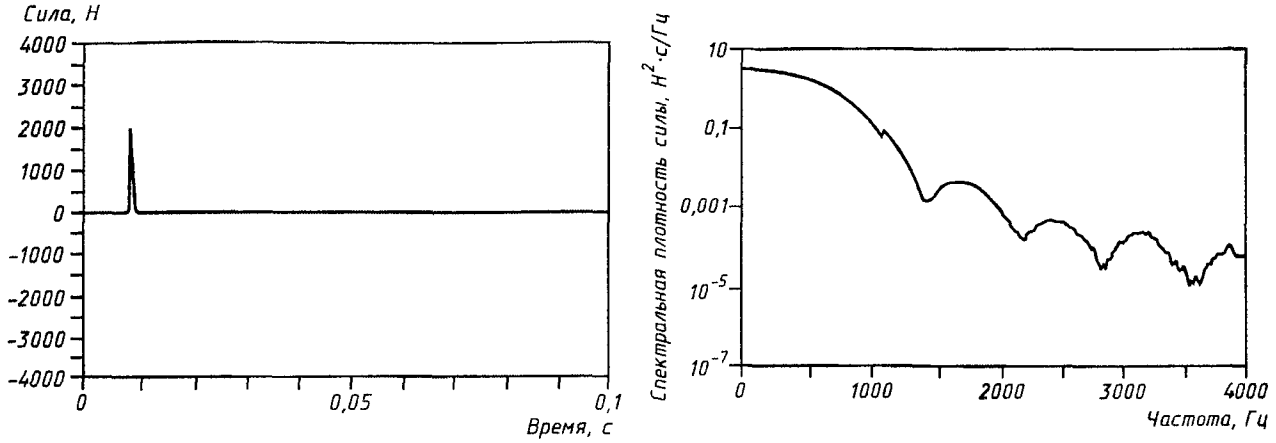
Рисунок 2 — Типичный ударник

Если необходим ударник с малой массой, часто для этих целей используют ударник молоткового типа со сменными насадками и дополнительными сменными массами. Однако следует помнить, что при этом точность измерений будет зависеть от искусства оператора наносить точные удары. Если испытуемая конструкция мала, для обеспечения повторяемости в нанесении ударов в нужной точке и направлении может потребоваться применение направляющего устройства. Для испытаний крупных конструкций, где требуется большая энергия возбуждения, может быть использован ударник в виде большой массы либо подвешенной на тросах, либо свободно падающей вертикально вниз. Масса ударника может быть уменьшена, если для придания ей перед ударом высокой скорости используют дополнительные средства, например пружину, пневматический привод и т.д.

Площадь поверхности ударной насадки должна быть достаточно большой, чтобы удары максимальной силы не приводили к деформациям насадки или испытуемой конструкции. С другой стороны, насадка с малой площадью поверхности необходима, когда требуется очень высокое пространственное разрешение. Направление скорости ударника должно совпадать с осью чувствительности датчика силы и быть перпендикулярным к поверхности испытуемой конструкции с максимальным отклонением в пределах 10 °. Выдержать направление удара, как правило, легче, если длина корпуса ударника велика по сравнению с его поперечными размерами.

6.2 Характеристики спектра силы

Энергия реального импульса силы сосредоточена в конечном диапазоне частот, ширина которого обратно пропорциональна длительности импульса. При этом целесообразно выбирать этот диапазон таким образом, чтобы он не выходил за пределы частотного диапазона измерений. На практике спектр одиночного импульса силы имеет форму главного лепестка на низкой частоте и боковых лепестков на более высоких частотах, чья амплитуда быстро убывает с ростом частоты. На рисунке 3 изображены импульс силы и соответствующая ему спектральная плотность энергии. Практически используемая энергия такого импульса сосредоточена в диапазоне до 1000 Гц в зависимости от частотных характеристик испытуемой конструкции. Обычно учитывают диапазон частот, в котором спектральная плотность энергии спадает до первого минимума.

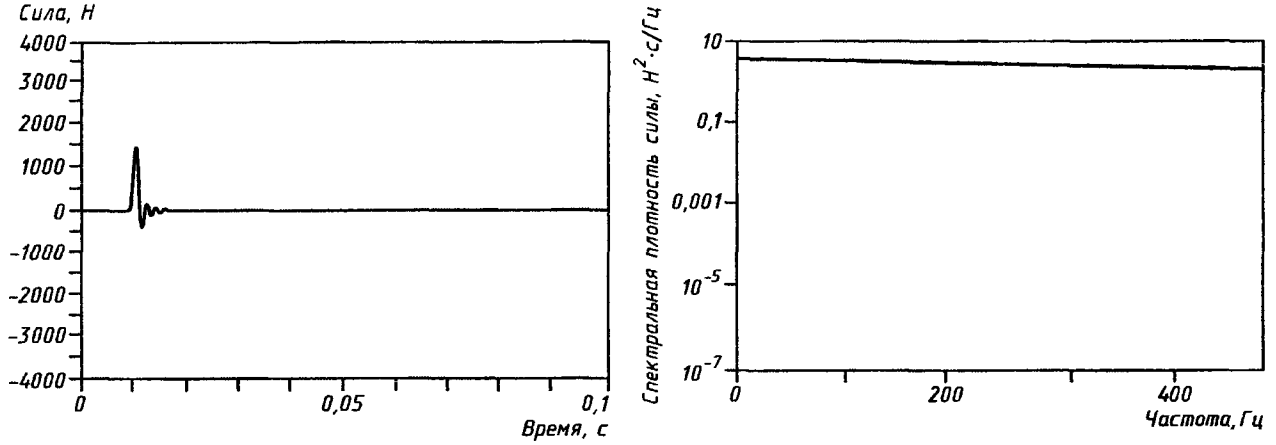


а) Неотфильтрованный сигнал силы

б) Спектральная плотность энергии сигнала силы

Рисунок 3 — Типичный импульс силы и его спектр

Примечание — В ДПФ существует зависимость между разрешением по времени и разрешением по частоте. Для получения максимальной разрешающей способности по частоте необходимо, чтобы частотный диапазон анализатора не превышал максимальную частоту диапазона измерений. Известные соотношения параметров выборки (см. 8.3) исходят из того, что классическая форма импульса силы задается только небольшим числом отсчетов значений уровня, используемых при ДПФ. Кроме того, форма импульса формируется фильтром нижних частот (ФНЧ). Эти факторы делают цифровую запись малопригодной для контроля формы импульса силы при испытании данного вида (если только диапазон анализа не превосходит значительно частотный диапазон, в котором сосредоточена основная энергия импульса). На рисунке 4 показан тот же импульс силы, что и на рисунке 3, но подвергшийся низкочастотной фильтрации. Следует отметить, что плотности энергии обоих импульсов хорошо согласуются между собой, хотя импульс, изображенный на рисунке 4, имеет совершенно другую форму и пиковое значение.



а) Сигнал силы после прохождения ФНЧ (частота среза 625 Гц)

б) Спектральная плотность энергии сигнала силы

Рисунок 4 — Влияние низкочастотной фильтрации на сигнал силы и его спектр

6.3 Выбор частотного диапазона возбуждения

Для того чтобы оптимальным образом использовать динамический диапазон измерительной системы, целесообразно ограничить частотный диапазон возбуждения максимальной частотой измерений. Изменять диапазон возбуждения можно соответствующим подбором жесткости насадки и массы ударника. Уменьшение жесткости насадки и (или) увеличение массы ударника ведут к сужению частотного диапазона возбуждения.

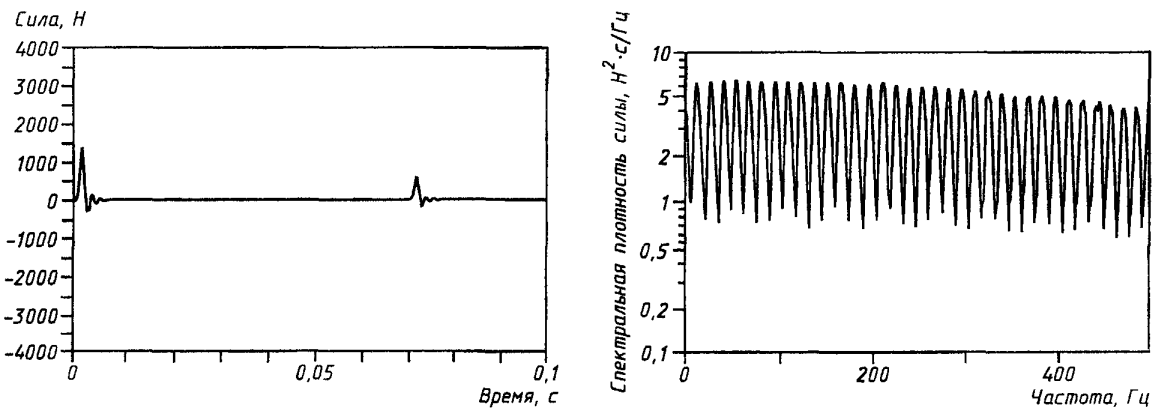
Реально достижимый диапазон частот возбуждения зависит также от эффективной жесткости и эффективной массы конструкции в точке удара. Малая жесткость конструкции приводит к

ограничению возможности расширения диапазона частот за счет увеличения жесткости насадки. Более эффективным средством увеличения частотного диапазона в данном случае является уменьшение массы ударника.

Следует контролировать наличие составляющих спектров удара и отклика выше верхнего предела частотного диапазона измерения. Проверку проводят при возбуждении максимальной силой, используемой при испытаниях. Характеристики ударника должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить возбуждение в требуемом диапазоне частот.

6.4 Предотвращение повторных ударов

Если в пределах одной записи данных имеет место более одного удара, это приводит к уменьшению спектральных составляющих на определенных частотах, в результате чего на графике спектра силы появляются резкие впадины (рисунок 5). На указанных частотах ухудшается соотношение сигнал/шум, что, в свою очередь, может вызвать значительные погрешности в результатах измерения подвижности на этих частотах. Даже если удар по конструкции наносят очень аккуратно, не всегда удается избежать отскоков ударника, особенно если значение подвижности в точке удара велико, а ударник имеет относительно большую массу. Чтобы разрешить эту проблему, следует уменьшить массу ударника, после чего жесткость насадки подобрать таким образом, чтобы выдерживался заданный частотный диапазон возбуждения. Если повторный удар значительно слабее первого, в спектре силы вместо резких впадин будут наблюдаться слабые всплески. Небольшие впадины (до 3 дБ) в спектре силы можно считать допустимыми. Многократные удары проще всего обнаружить из анализа спектра силы в каждой точке нанесения удара. Кроме того, желательно контролировать форму импульса силы во временно́й области; для наблюдения за неотфильтрованным сигналом силы (чтобы избежать маскировки повторных ударов «звоном» от первого удара, производимого фильтром нижних частот) можно применять запоминающий осциллограф.



а) Сигнал силы при наличии повторного удара

б) Спектральная плотность энергии сигнала силы

Рисунок 5 — Влияние повторного удара на спектр силы

Недопустимо для устранения повторных ударов в цифровой записи сигнала силы перед его обработкой с помощью преобразования Фурье использовать так называемое «окно силы» (см. 8.5). Если данное окно применяют для улучшения соотношения сигнал/шум, необходимо убедиться, что это не маскирует имеющие место повторные удары — такая маскировка приведет к погрешности в оценке частотной характеристики, поскольку используемая для расчетов запись отклика конструкции будет представлять собой результат воздействия многократных ударов.

7 Датчики

7.1 Общие сведения

Датчики и устройства согласования и формирования сигналов следует выбирать в соответствии с требованиями ГОСТ ИСО 7626-1 и ГОСТ ИСО 7626-2. Для измерения подвижности с помощью ударного возбуждения особенно важно, чтобы системы преобразования сигнала имели низкий уровень шума и широкий линейный динамический диапазон. Крепление датчиков следует производить с учетом рекомендаций [1].

7.2 Калибровка

В начале и в конце каждой серии измерений, а также в случае изменения массы ударника или смены насадки проводят следующую рабочую калибровку, которая в основном соответствует методике, установленной в ГОСТ ИСО 7626-2.

Калибровку тракта измерения силы выполняют путем измерения подвижности либо ускоряемости свободно подвешенного жесткого калибровочного блока известной массы. Измеренная частотная характеристика калибровочного блока должна соответствовать известному значению (например, для ускоряемости это значение должно быть равно $1/m$, где m — полная масса калибровочного блока вместе с прикрепленными датчиками) в пределах ±5 % во всем диапазоне частот измерения. Коэффициент преобразования при калибровке подбирают таким образом, чтобы соотношение между силой и кинематическим откликом блока, измеренным с помощью датчика вибрации с известным коэффициентом преобразования, было равно известному значению подвижности (или восприимчивости). Предварительная калибровка датчика вибрации может быть осуществлена, например, в соответствии с требованиями ГОСТ ИСО 5347-1.

Аналогично проводят калибровку тракта измерения отклика при использовании дополнительных датчиков вибрации (например, многокомпонентных датчиков). В этом случае считают известным коэффициент преобразования датчика силы, полученный при его калибровке с помощью вышеописанной процедуры.

Измерительная система и ударник должны иметь ту же конфигурацию, что будет использована при измерении подвижности. Массу калибровочного блока следует выбирать таким образом, чтобы его подвижность находилась в диапазоне значений подвижности испытуемой конструкции.

Если в ходе процедуры калибровки не достигается постоянство ускоряемости во всем диапазоне частот измерения, необходимо выявить и устранить причину этого, перед тем как приступить к испытаниям.

8 Обработка сигналов датчиков

8.1 Фильтрация

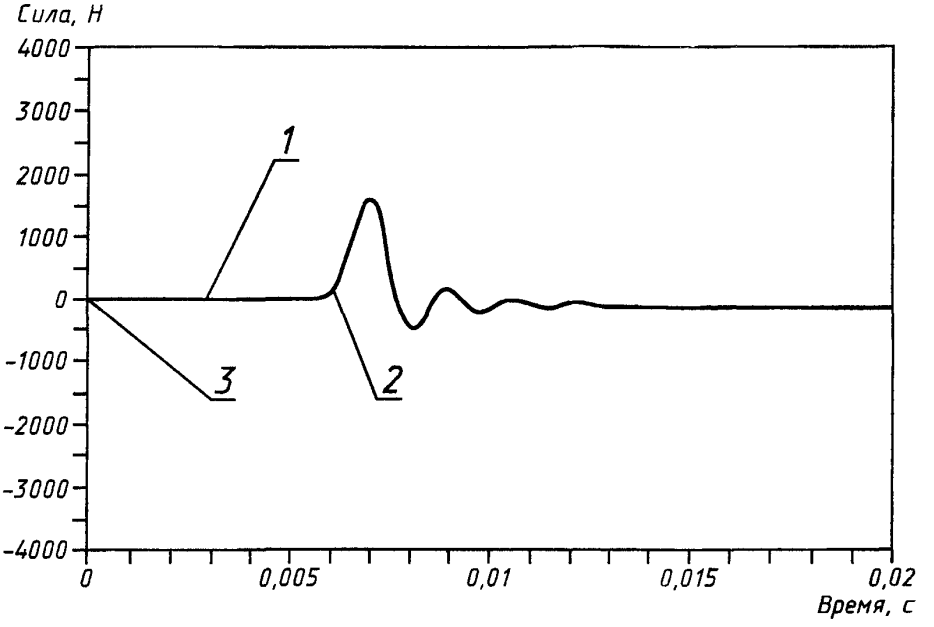
Перед процедурами дискретизации сигнала и его обработки с помощью преобразования Фурье сигналы, полученные с датчиков, должны пройти через фильтр нижних частот для подавления составляющих, лежащих выше частотного диапазона анализа, которые могут быть неправильно интерпретированы при цифровом анализе данных (эффект наложения частот). Большинство современных промышленно выпускаемых анализаторов снабжены встроенными фильтрами, частоты среза которых согласованы с частотными диапазонами анализатора. Качество защиты от эффекта наложения частот можно проверить с помощью высокостабильного генератора сигналов, которые подают на различных частотах вне диапазона измерений на вход анализатора, контролируя получаемые спектры на наличие ложных частотных компонентов внутри этого диапазона.

Другими важными характеристиками фильтров являются коэффициент усиления и согласование фаз в полосе пропускания. При этом важны не сами коэффициенты усиления каналов преобразования сигналов, а их отношение. Процедура калибровки, описанная в 7.2, учитывает эти характеристики так же, как и все другие характеристики измерительной системы. Идентичность каналов может быть проверена отдельно. Для этого на их входы подают один и тот же широкополосный сигнал, случайный или импульсный, после чего измеряют частотную характеристику для каждой пары каналов (соотношение сигналов на их выходах в частотной области). Данная частотная характеристика не должна отличаться более чем на 5 % от единицы во всем диапазоне частот измерения. Фазовая же характеристика не должна отличаться от нуля более чем на 5°.

Для эффективного использования динамического диапазона анализатора целесообразно применять фильтр высоких частот для ослабления составляющих, лежащих ниже диапазона частот измерения. В частности, постоянные составляющие сигналов можно подавить посредством использования входов анализатора по переменному току. Особую важность это приобретает при использовании техники «окон» при обработке сигналов (см. 8.5). Как и в случае низкочастотной фильтрации следует убедиться, что использование высокочастотных фильтров не ведет к амплитудным и фазовым искажениям в диапазоне частот измерения.

8.2 Синхронизация

Запись сигналов, получаемых в результате каждого удара, следует производить в режиме синхронизации анализатора, с тем чтобы начало записи помещалось в начало блока данных анализатора. В цифровой записи сигнала должен содержаться небольшой участок, соответствующий времени непосредственно до удара, что гарантирует качество записи переднего фронта ударного



1 — нулевой участок; *2* — точка запуска внешней синхронизации; *3* — начало цифровой записи

Рисунок 6 — Запись сигнала силы с нулевым участком вначале

возбуждения (см. рисунок 6). Если возможность такой регистрации «предудара» для данного анализатора отсутствует, наилучшим решением будет внешняя синхронизация по неотфильтрованному сигналу силы.

8.3 Соотношения параметров выборки

Каждая цифровая запись, предназначенная для последующей обработки посредством преобразования Фурье, содержит заданное число N равноотстоящих друг от друга дискретных отсчетов отфильтрованного аналогового сигнала. Как правило, для использования эффективных алгоритмов быстрого преобразования Фурье число N берут равным степени числа 2, например 1024. Общая длина записи T определяется формулой

$$T = N \Delta t, \tag{1}$$

где Δt — временно́й интервал между соседними отсчетами. Величина, обратная Δt, называется частотой выборки.

ДПФ позволяет получить $(N/2+1)$ комплексных значений коэффициентов Фурье, которые в частотной области представляют собой дискретный спектр с интервалами между составляющими $\Delta f = 1/T$, расположенный в диапазоне от 0 до частоты Найквиста, равной половине частоты выборки. Чтобы избежать эффекта наложения частот (см. 8.1), частота среза аналогового фильтра нижних частот должна лежать ниже частоты Найквиста с учетом того, что спад частотной характеристики аналогового фильтра не является идеально крутым. Как правило, частота выборки превышает частоту среза фильтра в 2,56...4,0 раза в зависимости от степени крутизны спада частотной характеристики. Для блока данных размером 1024 это дает от 400 до 256 спектральных линий.

В том случае, когда все переходные процессы полностью содержатся в цифровой записи, частотные составляющие ДПФ можно рассматривать как выборку из непрерывного преобразования Фурье исходного сигнала. Отклик линейной конструкции на удар представляет собой сумму синусоид, огибающая которых спадает по экспоненциальному закону, и некоторого фонового шума. Как правило, наилучшие результаты получаются, когда сигнал отклика составляет к концу записи около 1 % первоначального значения. Такое решение можно рассматривать как компромисс: запись большей длины позволит увеличить разрешающую способность по частоте, но увеличивает погрешность обработки за счет уменьшения отношения сигнал/шум; в то же время использование более короткой записи приводит к чрезмерному усечению отклика (эффект, известный как «просачивание» или «утечка» [2]), что также приводит к повышению погрешности обработки.

Из формулы (1) следует, что длину записи можно варьировать, изменяя размер выборки N или частоту выборки. Однако частота выборки определяется в первую очередь требуемым диапазоном частот анализа, поэтому возможность увеличения T за счет уменьшения частоты выборки ограничена. В свою очередь, на выбор числа N могут оказать влияние конструктивные особенности используемого анализатора. Увеличение N может потребоваться, например, при испытании конструкций с малым коэффициентом демпфирования (см. 4.2.4). В этом случае можно рассмотреть две дополнительные возможности:

а) ввести искусственное затухание посредством экспоненциального окна (см. 8.5);

б) использовать режим «увеличения масштаба» анализатора, при котором анализ осуществляют в ограниченном диапазоне частот с одновременным увеличением разрешения по частоте, т.е. уменьшением Δf; это позволяет увеличивать длину записи без изменения N.

8.4 Согласование по динамическому диапазону

При использовании метода ударного возбуждения вследствие большой мощности ударного импульса, в том числе и приходящейся на частоты за пределами диапазона частот измерений, всегда необходимо считаться с возможностью ограничения сигнала измерительной системой (клиппированием). Оптимальное использование динамического диапазона измерительной системы означает, что пиковые значения сигнала должны располагаться максимально близко к уровню ограничения. Рекомендуется контролировать процесс ограничения сигнала с помощью запоминающего осциллографа или, если данный способ не подходит, с помощью Фурье-анализатора. В любом случае диапазон частот анализа должен значительно превышать максимальную частоту сигнала. Такой контроль следует проводить для всех точек конструкции, прежде чем приступать к испытаниям и сбору данных для определения подвижности, причем значение силы удара должно соответствовать максимальному значению, используемому при испытаниях.

Реально контролировать клиппирование можно только после прохождения сигналом некоторого участка измерительной цепи (например, преобразователя с согласующим усилителем). Оценку искажений сигнала на данном участке можно осуществить на основании анализа технических характеристик составляющих его элементов.

Существует несколько возможностей избежать ограничения сигнала, в том числе:

- уменьшить силу удара;
- уменьшить коэффициент усиления согласующего усилителя;
- использовать датчик с более низким коэффициентом преобразования.

8.5 Использование окон

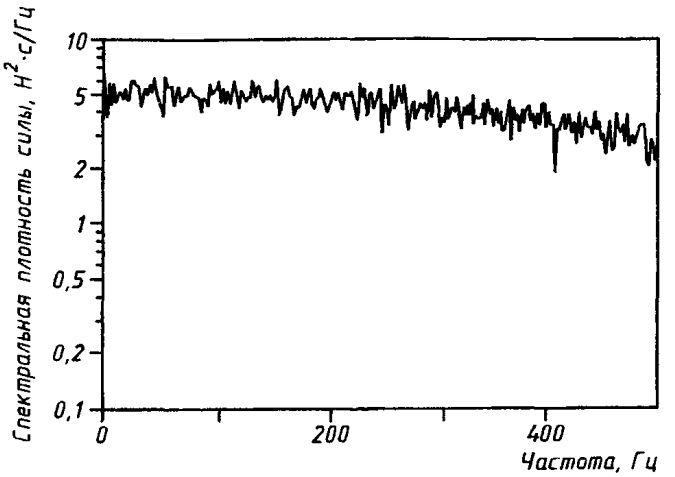
8.5.1 Применение окна силы при анализе сигнала силы

На участке цифровой записи импульс силы занимает очень маленький участок (как правило, менее 1 %), поэтому даже очень слабый шум может вызвать при измерении спектра силы значительные погрешности. Особенно это заметно в случае применения режима увеличения масштаба частоты или использования блока данных большого размера.

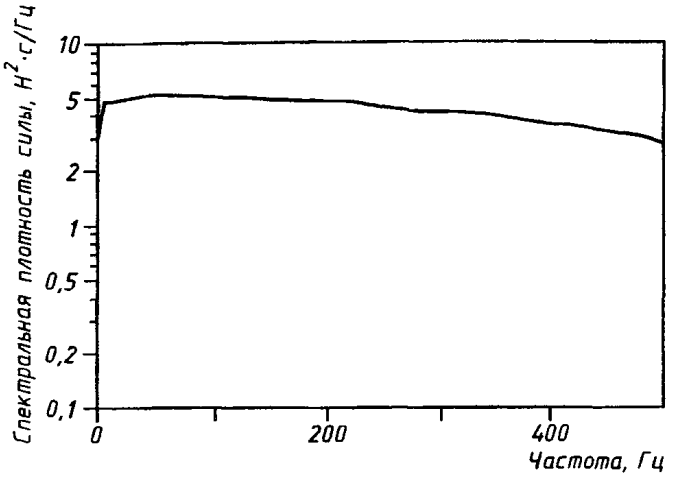
Для уменьшения влияния случайного шума обычно перед обработкой с помощью преобразования Фурье используют умножение оцифрованного сигнала силы на окно силы — весовую функцию, значение которой равно единице на участке записи, включающем в себя сигнал силы с учетом отклика фильтра, и равно нулю на оставшемся участке. Данный способ не ведет к появлению искажений, если шум широкополосный (спектральная плотность энергии типичного импульса с применением окна силы и без него показана на рисунке 7). Если же в записи сигнала содержится значительная постоянная или периодическая составляющая, применение «окна силы» хотя и приведет к уменьшению в спектре сигнала шумовой составляющей, но одновременно вызовет также распределение шумовой составляющей спектра в широкой полосе частот — «просачивание» (см. 8.3) — из-за усечения непрерывного сигнала шума во временно́й области. Вследствие этого эффекта шум, наблюдаемый на частотах за пределами диапазона частот измерений, например на нулевой частоте или на сетевой частоте, в результате применения окна силы может «загрязнить» значительную часть диапазона частот измерений. Полоса распределения шума может быть сужена за счет изменения формы окна таким образом, чтобы переход от единицы до нуля не был слишком резким, однако наилучшим способом будет исключение из сигнала силы всех периодических и постоянных составляющих до умножения на окно силы. На рисунке 8 показан результат применения прямоугольного окна силы в случае периодического аддитивного шума на частоте 60 Гц.

8.5.2 Использование окон при анализе сигналов отклика

Согласно 8.3 значение сигнала отклика в конце цифровой записи должно составлять около 1 % его значения в начале записи. Для проверки этого рекомендуется оценить отношение пикового значения сигнала в средней области записи к его максимальному значению. Это отношение должно



а) Спектральная плотность энергии в отсутствие окна силы

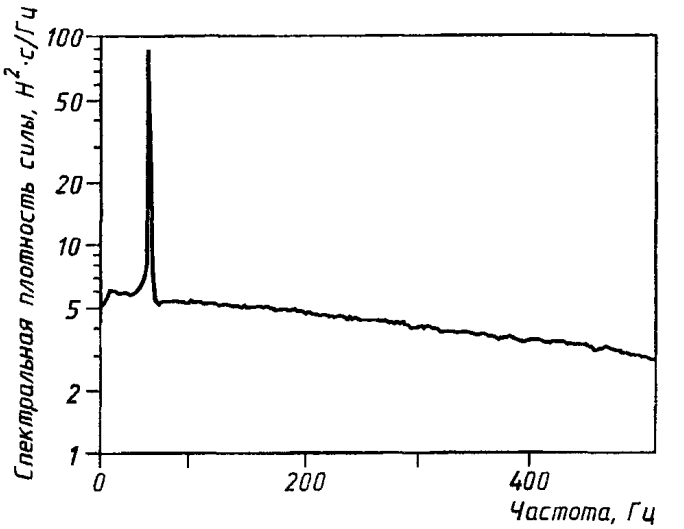


б) Спектральная плотность энергии при использовании окна силы

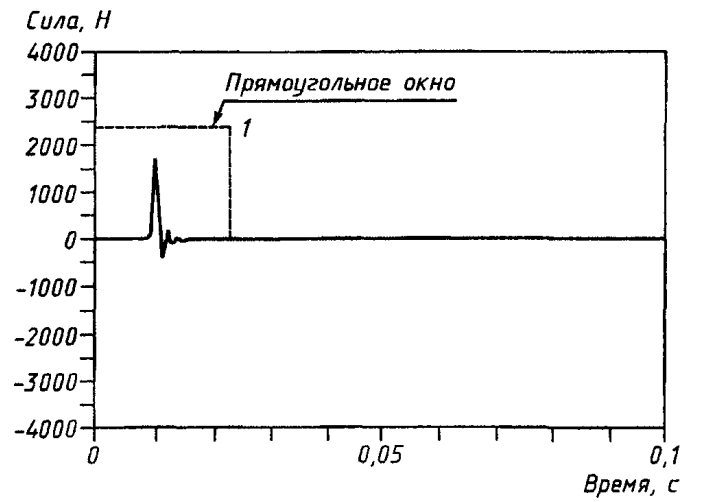
Рисунок 7 — Влияние окна силы на спектр сигнала силы



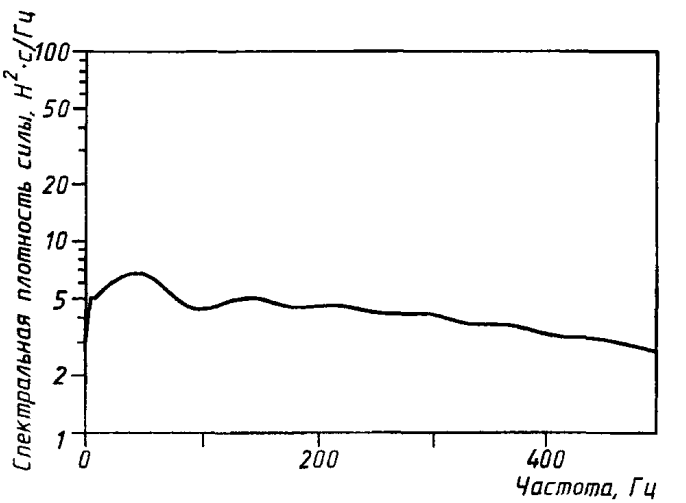
а) Сигнал силы в присутствии периодического шума



б) Спектральная плотность энергии сигнала силы с шумом

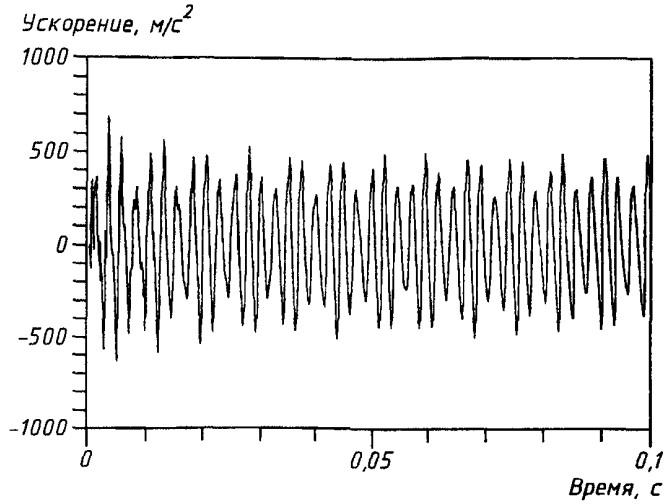


в) Сигнал силы после применения окна силы

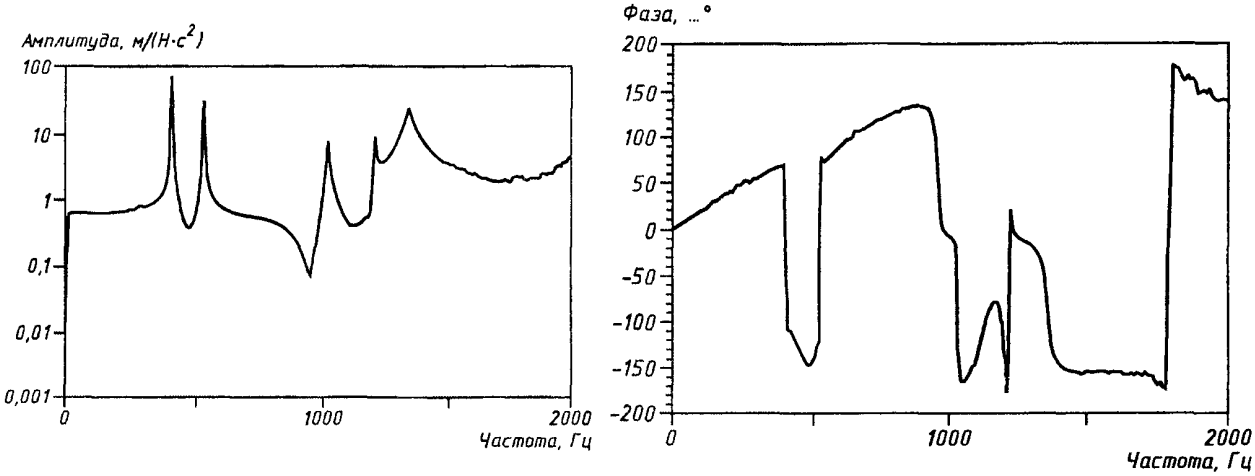


г) Спектральная плотность энергии после применения окна силы

Рисунок 8 — «Просачивание», вызванное применением окна силы



а) Сигнал ускорения



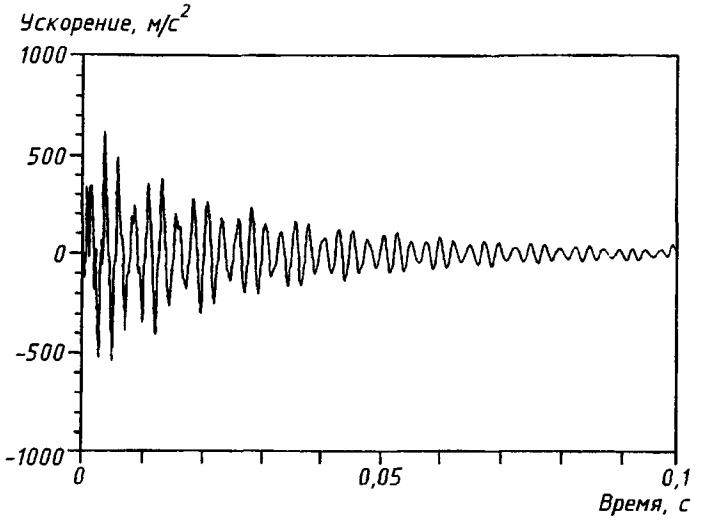
б) Ускоряемость (амплитуда и фаза) в отсутствие окна

Рисунок 9 — Частотная характеристика, измеренная для невзвешенного сигнала

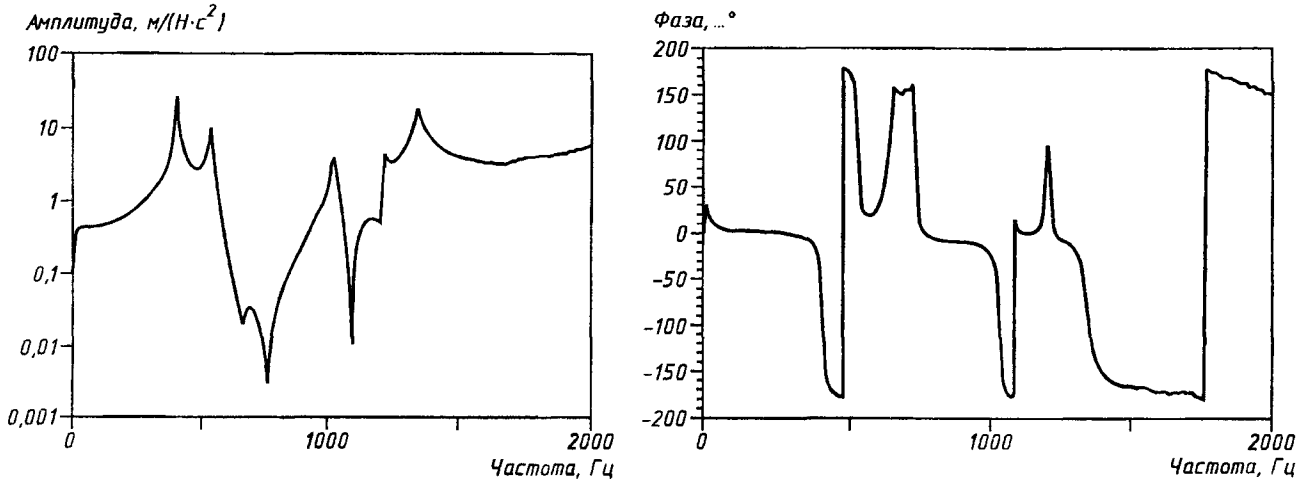
быть равно примерно 0,1. Увеличение этого отношения означает, что имело место усечение сигнала отклика.

Для конструкций с малым демпфированием выполнение указанного условия может оказаться невозможным или нежелательным, поскольку требует значительного увеличения размера выборки или анализа с увеличением масштаба в очень узкой полосе частот. Если такая высокая разрешающая способность по частоте не требуется, целесообразно перед использованием преобразования Фурье ввести в сигнал отклика искусственное затухание, умножая его на весовую функцию, экспоненциально спадающую от единицы в начале записи к некоторому заданному значению в конце.

На рисунках 9 и 10 показаны оценки частотной характеристики конструкции с малым демпфированием соответственно без использования экспоненциального окна и с применением такого окна, когда весовая функция спадает к концу записи до 0,05. Частотная характеристика, изображенная на рисунке 9, имеет все признаки «просачивания» при использовании ДПФ: значительные искажения в фазовом спектре и погрешности сглаживания в амплитудном, т.е. в отсутствие экспоненциального окна возможно получение заниженных значений частотной характеристики на резонансах. Значение такой погрешности невозможно предсказать заранее — оно будет определяться усечением во временной области конкретных мод конструкции. Искажения, присутствующие на рисунке 10, значительно меньше. Хотя и в данном случае значения характеристики на резонансах



а) Сигнал ускорения после применения экспоненциального окна



б) Ускоряемость, полученная после применения окна

Рисунок 10 — Частотная характеристика после применения экспоненциального окна

занижены, их можно скорректировать в соответствии с методикой, содержащейся в приложении А. Принцип этой коррекции заключается в оценке для каждой моды вибрации вначале увеличенного (за счет применения экспоненциального окна) коэффициента демпфирования, после чего истинное значение коэффициента демпфирования определяют, вычитая известное значение поправки.

Метод, связанный с умножением на весовую функцию, достаточно надежен, если в исходной записи отклика спад за счет собственного демпфирования конструкции достигает к концу записи 25 % первоначального значения и менее; в противном случае коррекция амплитудно-частотной характеристики становится весьма чувствительной к погрешностям определения коэффициентов демпфирования.

Применение данного метода может оказаться целесообразным даже в том случае, когда размеры блока данных позволяют полностью записать отклик конструкции, поскольку при этом улучшается отношение сигнал/шум за счет усиления сигнала на начальном участке, где его амплитуда высока.

8.6 Методы усреднения

Для улучшения оценки частотной характеристики рекомендуется производить усреднение данных в частотной области по нескольким ударам. Для этого по отдельности вычисляют усредненный взаимный спектр сигналов отклика и силы и усредненный спектр сигнала силы. Оценка

частотной характеристики определяется как отношение этих усредненных спектров. Усреднение спектров позволяет вычислить также функцию когерентности (см. 9.1).

Если уровень шума невелик, достаточно произвести усреднение по трем-пяти ударам для контроля правильности получения и обработки данных. При наличии некореллированного шума значительной мощности его влияние может быть уменьшено за счет увеличения числа ударов и усреднения по большему числу реализаций. Однако следует иметь в виду, что существенное увеличение числа ударов сводит на нет такое преимущество ударного возбуждения, как быстрота реализации. Поэтому в случае, когда невозможно уменьшить уровень фонового шума, более предпочтительными могут оказаться другие методы возбуждения.

При нанесении каждого последующего удара необходимо убедиться в полном затухании отклика конструкции на предыдущий удар, в противном случае сигнал отклика будет искажен «звоном» от предыдущего удара. Колебания конструкций с малым демпфированием или небольших размеров можно погасить вручную.

9 Контроль правильности измерений

9.1 Функция когерентности

Функция когерентности $\gamma^2(f)$ определяется выражением

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_x(f)\,G_y(f)}, \qquad (2)$$

где $G_{xy}(f)$ — усредненный взаимный спектр между сигналами силы и отклика;

$G_x(f)$, $G_y(f)$ — усредненные спектры сигналов силы и отклика соответственно.

Функция когерентности показывает степень линейной зависимости между откликом и силой для каждой частоты f и изменяется в интервале [0, 1]. Значительное отклонение функции когерентности от единицы может свидетельствовать о низком качестве проведения измерений.

Погрешность оценки функции когерентности зависит как от ее собственного истинного значения, так и от числа реализаций, по которым проводили усреднение. Для высоких значений функций когерентности (0,9 и более) требуемая точность оценки может быть достигнута усреднением всего лишь по нескольким реализациям (от пяти до десяти) [2].

Возможными причинами низкой когерентности при испытаниях с использованием ударного возбуждения являются:

- шум в сигнале силы;
- шум в сигнале отклика;
- случайные изменения точки и направления приложения силы от удара к удару;
- нелинейное поведение конструкции.

Особо следует отметить падение значений функции когерентности на антирезонансах. Это может являться следствием того, что отклик конструкции на данных частотах приближается к уровню собственного шума измерительной системы и отношение сигнал/шум резко уменьшается.

Наличие шума в канале измерения отклика хотя и приводит к уменьшению значения функции когерентности, позволяет, тем не менее, получить достаточно точную оценку частотной характеристики за счет достаточно большого числа усреднений (см. ГОСТ ИСО 7626-2, приложение А).

Уменьшение шума в каналах измерения силы и отклика может быть осуществлено путем выбора соответствующего окна, как указано в 8.5.

Следует иметь в виду, что некоторые погрешности в проведении измерений могут быть не выявлены с помощью функции когерентности. К ним относятся:

- «просачивание» вследствие усечения отклика (неадекватное разрешение по частоте);
- некоторые виды нелинейности конструкции;
- ограничение сигнала (клиппирование).

9.2 Контроль воспроизводимости

После завершения испытаний следует повторно провести хотя бы одно из начальных измерений с целью удостовериться в том, что результаты измерений в начале и в конце серии испытаний хорошо согласуются между собой. Эта проверка помогает выявить такие проблемы, как изменение самой

конструкции или граничных условий, влияние температуры, изменения коэффициента преобразования измерительного тракта.

9.3 Проверка выполнения принципа взаимности

Из принципа взаимности следует, что для линейной конструкции подвижность между двумя точками конструкции не зависит от того, к какой точке приложено возбуждение, а в какой измерен отклик, и сохраняется при перемене точек возбуждения и измерения местами. Если проверка этого принципа дает удовлетворительный результат, это является дополнительным подтверждением правильности проведения измерений; отклонение же от принципы взаимности может говорить о таких проблемах, как чрезмерная локальная нагрузка легкой конструкции датчиком (или датчиками) или наличие определенных видов нелинейности.

9.4 Контроль линейности

Для выявления многих типов нелинейности рекомендуется повторить процедуру измерения подвижности для различных значений амплитуды возбуждения. Желательно, если это возможно, увеличить вынуждающую силу последовательно, как минимум, в десять раз и рассмотреть любые значительные отклонения в результатах измерения подвижности.

9.5 Сравнение с измерениями, при которых применяют прикрепляемый возбудитель

Такой вид проверки требует значительных дополнительных затрат, связанных с необходимостью использования другого оборудования, затратами времени на его установку и проведение измерений. Поэтому рекомендуется его использование только в тех случаях, когда есть сомнения в пригодности метода ударного возбуждения для испытаний конкретной конструкции.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

Коррекция результатов измерений, полученных с использованием экспоненциального окна

Умножение сигнала на экспоненциальную весовую функцию применяют для уменьшения влияния погрешностей «просачивания» и шума на результаты измерения частотной характеристики с помощью ударного возбуждения. Поскольку результаты оценки частотной характеристики по «взвешенным» данным существенно отличаются от ее истинных значений, для коррекции результатов измерений следует использовать нижеприведенную методику. Эта методика позволяет получить удовлетворительные результаты при выполнении следующих условий:

- линейное поведение конструкции;
- измерение коэффициентов демпфирования каждой моды, реально возбуждаемой в диапазоне частот измерений, по «взвешенным» данным может быть проведено с достаточной точностью.

Задача собственно определения коэффициентов демпфирования по результатам измерения подвижности путем различных методов подгонки кривых относится к сфере модального анализа и в настоящем стандарте не рассматривается.

Пусть линейная система, описывающая связь отклика $x(t)$ с вынуждающей силой $y(t)$, определяется импульсной характеристикой $h(t)$. Тогда для нулевых начальных условий (конструкция до удара находится в состоянии покоя) применима следующая формула:

$$x(t) = \int_0^t h(u)y(t-u)du. \qquad (A.1)$$

В результате умножения обеих частей уравнения (А.1) на e^{-at} получаем

$$x(t)e^{-at} = \int_0^t h(u)e^{-au}y(t-u)e^{-a(t-u)}du. \qquad (A.2)$$

Из уравнения (А.2) видно, что при умножении сигналов силы и отклика на одну и ту же экспоненциальную весовую функцию импульсная характеристика, связывающая эти два «взвешенных» сигнала, представляет собой произведение истинной импульсной характеристики линейной системы и той же самой экспоненциальной функции.

Импульсную характеристику линейной системы можно представить в виде суммы членов вида $A_r\exp(s_r t)$, где s_r — комплексное число, действительная и мнимая части которого определяют соответственно скорость

затухания и собственную частоту с учетом демпфирования для r-й моды вибрации, а A_r — комплексная постоянная. Таким образом, в результате умножения на экспоненциальную функцию в импульсной характеристике происходит замена s_r на $(s_r—a)$.

Пусть в результате измерений частотной характеристики с использованием экспоненциального взвешивания и последующей обработки для r-й моды получена оценка коэффициента демпфирования $\hat{\zeta}_r$. Тогда истинное значение коэффициента демпфирования ζ_r определяют по формуле

$$\zeta_r = \hat{\zeta}_r - a/\omega_r, \qquad \text{(A.3)}$$

где ω_r — собственная частота системы с учетом демпфирования.

Коррекция значений подвижности осуществляется посредством синтеза с учетом полученных по формуле (А.3) значений коэффициентов демпфирования для всех мод, дающих вклад в колебание конструкции в диапазоне частот измерений. В случае далеко разнесенных мод с малым демпфированием значение частотной характеристики на резонансе обратно пропорционально коэффициенту демпфирования, поэтому коррекция частотной характеристики, полученной на основе «взвешенных» данных, в области резонанса будет заключаться в ее умножении на коэффициент $\hat{\zeta}_r/\zeta_r$.

На практике экспоненциальное взвешивание часто применяют только к сигналу отклика. Вследствие малой длительности сигнала силы действие экспоненциального окна можно аппроксимировать умножением сигнала силы на постоянную, равную значению весовой функции в момент максимального значения силы. Если пик импульса расположен вблизи начала цифровой записи, то такой постоянной из-за ее близости к единице можно пренебречь. Если для рабочей калибровки по 7.2 применяется такое же окно и в цифровой записи используется такой же участок «предудара», что и в процессе измерения подвижности, учет воздействия окна является составной частью калибровки тракта измерения силы.

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(справочное)

Библиография

[1] ИСО 5348—98 Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров
[2] Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. — М.: Мир, 1974. — 464 с.

УДК 534.1:006.354 МКС 17.160 Т34 ОКСТУ 0011

Ключевые слова: конструкции, экспериментальные исследования, частотная характеристика, вибрация, вынуждающая сила, возбуждение, вибровозбудители, управление, датчики, сигналы, измерительная система, обработка, контроль

Редактор *Л.В. Афанасенко*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *М.И. Першина*
Компьютерная верстка *С.В. Рябовой*

Изд. лиц. № 02354 от 14.07.2000. Сдано в набор 10.07.2000. Подписано в печать 22.09.2000. Усл.печ.л. 2,32. Уч.-изд.л. 2,07. Тираж 253 экз. С 5896. Зак. 823.

ИПК Издательство стандартов, 107076, Москва, Колодезный пер., 14.
Набрано в Издательстве на ПЭВМ
филиал ИПК Издательство стандартов — тип. "Московский печатник", 103062, Москва, Лялин пер., 6.
Плр № 080102

gost.e-ecolog.ru