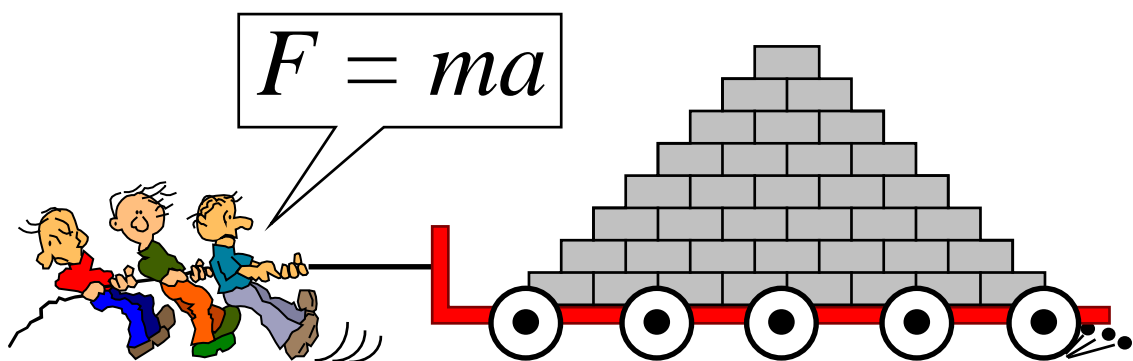


Ричард Бейкер
Введение в теорию
виброиспытаний



СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА	4
РАЗДЕЛ 1. ОБЩЕЕ ВВЕДЕНИЕ В ВИБРАЦИЮ	5
ВВЕДЕНИЕ	5
Вибрационная испытательная система	5
Режимы виброиспытаний	5
Объект испытаний	5
ДЛЯ ЧЕГО НУЖНЫ ВИБРОИСПЫТАНИЯ?	6
ЧТО ТАКОЕ ВИБРАЦИОННАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА?	7
Как работает вибратор?	7
Что делает усилитель?	9
Что делает контроллер?	9
Стратегия управления	11
ИСПЫТАНИЯ СИНУСОИДАЛЬНЫМ СИГНАЛОМ	11
ОКТАВЫ И СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ	15
ЧТО ТАКОЕ СЛУЧАЙНАЯ ВИБРАЦИЯ?	16
Для чего нужно знать суммарное ускорение при случайной вибрации?	19
Что понимается под перемещением при случайной вибрации?	20
Практические аспекты выбора значения пик-фактора	21
Внеполосовая мощность	21
Узкополосная случайная вибрация	21
ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ	21
КАК ВЛИЯЕТ ВИБРАЦИЯ НА МОЮ ПРОДУКЦИЮ?	22
Резонанс	23
ИЗОЛЯЦИЯ ВИБРАТОРА	25
ОПРОКИДЫВАЮЩИЙ МОМЕНТ	27
РАЗДЕЛ 2. КАК ВЫБРАТЬ ВИБРАЦИОННУЮ ИСПЫТАТЕЛЬНУЮ СИСТЕМУ	29
ВВЕДЕНИЕ	29
Первоочередные требования	29
Дополнительные требования	29
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ: Синусоидальная вибрация	31
Испытания скользящей синусоидой	31
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ: Случайная вибрация	33
Испытания случайной вибрацией	33
ПАРАМЕТРЫ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ВИБРАЦИИ	35
Согласующий трансформатор	35
Ограничения на низких частотах	36
Ограничения на высоких частотах	36
Ограничения по максимальному ускорению	36
ПАРАМЕТРЫ СЛУЧАЙНОЙ ВИБРАЦИИ	37
	2

ПАРАМЕТРЫ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ	39
Общие положения	39
РАЗДЕЛ 3. ТЕРМИНОЛОГИЯ	41

Предисловие автора

В этой брошюре сделана попытка в относительно простой форме рассказать о таком сложном инженерном приложении как вибрационные испытания. Я старался избегать всего, что могло бы усложнить понимание предмета, в том числе и математики, которая лишь доказывает, но не объясняет. Пуристу такой подход может показаться сильно упрощенным, но надеюсь, что читатель, впервые приступающий к виброиспытаниям, найдет здесь для себя много полезного.

Ричард Бейкер
1994

РАЗДЕЛ 1. ОБЩЕЕ ВВЕДЕНИЕ В ВИБРАЦИЮ

ВВЕДЕНИЕ

Вибрационные испытания являются предметом, который на первый взгляд может показаться простым и понятным. Однако, как мы увидим, это обширная, требующая навыков и опыта инженерная дисциплина. Эта брошюра даст общее представление о виброиспытаниях, об их некоторых особенностях, с которыми вы можете столкнуться на практике.

Для проведения виброиспытаний необходимо иметь три вещи:

- Вибрационную испытательную систему (вибростенд)
- Режимы виброиспытаний (спецификация испытаний)
- Объект испытаний

Вибрационная испытательная система

Как и любое другое испытательное оборудование, ваша вибрационная система имеет свои предельные эксплуатационные параметры, например, максимальное перемещение стола. Это одно из многих ограничений, которые должны учитываться перед началом любого испытания. При превышении предельных параметров можно ожидать сокращение ресурса вибрационной системы. Представьте себе автомобиль: чем активнее ваш стиль вождения, тем чаще он нуждается в техническом обслуживании. Поэтому существенно, чтобы вы знали и понимали предельные возможности своей системы.

Режимы виброиспытаний

Существуют, вероятно, тысячи режимов виброиспытаний. Несмотря на это, всегда следует задаваться вопросом: соответствует ли это испытание моей продукции и будут ли результаты испытания удовлетворительными? Такой вопрос следует ставить всегда, так как существует высокая вероятность того, что наш объект испытаний может быть недогружен или перегружен.

Объект испытаний

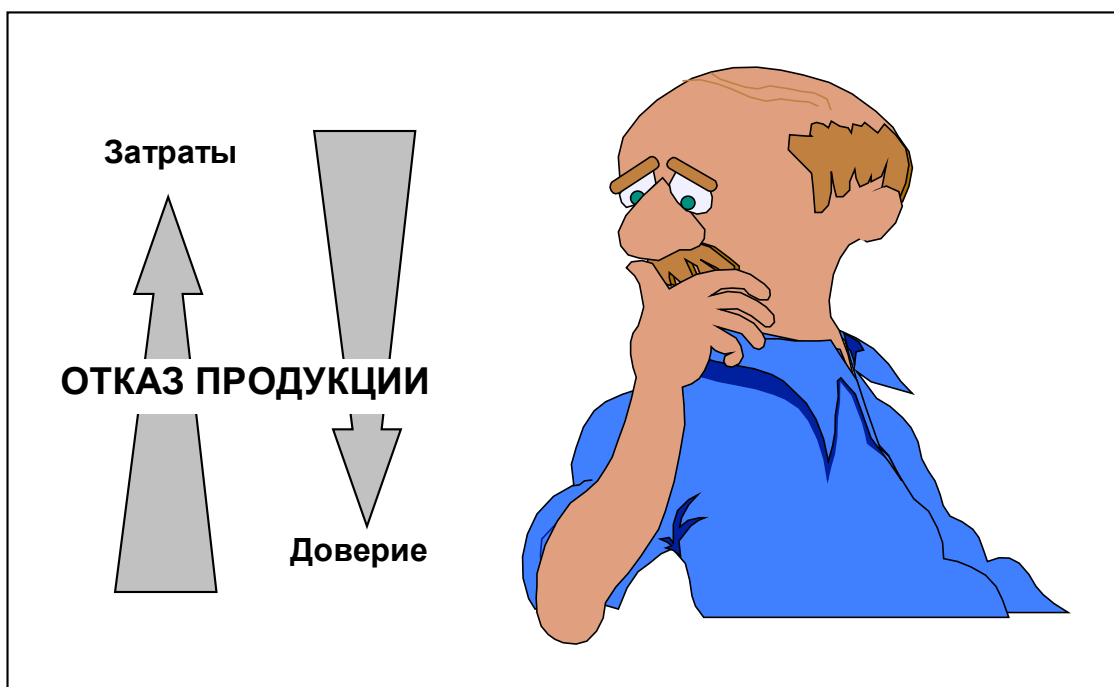
Испытываемый объект должен крепиться к столу вибратора. Это осуществляется при помощи приспособления (оснастки). Оснастка должна передавать вибрацию от стола к объекту испытаний без искажений, неблагоприятно влияющих на результаты испытаний. Хотя это и кажется простой вещью, но на самом деле это далеко не так. Конструирование оснастки требует времени и знаний.

Вибрацию, передаваемую испытываемому образцу, нужно задавать и измерять. Измерения проводятся обычно с помощью одного или более акселерометров, но где и как должны быть

установлены акселерометры является важным моментом и его нужно учитывать при разработки стратегии испытаний.

ДЛЯ ЧЕГО НУЖНЫ ВИБРОИСПЫТАНИЯ?

Покупателям нужны качественные и надежные товары. Чтобы удовлетворить эти требования, мы должны учитывать то, что наша продукция в течение срока службы так или иначе будет подвергаться действию вибрации. Отказы неудачно спроектированной конструкции разочаруют покупателя, а это в свою очередь вызовет возрастание затрат и снижение доверия к фирме и ее продукции.



Некоторые причины проведения вибрационных испытаний

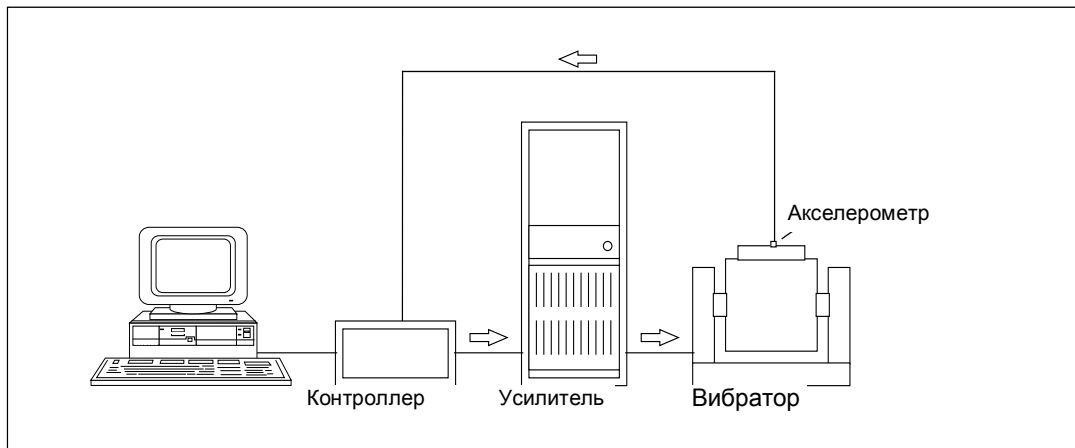
- Уменьшается время разработки продукции
- Гарантируется то, что новая продукция будет соответствовать своему назначению
- Уменьшаются затраты на доработку продукции не прошедшей контроль качества
- Уменьшаются повреждения при транспортировке с последующим отказом заказчика от покупки
- Уменьшаются возвраты из-за невыполнения гарантийных обязательств
- Уменьшаются судебные издержки и возмещенные убытки, вызванные неправильной работой продукции
- Поддерживается хорошая репутация компании и ее продукции
- Сохраняется прибыль

Виброиспытания повышают конкурентноспособность вашей продукции на мировом рынке

ЧТО ТАКОЕ ВИБРАЦИОННАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА?

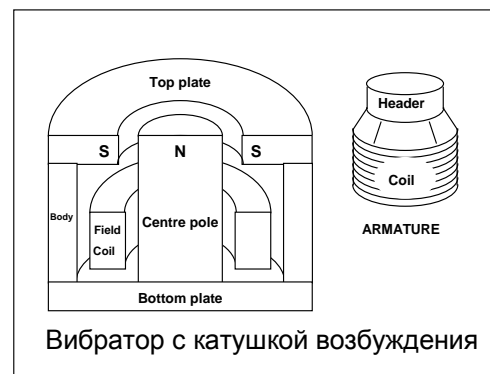
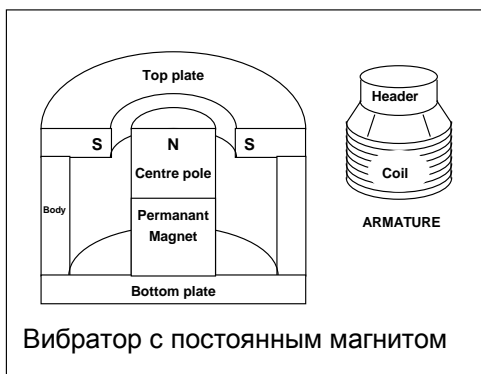
Важнейшими компонентами вибрационной испытательной системы являются:

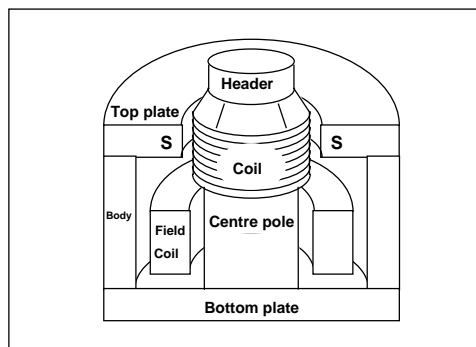
- Вибратор
- Усилитель
- Контроллер
- Акселерометр



Как работает вибратор?

По принципу работы вибратор похож на громкоговоритель, у которого движение катушки (арматуры) происходит в результате взаимодействия двух магнитных полей: переменного и постоянного. Переменное магнитное поле наводится протекающим по катушке ток. Постоянное поле создается постоянным магнитом в небольших вибраторах или электромагнитом в больших вибраторах. Обмотку электромагнита обычно называют обмоткой или катушкой возбуждения.



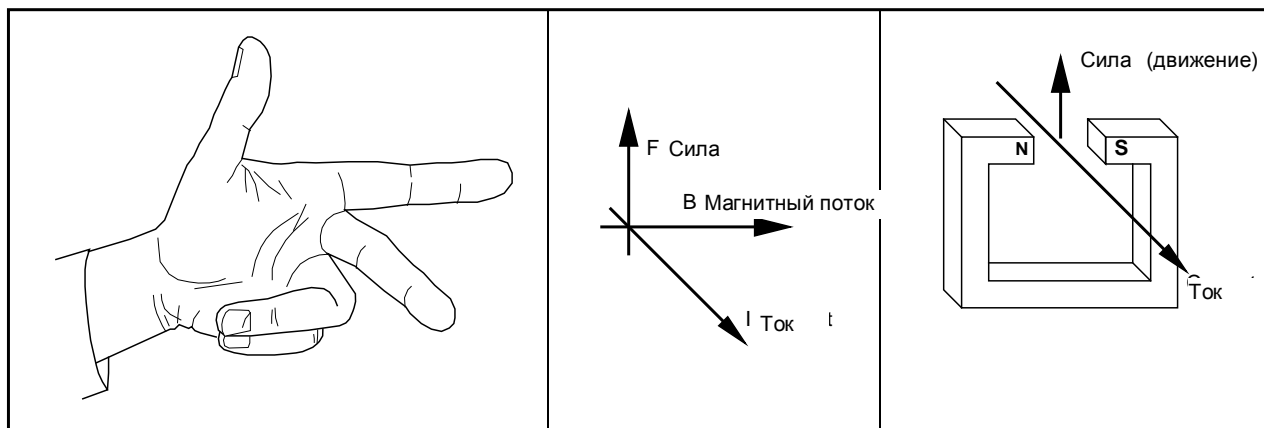


Толкающая сила, создаваемая вибратором, пропорциональна силе тока в обмотке подвижной катушки, плотности магнитного потока в воздушном зазоре магнитной системы и длине обмотки катушки. Для определения величины силы можно пользоваться следующей формулой:

$$F = B I L$$

Где: F = сила, Н [Ньютон]
 B = плотность магнитного потока, Тл [Тесла]
 I = ток, А [Ампер]
 L = длина, м [метр]

Направление действия силы определяется по правилу левой руки:



Конструирование вибратора, у которого armатура будет просто ходить вверх-вниз, сложностей не представляет. Основные задачи, на решение которых уходит большая часть времени заключаются в следующем:

- сведение к минимуму вращательного и поперечного движения armатуры (подвижной части)
- конструирование armатуры, которая была бы очень легкой и в то же время очень прочной

Как эти условия выполняются на практике – тема, выходящая за рамки данной брошюры. Можно только отметить, что опыт, знания и самые новейшие технологии играют в этом процессе главную роль.

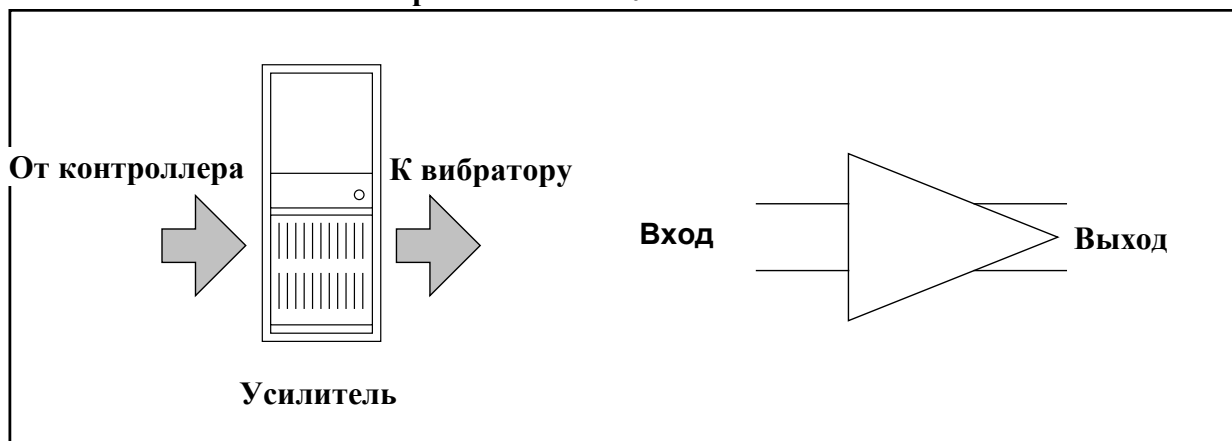
Что делает усилитель?

Назначение усилителя – подвести необходимую мощность к подвижной катушке вибратора в виде напряжения и тока. Чем больше требуемая скорость движения арматуры, тем больше нужно напряжение. Чем больше требуемая сила или ускорение, тем больше нужен ток.

Скорость \propto **Напряжение**

Сила \propto **Ток**

Ускорение \propto **Ток**



Усилитель DPA10K фирмы LDS мощностью 10 кВт имеет максимальное выходное напряжение 100 В скв. и обеспечивает выходной ток 100 А скв., т.е. $100 \text{ В} * 100 \text{ А} = 10000 \text{ ВА}$ (10 кВт). Если коэффициент усиления по напряжению усилителя равен 100, то при входном сигнале 1 В скв. выходное напряжение составит 100 В скв., а максимальный уровень выходного напряжения будет:

$$100 \text{ В скв.} = 141.4 \text{ В ампл.}$$

Это справедливо для синусоидального сигнала, у которого отношение амплитудного значения к среднеквадратическому (скв) значению равно $\sqrt{2}$ (1.414213562). Это отношение называется пик-фактором (амплитудным коэффициентом, коэффициентом формы).

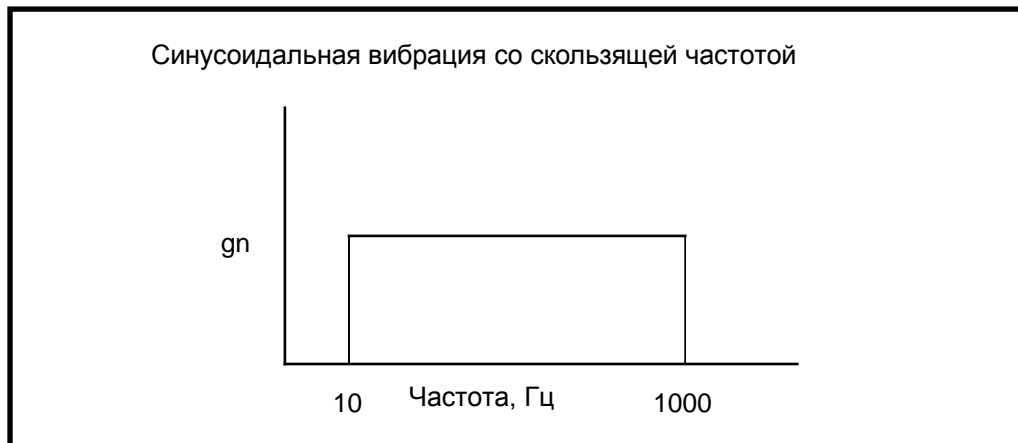
При случайном сигнале необходимо обеспечить пик-фактор для тока равный 3, т.е. отношение амплитуды к среднеквадратическому значению равное 3. Поэтому усилитель должен обеспечивать выходной ток в 3 раза больше максимального среднеквадратического значения. Таким образом, хотя усилитель DPA10K имеет максимальный выходной ток 100 А скв. он может отдавать в нагрузку ток амплитудой до 300 А.

Что делает контроллер?

Назначение контроллера вибрации – следить за тем, чтобы сигнал, получаемый с акселерометра, соответствовал сигналу, запрограммированному в контроллере, другими словами, нагружение испытываемого образца должно соответствовать заданным режимам испытаний. Режимы испытаний вводятся в контроллер оператором. Контроллер сравнивает

выходной сигнал акселерометра с табличным значением и вносит коррекцию, чтобы оба сигнала стали равными. Система работает как система с обратной связью. В действительности алгоритм управления гораздо сложнее, чем это представлено, главным образом из-за нелинейности объекта испытаний и оснастки для его крепления на столе вибратора.

Рассмотрим для примера испытание синусоидальным сигналом со скользящей частотой.



Мы имеем дело с сервосистемой, а сервосистемы существенно нестабильны, так как всегда стремятся поддержать заданный уровень управления, то есть исправить ошибку.

В процессе коррекции ошибки сервосистемы могут:

- реагировать слишком быстро (низкое демпфирование)
- реагировать слишком медленно (высокое демпфирование)

Разные конструкции объектов испытаний и оснастки имеют резонансы разной формы и на разных частотах. Хотя все контроллеры синусоидальной вибрации могут изменять свою частотную характеристику для компенсации этого эффекта, вы никогда не сможете осуществить идеальное управление во всем частотном диапазоне. Процесс управления - это всегда компромисс.

Другим моментом, который нужно учитывать, является то, что получаемый контроллером сигнал на резонансных частотах вряд ли будет чистой синусоидой, это будет сигнал, содержащий гармоники.



Большинство контроллеров измеряют сигнал акселерометра в амплитудных или в среднеквадратических значениях, которые преобразуются затем в амплитудные значения. Все это говорит о том, что выполнить точное управление трудно не только из-за реакции сервосистемы, но и из-за того, что сигнал коррекции ошибки имеет искажения. Не вдаваясь далее в проблемы управления, я думаю достаточно сказать, что управление – это не простая вещь. Чем сложнее конструкция, тем сложнее становится управление. Поэтому следует рассмотреть стратегию управления, чтобы вы могли получить желаемый результат.

Стратегия управления

При разработке стратегии управления необходимо ответить на вопросы: "Что я пытаюсь достигнуть или смоделировать?", "Нужно ли мне многоканальное управление?", "Нужно ли контролировать поперечное движение?" и т.д. Проще говоря, у вас есть режим (спецификация) испытаний с заданными уровнями вибрации. Вы должны определить, в каком месте эти уровни вибрации нужно реализовать. Может показаться, что лучше всего установить акселерометр наверху вашего образца. Не делайте этого! Ваш образец действует как набор пружин и демпферов. Основное правило – это располагать акселерометр как можно ближе к поверхности стола и к его центру. Если образец имеет сложную конфигурацию, подумайте о многоканальном управлении с усреднением управляющего сигнала. Это не изменит динамических свойств вашего образца, но даст вам возможность управлять процессом его нагружения.

ИСПЫТАНИЯ СИНУСОИДАЛЬНЫМ СИГНАЛОМ

Одним из самых распространенных методов проведения испытаний является метод испытания синусоидальным сигналом. При этих испытаниях, как следует из названия, сигнал управления вибратором имеет форму синусоиды, частота которой изменяется по времени. Уровень или амплитуда сигнала может задаваться в виде ускорения, скорости или перемещения. Однако на практике обычно применяются акселерометры, которые вырабатывают выходной сигнал пропорциональный ускорению. Контроллер может

преобразовывать сигнал акселерометра в скорость (интегрированием) или в перемещение (двойным интегрированием).

При испытаниях синусоидальным сигналом используются следующие единицы измерения:

Частота	Гц	или	рад/с	
Перемещение	мм			амплитуда или размах
Скорость	м/с			амплитуда
Ускорение	м/с ²	или	gn	амплитуда

Очень редко частота выражается в рад/с, часто вместо м/с пишут $мс^{-1}$, а вместо м/с² - $мс^{-2}$.

Широко используется представление ускорения в виде гравитационной единицы – перегрузки, которая определяется как отношение ускорения к ускорению свободного падения: $gn = A/g$, где $g = 9.81 м/с^2$. Какие бы единицы не использовались, необходимо иметь в виду, что речь идет об амплитудных (пиковых) значениях или размахе (двойной амплитуде).

Существует однозначная математическая зависимость между частотой, перемещением, скоростью и ускорением для пиковых значений синусоидального сигнала. Если известны любые два параметра из четырех, другие два можно определить. Приведенные ниже формулы демонстрируют это.

$D = \frac{V}{\pi F}$	$= \frac{GA}{2\pi^2 F^2}$	$= \frac{2V^2}{GA}$
$V = \pi F D$	$= \frac{GA}{2\pi F}$	$= \sqrt{\frac{GAD}{2}}$
$A = \frac{2\pi^2 F^2 D}{G}$	$= \frac{2\pi F V}{G}$	$= \frac{2V^2}{GD}$
$F = \sqrt{\frac{GA}{2\pi^2 D}}$	$= \frac{V}{\pi D}$	$= \frac{GA}{2\pi V}$

Метрическая система	Система СИ
$D = \text{мм (размах)}$	$D = \text{мм (размах)}$
$V = \text{мм/с (ампл.)}$	$V = \text{мм/с (ампл.)}$
$A = \text{gn (ампл.)}$	$A = \text{мм/с}^2 \text{(ампл.)}$
$F = \text{Гц}$	$F = \text{Гц}$
$G = 9806.65 \text{ мм/с}^2$	$G = 1000 \text{ мм/с}^2$
$\pi = 3.141592654$	$\pi = 3.141592654$

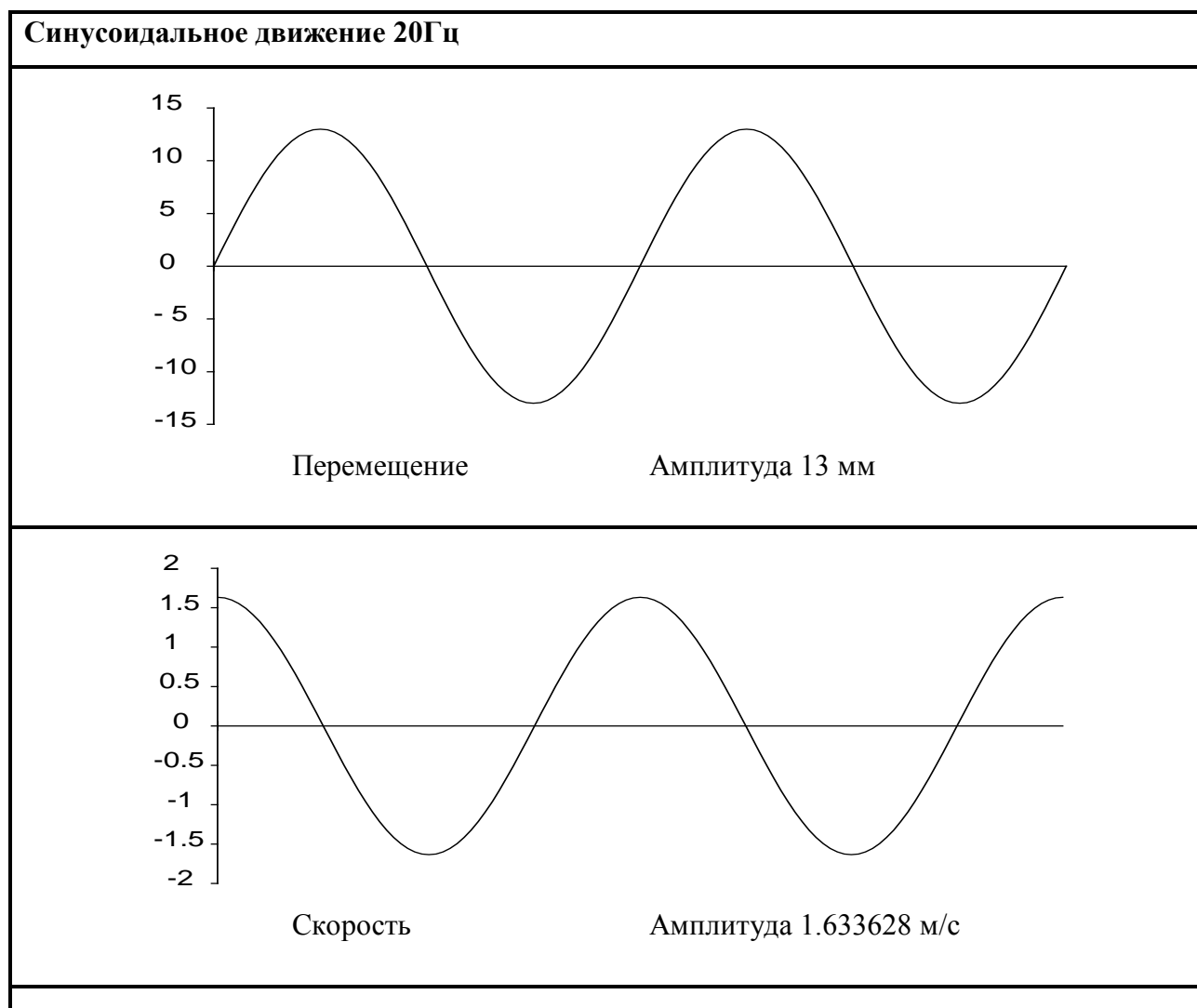
На практике скорость обычно не измеряют, поэтому удобно пользоваться следующей формулой:

$$gn = D \cdot F^2 / 250,$$

где gn – перегрузка (ед.), D – перемещение (мм), F – частота (Гц).

Так как движение происходит по синусoidalному закону, то перемещение, скорость и ускорение также изменяются по синусoidalному закону. Однако эти параметры не синфазны: например, если перемещение достигает максимума, у скорости не максимальное значение. Фазовое соотношение между перемещением, скоростью и ускорением таково, что разность фазы между скоростью и ускорением равна 90° , между перемещением и ускорением – 180° . Другими словами, когда перемещение максимально, скорость минимальна, ускорение максимально.

Если рассмотреть один цикл сигнала акселерометра, то за ускорением следует замедление, затем снова ускорение, затем опять замедление. Лучше всего представлять замедление как отрицательное ускорение.





Существуют сотни, если не тысячи режимов испытаний скользящей синусоидой, но не смотря на это у них есть общие параметры:

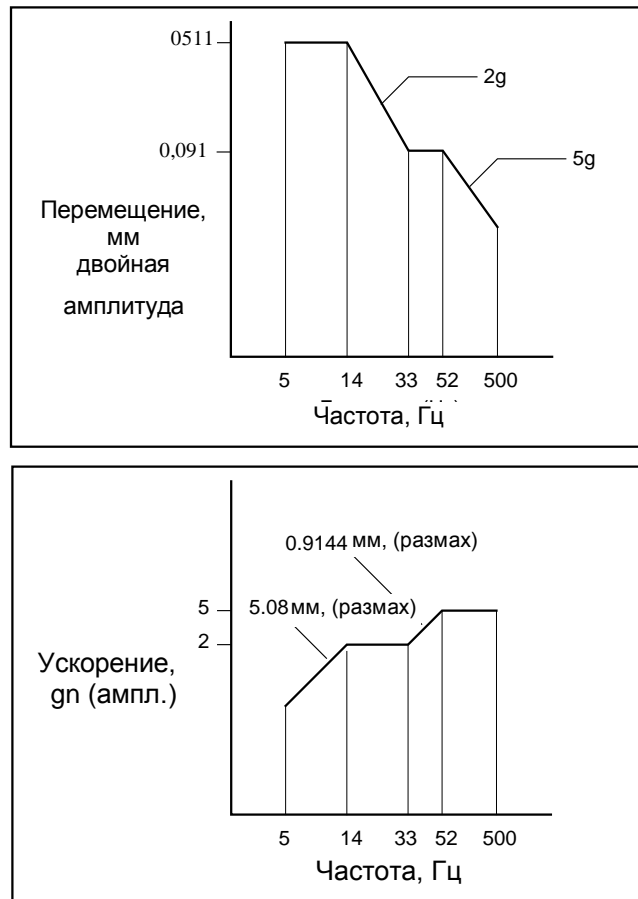
1. Верхняя и нижняя частота диапазона испытаний.
2. Уровень нагружения на каждой частоте.
3. Скорость и закон изменения частоты: логарифмический или линейный.
4. Длительность испытаний или количество проходов.

Пример испытания скользящей синусоидой, который я хочу привести, взят из стандарта MIL-STD-810E по той причине, что режимы испытаний определены не совсем обычным способом. Режимы заданы в виде диаграммы, где по оси Y отложена двойная амплитуда перемещения в мм, хотя обычно указывается ускорение в m/s^2 или в g. В табличной форме режимы испытаний выглядят следующим образом:

5Hz	-	14Hz	0.508 мм (размах)
14Hz	-	33Hz	2g (ампл.)
33Hz	-	53Hz	0.091 мм (размах)
52Hz	-	500Hz	5g (ампл.)

На самом деле значения промежуточных частот 14 Гц, 33 Гц и 53 Гц не точные. Если провести вычисления, то мы получим 13.98552 Гц, 32.964186 Гц и 52.120955 Гц. Однако при проведении испытаний можно принять округленные значения.

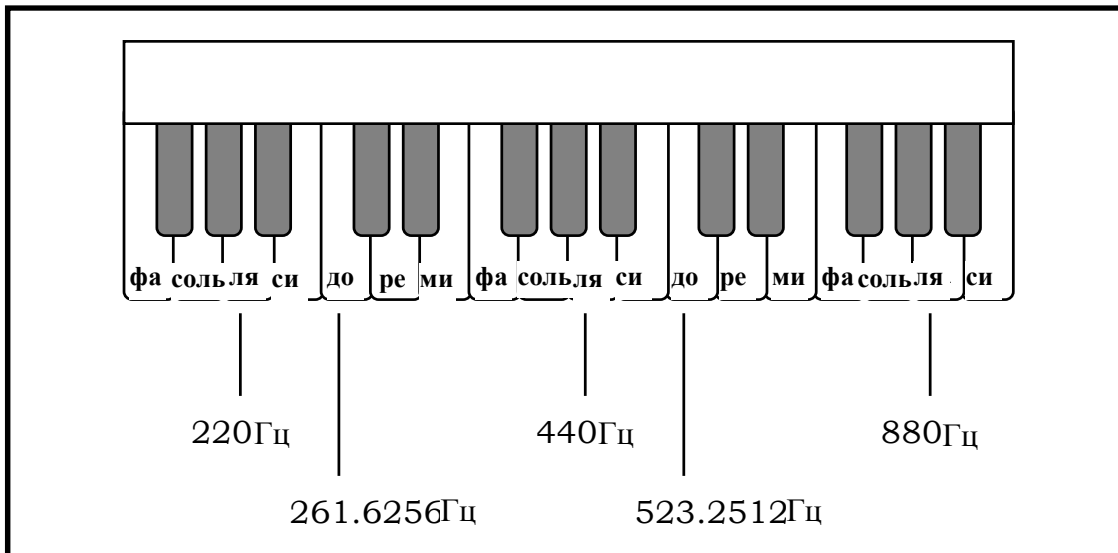
На следующих рисунках показаны режимы испытаний как они приведены в MIL-STD и когда по оси Y задано ускорение.



ОКТАВЫ И СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ

Октавы используются для определения разницы между двумя частотами. Например, разница между частотами 10 Гц и 500 Гц составляет 490 Гц. Октавы представляют эту разницу в логарифмическом масштабе.

Почти все из нас слышали, что понятие октавы используется в музыке. У пианино разница частот между двумя ближайшими нотами одного наименования как раз составляет октаву. Международной стандартной нотой для настройки музыкальных инструментов является нота ля, частота которой равна 440 Гц. Частота ноты октавой выше равна 880 Гц, а октавой ниже – 220 Гц. Таким образом, мы видим, что октава обладает свойством удваивания, другими словами это логарифмическое отношение.



Что бы определить количество октав между двумя частотами можно использовать следующую формулу:

$$\text{Количество октав} = \frac{\lg \frac{f_b}{f_n}}{\lg 2}$$

где f_n – нижняя частота, f_b – верхняя частота.

При испытаниях скользящей синусоидой используется логарифмический масштаб изменения частоты. Это делается с целью обеспечения условий равного нагружения объекта испытаний на разных частотах. Так при частоте 10 Гц за 1 секунду происходит 10 циклов колебаний. Эти же 10 циклов колебаний занимают одну сотую секунды при частоте 1000 Гц. Это значит, что для обеспечения равнонагруженного состояния (равного количества циклов колебаний) на разных частотах с увеличением частоты время колебаний на этой частоте должно уменьшаться.

Наиболее часто используется скорость изменения частоты 1 окт./мин. Если испытания начинаются с 10 Гц, то первую минуту будет пройден диапазон 10 Гц – 20 Гц, за следующую минуту - 20 Гц – 40 Гц и т.д. Для частотного диапазона 15 Гц – 1000 Гц количество октав равно 6.1. При скорости 1 октава в минуту время испытаний составит 6.1 минуты.

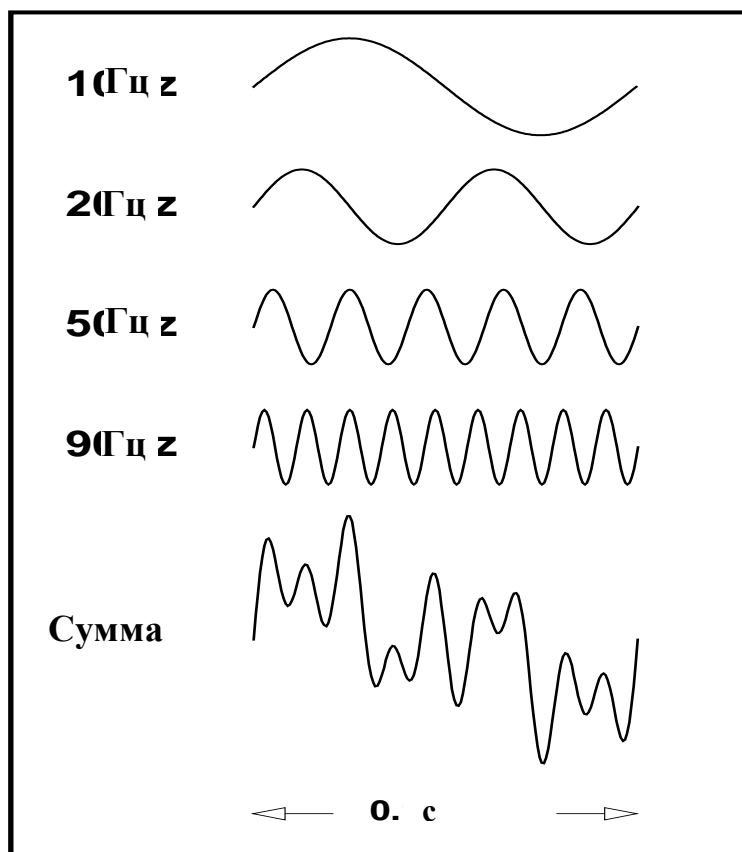
ЧТО ТАКОЕ СЛУЧАЙНАЯ ВИБРАЦИЯ?

Если мы возьмем конструкцию, состоящую из нескольких балок различной длины и начнем ее возбуждать скользящей синусоидой, то каждая балки будет интенсивно колебаться при возбуждении ее собственной частоты. Однако если мы возбудим эту же конструкцию широкополосным случайным сигналом, то мы увидим, что все балки начнут сильно раскачиваться, как будто в сигнале одновременно присутствуют все частоты. Это так и в то же время не так. Картина будет более реальной, если мы предположим, что в течение

некоторого промежутка времени эти частотные компоненты присутствуют в сигнале возбуждения, но их уровень и фаза изменяются случайным образом. Время – вот ключевой момент в понимании случайного процесса. Теоретически мы должны учитывать бесконечный период времени, чтобы иметь истинный случайный сигнал. Если сигнал действительно случайный, то он никогда не повторяется.

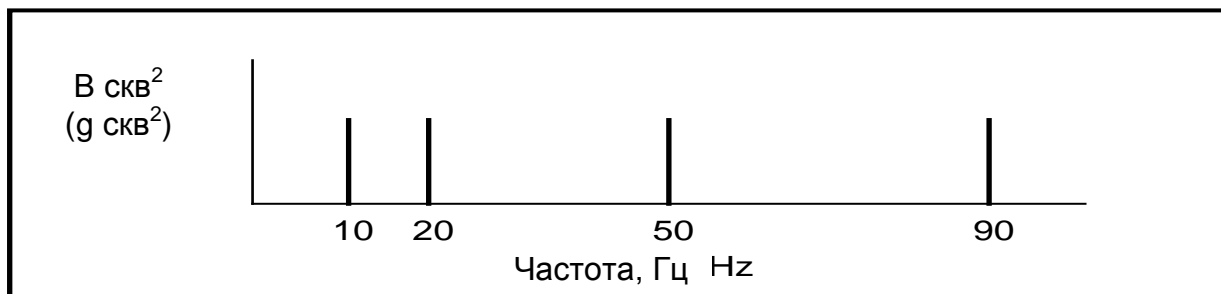
Раньше для анализа случайного процесса применялась аппаратура на основе полосовых фильтров, которые выделяли и оценивали отдельные частотные составляющие. Современные анализаторы спектров используют алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). Случайный непрерывный сигнал измеряется и дискретизируется по времени. Затем для каждой временной точки сигнала вычисляется синусная и косинусная функции, которые определяют уровни частотных компонент сигнала, присутствующих в анализируемом периоде сигнала. Далее проводится измерение и анализ сигнала для следующего временного интервала и его результаты усредняются с результатами предыдущего анализа. Так повторяется до тех пор, пока не будет получено приемлемое усреднение. На практике число усреднений может колебаться от двух – трех до нескольких десятков и даже сотен.

На рисунке, представленном ниже, показано как сумма синусоид с различными частотами образуют сигнал сложной формы. Может показаться, что суммарный сигнал является случайным. Но это не так, потому что составляющие имеют постоянную амплитуду и и фазу и изменяются по синусоидальному закону. Таким образом, показанный процесс периодический, повторяющийся и предсказуемый.



В действительности случайный сигнал имеет составляющие, амплитуды и фазы которых изменяются случайным образом.

На рисунке ниже показан спектр суммарного сигнала. Каждая частотная составляющая суммарного сигнала имеет постоянную величину, но для истинно случайного сигнала величина каждой составляющей будет все время изменяться и спектральный анализ покажет усредненные по времени значения.



Алгоритм БПФ обрабатывает случайный сигнал в течение времени проведения анализа и определяет величину каждой частотной составляющей. Эти величины представляются среднеквадратическими значениями, которые затем возводятся в квадрат. Так как мы измеряем ускорение, то единицей измерения будет перегрузка g скв, а после возведения в квадрат - g^2 скв. Если частотное разрешение при анализе равно 1 Гц, то измеряемая величина будет выражаться как количество ускорения возведенного в квадрат в частотном диапазоне шириной 1 Гц и единицей измерения будет $g^2/\text{Гц}$. При этом нужно помнить, что g – это g скв.

Единица $g^2/\text{Гц}$ используется при вычислении спектральной плотности и по существу выражает среднюю мощность, заключенную в частотном диапазоне шириной 1 Гц. Из профиля испытаний случайной вибрацией мы можем определить суммарную мощность, сложив мощности каждого диапазона шириной 1 Гц. Профиль, показанный ниже, имеет всего три диапазона шириной 1 Гц, но рассматриваемый метод применим к любому профилю.



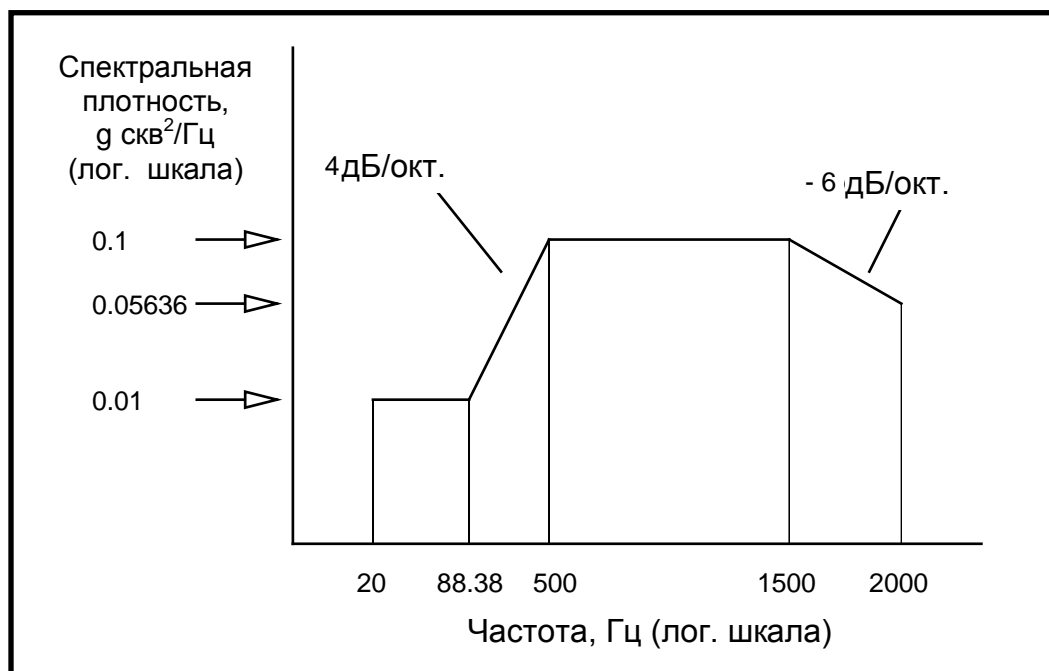
Суммарное ускорение (перегрузку) g_n скв профиля можно получить сложением, но так как значения являются среднеквадратическими, то они суммируются следующим образом:

$$\text{Суммарное ускорение} = \sqrt{2^2 + 2^2 + 2^2} = 3.4614g \text{ скв}$$

Такой же результат можно получить используя более общую формулу:

$$\text{Суммарное ускорение плоского спектра} = \sqrt{\text{Спектральная плотность} \times \text{Ширина полосы}}$$

Однако профили случайной вибрации, используемые в настоящее время, редко являются плоскими и больше похожи на горный массив в разрезе.



На первый взгляд определение суммарного ускорения g_n показанного профиля задача довольно простая, и определяется как среднеквадратическая сумма значений четырех сегментов. Однако профиль показан в логарифмическом масштабе и наклонные прямые на самом деле не прямые. Эти линии являются экспоненциальными кривыми. Поэтому нам нужно вычислить площадь под кривыми, а это задача намного сложнее. Как это сделать, мы рассматривать не будем, но можно сказать, что суммарное ускорение равно 12.62 g скв.

Для чего нужно знать суммарное ускорение при случайной вибрации?

В режиме случайной вибрации вибрационная испытательная система имеет номинальную толкающую силу, которая выражается в Н скв или кгс скв. Заметьте, что сила определяется среднеквадратическим значением в отличие от синусоидальной вибрации, где используется амплитудное значение. Формула для определения силы такая же: $F = m \cdot a$, но так как сила имеет среднеквадратическое значение, то и ускорение должно быть среднеквадратическим.

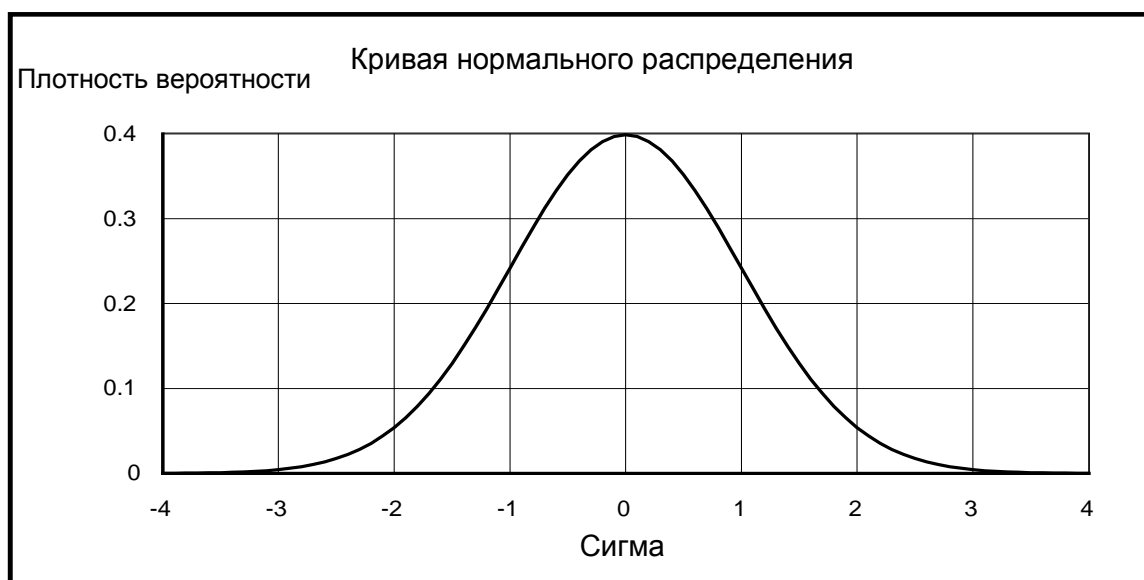
$$\text{Сила (Н скв.)} = \text{масса (кг)} \cdot \text{ускорение (м/с}^2 \text{ скв.)}$$

$$\text{Сила (кгс скв.)} = \text{масса (кг)} \cdot \text{ускорение (g скв.)}$$

Помните, что под массой понимается общая масса всех подвижных частей!

Что понимается под перемещением при случайной вибрации?

Для нас важно знать перемещение при заданном профиле испытаний, так как оно может превысить максимально допустимое перемещение вибратора. Не вдаваясь в подробности, мы знаем, как рассчитать суммарное среднеквадратическое ускорение и нет причин мешающих нам определить среднеквадратическую скорость и среднеквадратическое перемещение для данного профиля. Трудности появляются тогда, когда мы хотим перейти от среднеквадратического значения к амплитудному или к размаху. Давайте вспомним, что отношение амплитудного значения к среднеквадратическому называется пик-фактором, который для синусоидального сигнала равен корню квадратному из 2. Коэффициенты перехода от среднеквадратического значения к амплитудному и обратно равны соответственно 1.414 ($\sqrt{2}$) и 0.707 ($1/\sqrt{2}$). Однако мы имеем дело не с синусоидальным сигналом, а со случайным процессом, у которого теоретический пик-фактор равен бесконечности, так как амплитудное значение случайного сигнала может быть равно бесконечности. На практике значение пик-фактора принимают равным 3. На рисунке показана кривая нормального распределения случайного сигнала. По статистике, если ограничиться шириной интервала $\pm 3\sigma$, то это охватит 99.73% всех возможных значений амплитуд истинного случайного сигнала.



Следовательно, если принять, что при пик-факторе равном трем контроллер случайной вибрации будет генерировать случайный сигнал с максимальной амплитудой в три раза превышающей среднеквадратическое значение, то из этого следует, что расчетное перемещение будет равно суммарному среднеквадратическому перемещению умноженному на значение пик-фактора и умноженному на 2. Это расчетное перемещение не должно превышать максимально допустимое перемещения вибратора.

Практические аспекты выбора значения пик-фактора

Мы можем сделать так, чтобы контроллер случайной вибрации генерировал сигнал с пик-фактором равным 3, который через вибратор будет передаваться испытываемому образцу. К сожалению и вибратор и образец являются существенно нелинейными системами и имеют резонансы. Эта нелинейность с резонансами будет вызывать искажения. В конечном итоге мы увидим, что пик-фактор, измеренный на столе вибратора или объекте испытаний, будет значительно отличаться от первоначально заданного! Контроллеры случайной вибрации не корректируют это автоматически.

Внеполосовая мощность

Необходимо обратить внимание на эффект, который может проявиться при возбуждении случайным сигналом образца, разработанного для эксплуатации в частотном диапазоне, например, до 1000 Гц. Генерируемый контроллером сигнал может возбудить резонансные частоты, лежащие намного выше частоты 1000 Гц. Эти частоты возбуждаются гармониками. Поэтому нелишне контролировать мощность сигнала выше диапазона испытаний, так как она может вызвать разрушение работоспособного в заданном диапазоне частот (в данном случае - до 1000 Гц) образца.

Узкополосная случайная вибрация

Толкающая сила вибраторов в режиме случайной вибрации измеряется при следующих условиях:

- масса нагрузки примерно в два раза больше массы арматуры (подвижной части вибратора)
- профиль испытаний соответствует стандарту ISO 5344

20 Гц – 100 Гц	Наклон = +20 дБ/декада (\approx +6 дБ/октава)
100 Гц – 2000 Гц	Наклон = 0 дБ/декада (плоский)

- отношение амплитудного значения к среднеквадратическому значению ускорения не менее 3-х.

Вибрационные испытательные системы имеют нелинейную частотную характеристику (на одних частотах их эффективность выше, на других ниже), и случайный процесс на частотах ниже 500 Гц воспроизводится с меньшей эффективностью. В этом случае усилителю может не хватить мощности, чтобы создать необходимую толкающую силу. Выбор более мощного усилителя решит эту проблему.

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ

Наиболее часто используемые единицы измерения плотности спектра мощности следующие:

$$\text{gn}^2/\text{Гц} = \text{g}^2/\text{Гц}$$

$$(m/c^2)/Гц = m^2/c^3 = m^2c^{-3}$$

$$gn/\sqrt{Гц} = g/\sqrt{Гц}$$

В любом случае нужно помнить, что ускорение выражается в среднеквадратических значениях.

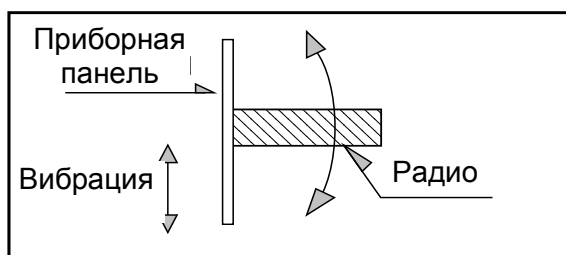
Чтобы преобразовать единицы измерений:

$g^2/Гц$ в m^2/c^3	умножить на 9.80665^2	т.е. $\times 96.1703842$
m^2/c^3 в $g^2/Гц$	разделить на 9.80665^2	т.е. $\div 96.1703842$
$g/\sqrt{Гц}$ в $g^2/Гц$	возвести в квадрат $g/\sqrt{Гц}$	т.е. $(g/\sqrt{Гц})^2$
$g^2/Гц$ в $g/\sqrt{Гц}$	извлечь кв. корень из $g^2/Гц$	т.е. $\sqrt{(g^2/Гц)}$

КАК ВЛИЯЕТ ВИБРАЦИЯ НА МОЮ ПРОДУКЦИЮ?

Вся продукция подвергается действию вибрации, о которой мы в большинстве случаев мало что знаем. Причиной вибрации являются условия эксплуатации продукции, ее транспортировка или сама продукция. Например, электронные компоненты стиральной машины подвергаются действию сильной вибрации. Нам необходимо понимать последствия действия вибрации, чтобы это помогло создавать продукцию высокого качества и надежности.

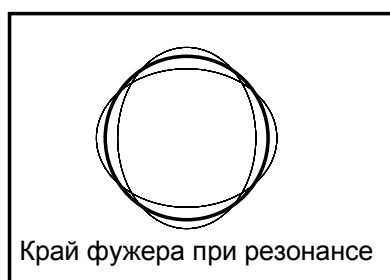
Если мы рассмотрим автомобильную магнитоу, установленную на приборной панели, то она подвергается действию вибрации. Источниками вибрации являются двигатель, трансмиссия, профиль дороги. Диапазон частот вибрации обычно лежит в пределах 1 Гц – 1000 Гц. Например, скорость вращения двигателя 3000 об./мин соответствует частоте 50 Гц. Эта вибрация передается на панель приборов даже если двигатель установлен на виброизолирующие опоры, которые теоретически не должны пропускать вибрацию на кузов автомобиля. Итак, у нас есть источник вибрации, который возбуждает панель приборов и автомагнитоу.



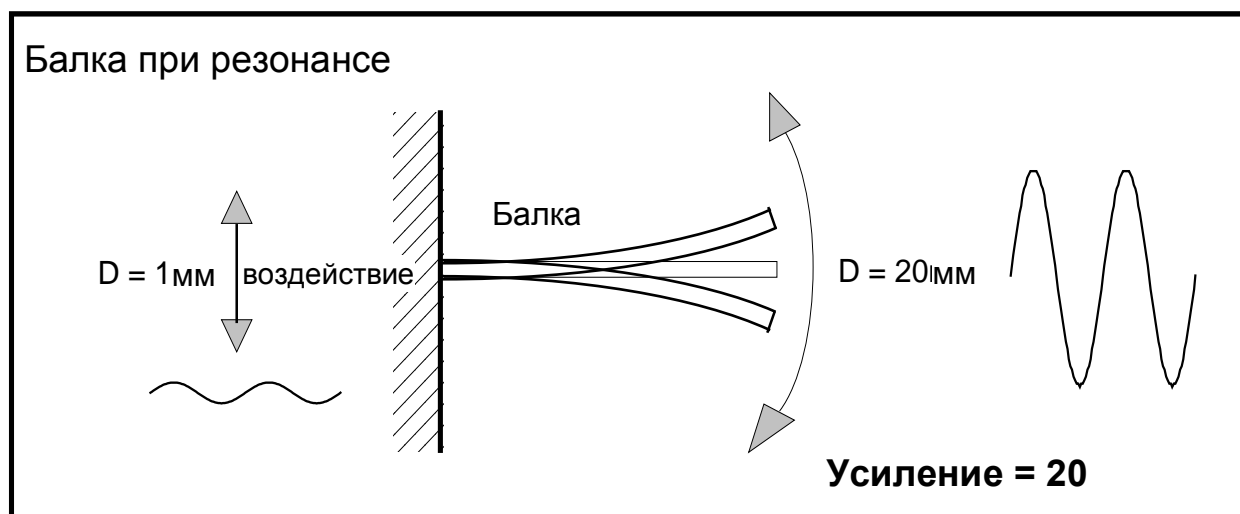
Вибрация, создаваемая источником, может быть небольшая, но к моменту достижения магнитолы уровень вибрации может значительно увеличиться за счет резонансов кузова автомобиля и приборной панели.

Резонанс

Хорошим примером резонанса является звук, издаваемый бокалом, если водить мокрым пальцем по его краю. Стенки бокала начинают колебаться на собственной частоте. Эти колебания вызывают звуковые волны, которые мы слышим. Сами колебания вызываются трением пальца о стекло. Известна история об оперном певце, который своим голосом разбил бокал. Если частота звуковых колебаний совпадет с собственной частотой колебаний стенок бокала, колебания могут стать такими интенсивными, что стекло лопнет.



Резонансной частотой предмета является частота, на которой предмет будет колебаться естественным путем, если его вывести из состояния равновесия. Например, при щипке гитарной струны она будет колебаться на резонансной частоте, колокол после удара также будет колебаться на резонансной частоте.

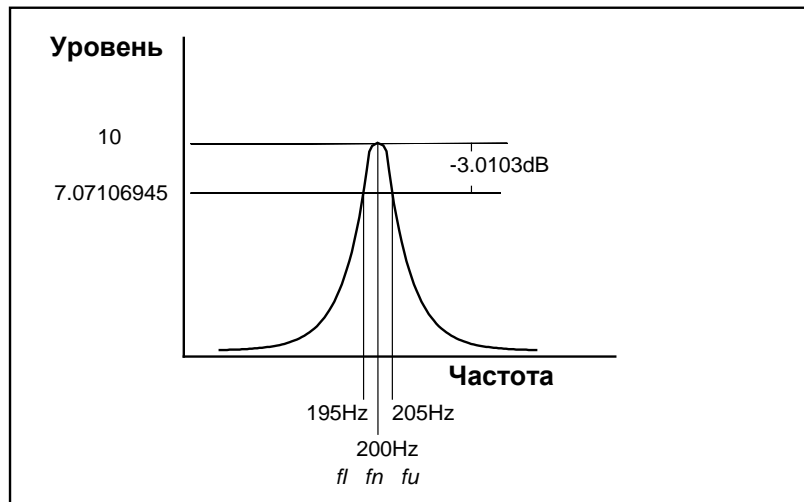


На рисунке показано как резонанс усиливает колебания. В этом примере возбуждающее перемещение амплитудой 1 мм вызывает колебания балки амплитудой 20 мм, величина которой в определенной степени зависит и от добротности балки. Чрезмерный изгиб балки может привести к ее усталостному разрушению.

Острота резонанса, известная как добротность (критерий качества), определяется величиной демпфирования. Влияние демпфирования можно услышать, прикоснувшись рукой к звучащему колоколу: рука будет демпфировать его вибрацию, т.е. амплитуду колебаний и звук колокола изменится и быстро затухнет.

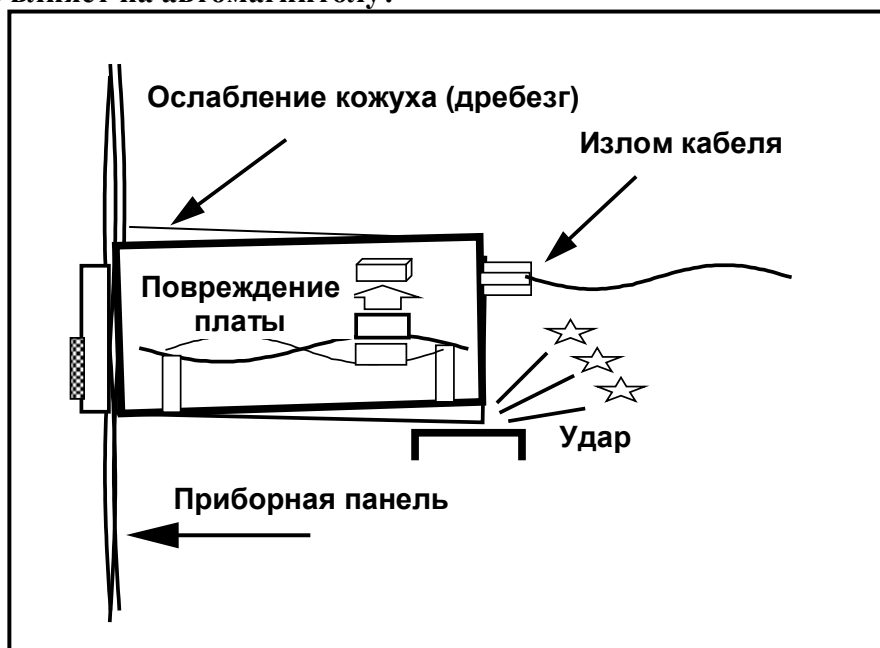
На рисунке ниже показан резонансный пик на частоте f . Чем больше демпфирование, тем ниже и шире резонансный пик. Демпфирование выражается через добротность Q , которая

определяет ширину резонансной кривой по уровню половинной мощности ($A/\sqrt{2}$) или уровню -3 дБ от A , где A – максимальная амплитуда. (-3 дБ величина округленная, точное значение равно -3.0102299957 дБ).



$$Q = \frac{f_n}{f_u - f_l} = \frac{200}{205 - 195} = 20$$

Как резонанс влияет на автомагнитолу?



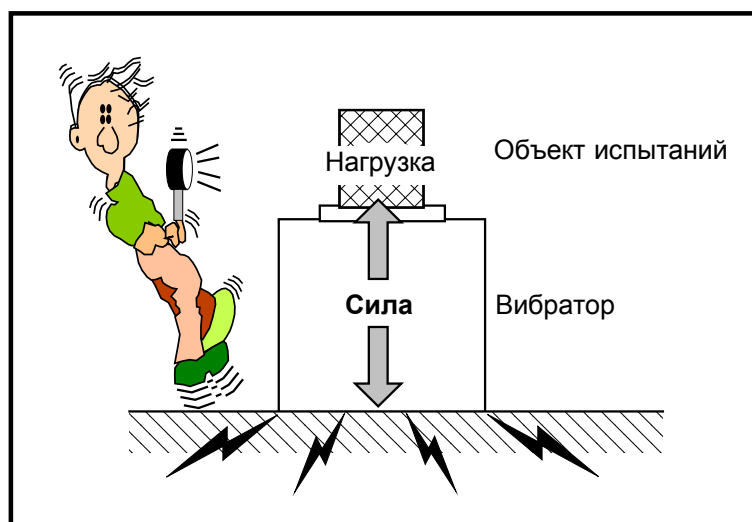
Эта картинка иллюстрирует:

- Плохо закрепленная печатная плата будет изгибаться и со временем треснет или сломается.
- При резонансе печатной платы она передает высокие уровни колебаний электронным компонентам, которые могут преждевременно выйти из строя.
- Кабели и провода могут со временем переломиться в точке крепления к плате из-за усталостных напряжений.

- Если все устройство не будет тщательно закреплено, оно может удариться о другие элементы приборной панели, вызывая раздражающее дребезжание, но что более опасно, подвергать ударным нагрузкам электронные компоненты и вызывать их резонансные колебания.
- Так как в автомагнитоле есть кассетный магнитофон, то вибрация лентопротяжного механизма может вызвать завывание и дребезжание звука, повреждение пленки.

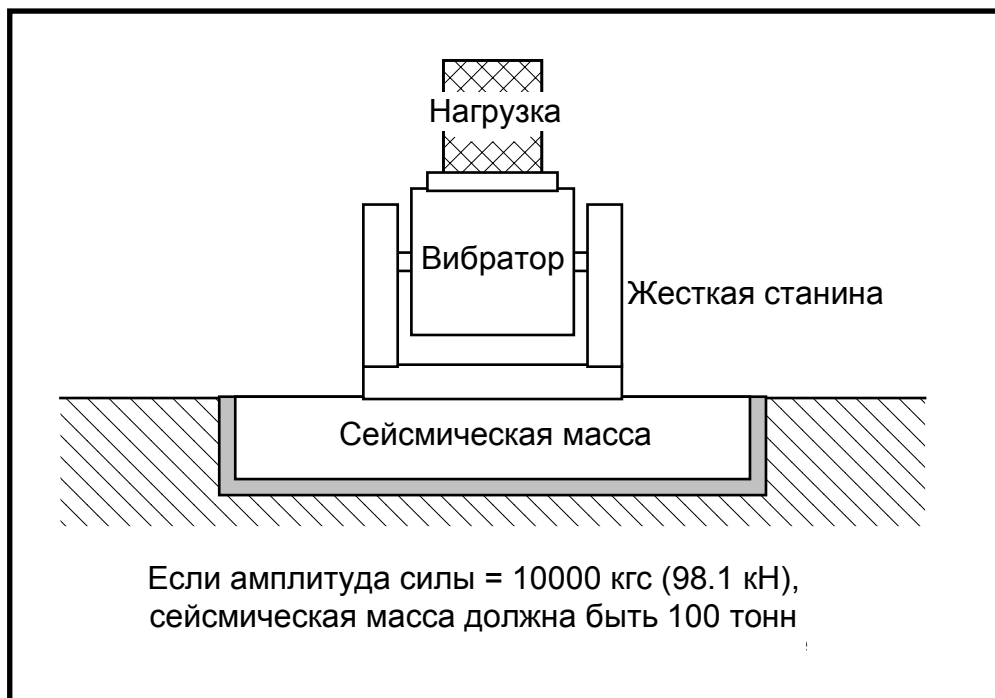
ИЗОЛЯЦИЯ ВИБРАТОРА

При работе в вертикальном положении вибратор создает толкающее усилие, направленное вертикально. Согласно третьему закону Ньютона каждое действие вызывает противодействие. Из этого следует, что прикладывая силу к нашему объекту испытаний мы воздействуем такой же силой на пол.

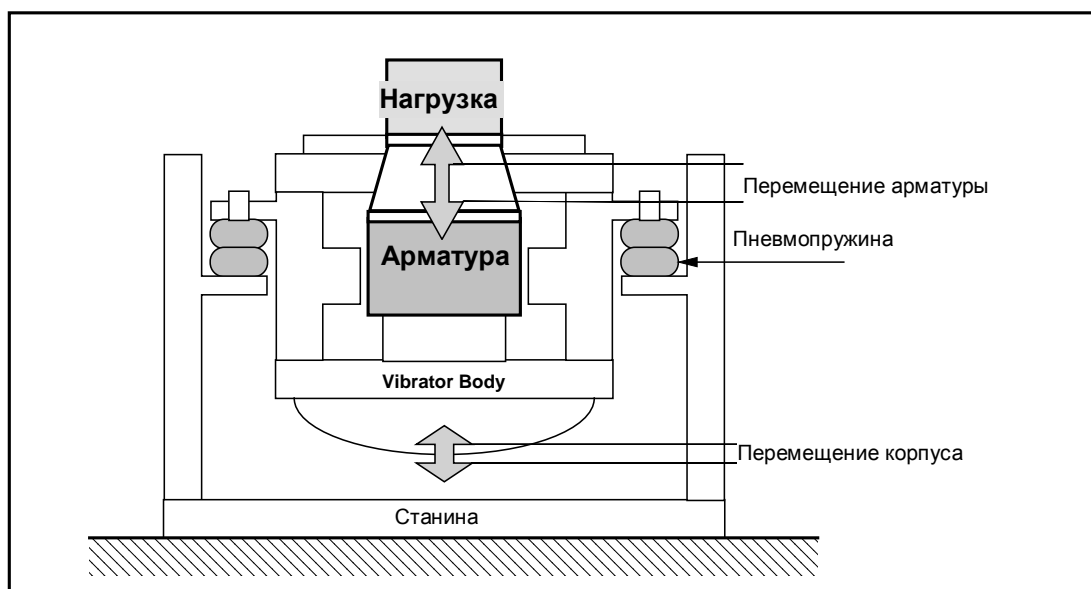


Так как большинство зданий имеют собственную частоту порядка 15 Гц, то возбуждаются резонансные частоты не только предметов, окружающие вибратор, но и резонансные частоты здания, а это в некоторых случаях может привести к повреждению здания.

Чтобы такая проблема не возникла можно применить сейсмическую массу – обычно большой бетонный блок, вес которого должен быть не менее, чем в 10 раз больше максимальной толкающей силы, развиваемой вибратором,



или использовать некоторые другие методы изоляции, такие как пневматические опоры, или опоры из резины.



Большинство вибраторов поставляются с элементами виброизоляции. Однако при этом возникает другая проблема, связанная с движением корпуса вибратора. Из-за того, что корпус вибратора изолирован от пола с помощью "пружин", при движении арматуры вибратора с нагрузкой вверх, корпус вибратора стремится двигаться вниз. Перемещение корпуса вибратора уменьшает перемещение стола вибратора относительно пола и, следовательно, ускорение стола, которое имеет абсолютное значение. Величина перемещения корпуса связана с отношением общей подвижной массы к массе корпуса вибратора. Чем тяжелее полезная нагрузка, тем больше перемещение корпуса. Максимальное перемещение стола относительно пола можно определить по следующей формуле:

$$d = S - \frac{S \cdot Ma}{Ma + Mb}$$

где:

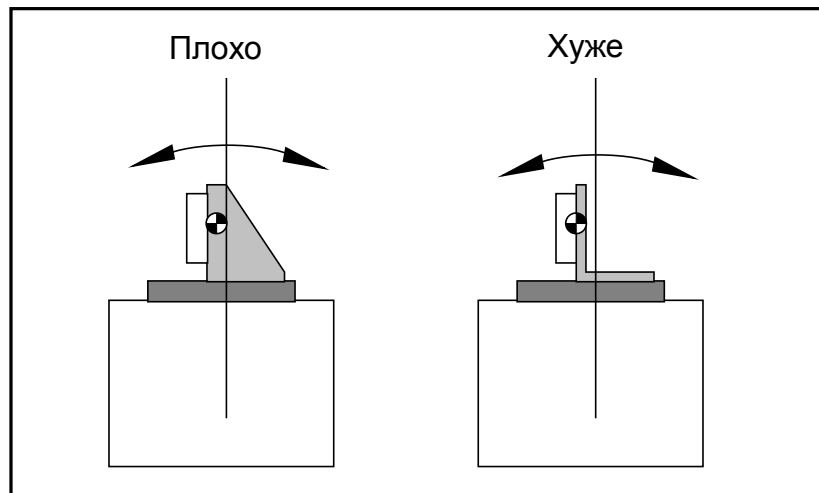
- d - допустимое перемещение (размах)
- Ma - общая подвижная масса
- Mb - масса корпуса
- S - 26 (25.4 мм) номинальный
- S - 39 (38 мм) перемещение
- S - 52 (50.8 мм) стола вибратора

К сожалению, виброизоляторы имеют резонансы на частотах 2.5 Гц, 5 Гц, 10 Гц или 15 Гц в зависимости от типа изолятора. Если вибратор работает большим с перемещением на частоте резонанса изолятора, то приведенная формула не имеет смысла, так как объект испытаний будет оставаться неподвижным, в то время как корпус вибратора будет двигаться.

ОПРОКИДЫВАЮЩИЙ МОМЕНТ

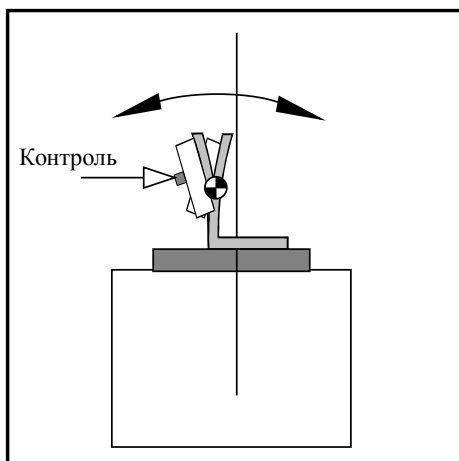
Существует правило, согласно которому центр тяжести объекта испытаний и оснастки следует размещать на продольной оси арматуры. Если это правило не соблюдать, то можно:

- перегрузить объект испытаний
- повредить вибратор



Конструкция вибратора обеспечивает передачу толкающего усилия вдоль оси арматуры, поэтому смещение полезной нагрузки и оснастки от продольной оси вызывает "опрокидывание" арматуры. Это опрокидывающее движение воспринимается направляющими арматуры и нагружает их, что, в крайнем случае, может привести к повреждению подшипников направляющих и подвижной катушки. Объект испытаний также подвергается воздействию поперечных нагрузок, которые не предусмотрены режимами испытаний. Если оснастка недостаточно жесткая, у нее возможен резонанс в поперечном направлении, при котором на объект испытаний действует значительная неконтролируемая

вибрация. Например, при поперечном ускорении $5g$, вызванном смещением нагрузки и оснастки, имеющей добротность на частоте резонанса $Q=50$, объект испытаний на этой частоте будет иметь ускорение $250g$!



Для предупреждения такой ситуации хорошим правилом является контроль поперечного ускорения. В тех случаях, когда поперечным ускорением нельзя пренебречь, можно в рамках стратегии управления уменьшить перемещение в вертикальном направлении, чтобы не перегрузить объект испытаний. Такой метод используется при многоканальном управлении, когда управляющий сигнал формируется по реакции испытываемого объекта в нескольких точках.

Если ваша оснастка жесткая, тщательно спроектирована и изготовлена, центры тяжести оснастки и объекта испытаний лежат на продольной оси стола вибратора, то опрокидывающий момент будет минимальным и его можно не учитывать.

Примечание. При вибрации сложной конструкции положение ее центра тяжести может зависеть от частоты возбуждения, поэтому на разных частотах положение центра тяжести будет другим.

РАЗДЕЛ 2. КАК ВЫБРАТЬ ВИБРАЦИОННУЮ ИСПЫТАТЕЛЬНУЮ СИСТЕМУ

ВВЕДЕНИЕ

Назначение вибрационной системы заключается в создании определенных и воспроизводимых механических колебаний, передаче их объекту испытаний, а также в имитации реальных условий вибрации, создании переменных напряжений в объекте испытаний для выявления скрытых дефектов, изучении свойств испытываемой конструкции. Поэтому генератор колебаний – вибратор - должен обеспечивать движение только в одном направлении с малыми искажениями и иметь перемещение, скорость и ускорение, обеспечивающие удовлетворение большей части требований по проведению испытаний в пределах создаваемой толкающей силы.

Первоочередные требования

При определении параметров вибрационной испытательной системы необходимо в первую очередь знать:

1. Параметры полезной нагрузки:
 - массу
 - форму
 - размеры
 - положение центра тяжести (статическое и динамическое)
 - массу оснастки и т.д.
2. Режимы испытаний:
 - синусоидальной вибрацией
 - синусоидальной вибрацией со скользящей частотой
 - случайной вибрацией, широкополосной и узкополосной
 - ударным нагружением
 - синусоидальной вибрацией наложенной на случайную
 - ударный спектр и т.д.

Дополнительные требования

1. Мощностные возможности системы - сможет ли система обеспечить требуемые уровни нагружения для наибольшего из предполагаемых объектов испытаний ?
2. Основные характеристики - перемещение, скорость и частотный диапазон.
3. Статическая грузоподъемность – нужны ли дополнительные средства для обезвешивания полезной нагрузки?

4. Эксплуатационные условия – будет ли система эксплуатироваться в лабораторных условиях квалифицированным персоналом или на производстве неподготовленными рабочими? Есть ли ограничения по охлаждению системы: по расходу воды для системы с водяным охлаждением и по количеству отводимого тепла для системы с воздушным охлаждением. Могут быть и другие факторы относительно условий эксплуатации.
5. Условия применения: будет ли система универсальной для испытаний общего назначения или она предназначена для проведения конкретных видов испытаний?

Рассмотрим пример, в котором идеальная с точки зрения симметрии и динамических свойств полезная нагрузка должна подвергаться двум видам испытаний: синусоидальной вибрации и случайной вибрации. Для этого в первом приближении выбрана система, включающая вибратор V830-335 и усилитель мощности SPA10K.

Характеристики системы V830-335 SPA10K

Рабочий частотный диапазон	0 - 3000 Гц
Номинальный ход стола (S=52)	50.8 мм
Номинальная скорость	2000 мм/с ампл.
Номинальное ускорение (синусоидальное)	75 g ампл.
Номинальное ускорение (случайное)	60 g скв.
Номинальное ускорение (ударное)	Зависит от нагрузки
Номинальная сила (синусоидальная)	1000 кгс ампл.
Номинальная сила (случайная)	1000 кгс скв.
Номинальная сила (ударная)	Зависит от нагрузки
Частота основного резонанса арматуры	2300 Гц $\pm 5\%$
Масса арматуры (с крепежными вставками)	12.85 кг
Масса корпуса	616 кг
Поперечная жесткость с учетом вставок	535.7 кгс/мм
Максимальный опрокидывающий момент	2868 кгс мм
Радиус окружности размещения вставок	55 мм
Максимальная статическая нагрузка	160 кг
Частота резонанса виброизоляции	5 Гц или 10 Гц

Приведенный перечень указывает на предельные параметры. Значения некоторых параметров определены исходя из максимальных возможностей вибратора и усилителя мощности. Например, если вместо 10-киловаттного усилителя мощности использовать 5-киловаттный, максимальное толкающее усилие и ускорение будут меньше, так как меньше будет выходной ток усилителя.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ: Синусоидальная вибрация

В идеальном случае возможности системы должны быть на 20-30 % больше, чем необходимо. Не выбирайте систему, которая будет работать на пределе своих возможностей! Чтобы показать, как это делается, воспользуемся параметрами рассмотренной нами системы V830-335 SPA10K.

Испытания скользящей синусоидой



Находятся ли частоты испытаний в рабочем диапазоне частот системы?

Да
↓

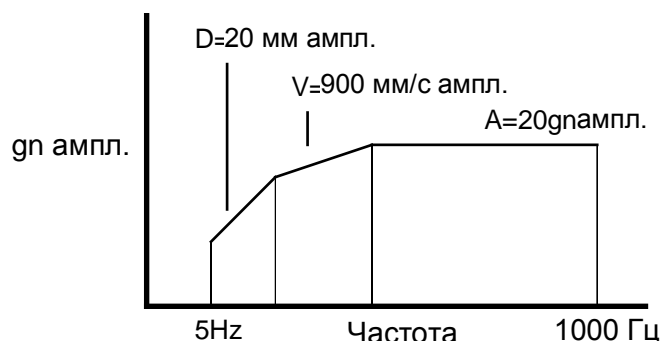
Требуемый ход стола меньше номинального?

Да
↓

Требуемая скорость меньше номинальной?

Да
↓

Требуемое ускорение меньше номинального?

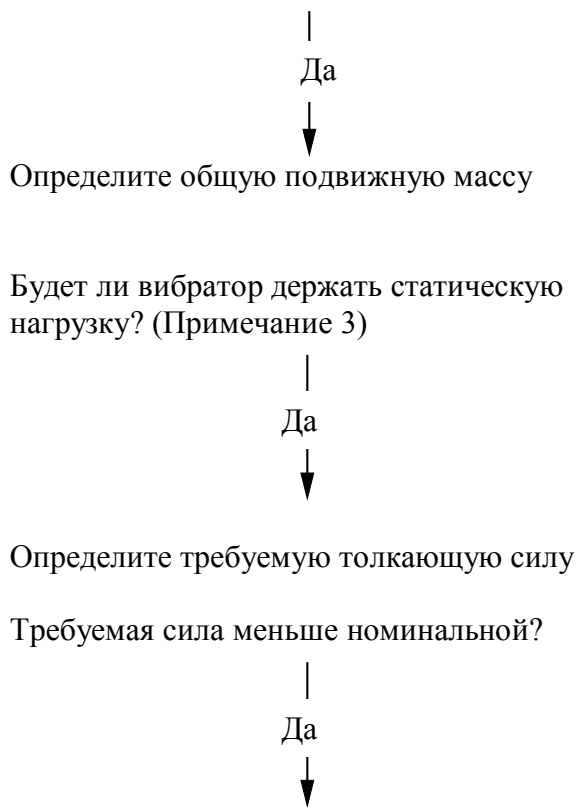


Предел: 0 – 3000 Гц
Нужно: 5 – 1000 Гц

Частота перехода перемещение – скорость - 14.32 Гц
Частота перехода скорость - ускорение - 34.68 Гц
 $20 \text{ мм} < 50.8 \text{ мм}$

$900 \text{ мм/с} < 2000 \text{ мм/с}$

$20 \text{ g} < 75 \text{ g}$



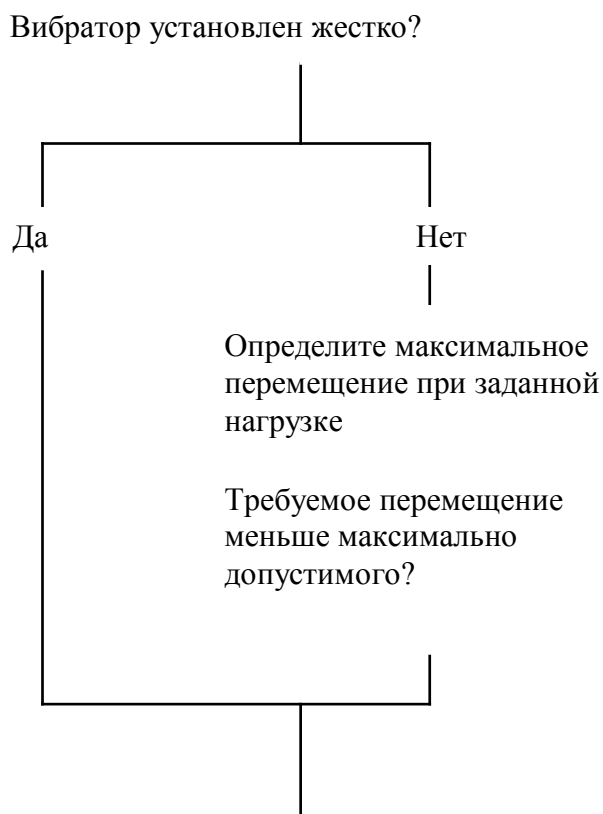
$$12.85 \text{ кг} + 20 \text{ кг} = 32.85 \text{ кг}$$

(Примечание 2)

$$32.85 \text{ кг} < 160 \text{ кг}$$

$$32.85 \text{ кг} * 20 \text{ g} = 657 \text{ кгс ампл.}$$

$$657 \text{ кгс} < 1000 \text{ кгс}$$



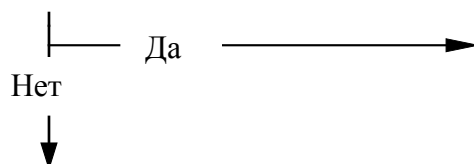
Если резонансная частота виброизоляции лежит в диапазоне частот испытаний, результаты вычислений могут быть неверны!

$$D = 52 - \frac{52 \times (12.85 + 20)}{12.85 + 20 + 616}$$

$$D = 49.37 \text{ мм}$$

$$20 \text{ мм} < 49.37 \text{ мм}$$

Можно использовать менее мощную систему?



Выберите другую систему и повторите расчеты

Проведите проверки для других нагрузок и режимов испытаний.

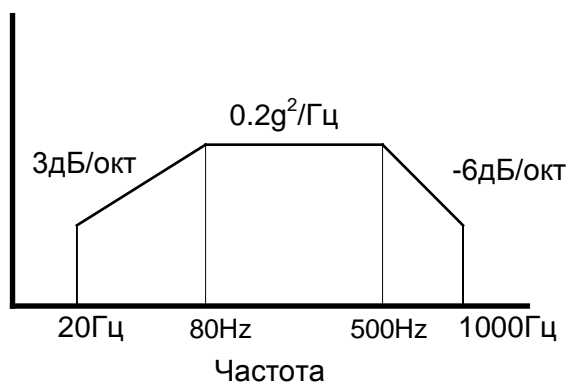
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ: Случайная вибрация

В идеальном случае возможности системы должны быть на 20-30 % больше, чем необходимо. Не выбирайте систему, которая будет работать на пределе своих возможностей! Чтобы показать, как это делается, воспользуемся параметрами рассмотренной нами системы V830-335 SPA10K.

Испытания случайной вибрацией



Спектральная плотность
 $g^2/Гц$



Верхняя частота выше 500 Гц? (Примечание 1)

Да
↓

Определите суммарное ускорение g_n скв.

Суммарное ускорение меньше номинального?

Да
↓

Определите общую подвижную массу

Будет ли вибратор держать статическую нагрузку? (Примечание 3)

$$1000 \text{ Гц} > 500 \text{ Гц}$$

$$\text{Спектральная плотность на } 20 \text{ Гц} = 0.0502377 \text{ } g^2/Гц$$

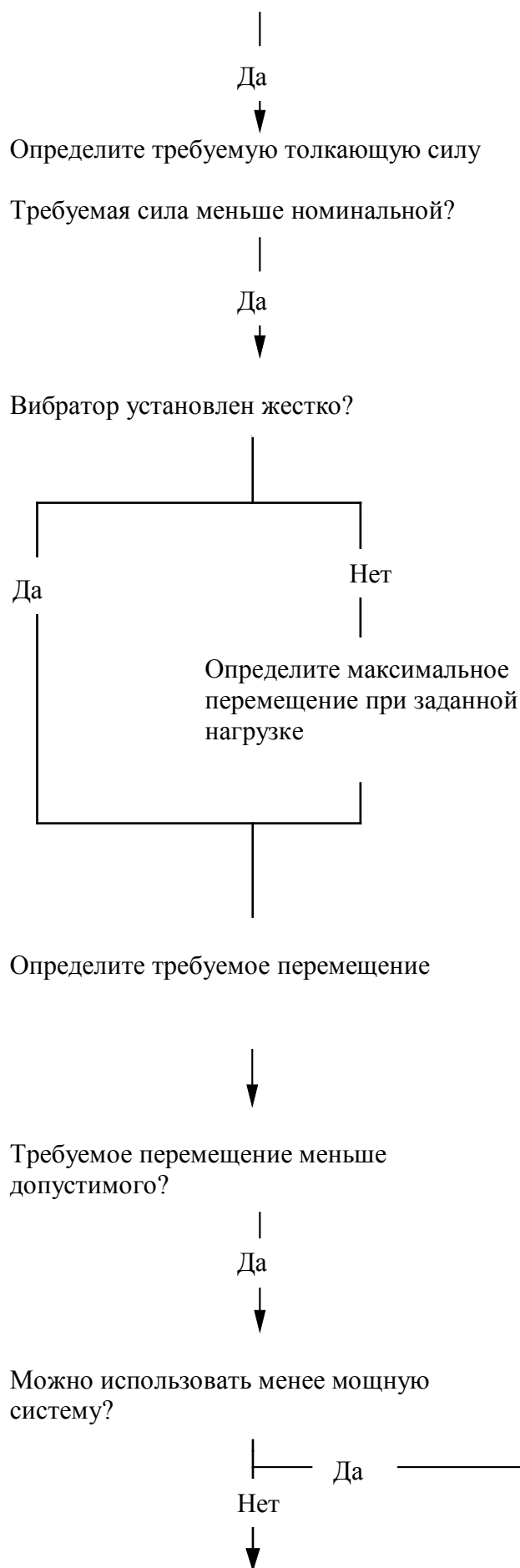
$$\text{Спектральная плотность на } 20 \text{ Гц} = 0.0502377 \text{ } g^2/Гц$$

$$g_n = 11.90023553 \text{ } g \text{ скв.}$$

$$11.9 \text{ } g \text{ скв.} < 60 \text{ } g \text{ скв.}$$

$$20 \text{ кг} + 12.85 \text{ кг} = 32.85 \text{ кг} \\ \text{(Примечание 2)}$$

$$32.85 \text{ кг} < 160 \text{ кг}$$



$$32.85 \text{ кг} * 11.9g_{\text{скв.}} = 391 \text{ кгс скв.}$$

$$391 \text{ кгс скв.} < 1000 \text{ кгс скв.}$$

$$D = 52 - \frac{52 \times (12.85 + 20)}{12.85 + 20 + 616}$$

$$D = 49.37 \text{ мм}$$

Перемещение: 3.102 мм
 Пик-фактор: 3
 Наклон: 24 дБ/окт.

$$3.102 \text{ мм} < 49.37 \text{ мм}$$

Выберите другую систему и повторите расчеты

Проведите проверки для других нагрузок и режимов испытаний.

Примечание 1. Если верхняя граничная частота при испытаниях меньше 500 Гц, то такой режим относится к испытаниям узкополосной случайной вибрацией. В этих условиях вибратор может не достигнуть максимальной толкающей силы. Свяжитесь с изготовителем вибрационной системы для консультации.

Примечание 2. Общая подвижная масса – это масса всех подвижных элементов и поэтому должна включать в себя все, что присоединено к арматуре:

- объект испытаний (полезная нагрузка)
- арматуру
- оснастку (крепления)
- болты
- верхний расширитель
- верхний удлинитель
- температурные барьеры
- акселерометры
- толкатель
- скользящий стол
- подшипники скользящего стола

Примечание 3. Установка полезной нагрузки в среднем положении хода стола обычно обеспечивается встроенной системой обезвешивания, но это можно выполнить при помощи внешней обезвешивающей системы, например при помощи резиновых амортизаторов.

ПАРАМЕТРЫ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ВИБРАЦИИ

Параметры синусоидальной вибрации легче всего доступны для понимания. Пиковая синусоидальная сила измеряется при помощи нормированной полезной нагрузки в соответствии с тестовыми процедурами Стандарта Качества компании. Для систем с нагрузками до 22.24 кН (2267 кгс). Масса нагрузки обычно в два раза превышает массу арматуры. Для больших вибростендов более тяжелые нагрузки используются для определения способности направляющих арматуры и пневматической подвески воспринимать опрокидывающий момент при смещении центра тяжести нагрузки.

Согласующий трансформатор

В некоторых системах применяется согласующий трансформатор для получения оптимальных параметров при синусоидальной и случайной вибрации. В режиме

синусоидальной вибрации выходное напряжение усилителя мощности выбирается таким, чтобы обеспечить максимальное толкающее усилие. При необходимости получения более высоких скоростей в качестве источника переменного напряжения используется согласующий трансформатор (поставляется отдельно). При увеличении подводимого к вибратору напряжения скорость **можно** пропорционально увеличить, но при этом толкающую силу **нужно** пропорционально уменьшить.

Максимальная скорость в длительном режиме работы равна 2 м/с для всех вибростендов фирмы LDS, за исключением отдельных случаев.

Системы с согласующим трансформатором иногда имеют перемещение меньше, чем максимально возможное для данного вибратора. Это объясняется тем, что на низких частотах трансформатор ограничивает уровень напряжения подводимого к вибратору.

Ограничения на низких частотах

Прямое соединение усилителя вибратора в настоящее время выполняется для широкого круга систем, при этом обеспечивается полное перемещение на самых низких частотах. Однако обычно частотную характеристику усилителя искусственно ограничивают в области низких частот, чтобы исключить появление нежелательной постоянной составляющей в управляющем сигнале. По этой причине характеристики систем с прямым соединением не нормируются на частотах ниже 5 Гц. Простое решение позволяет расширить частотный диапазон систем с прямым соединением до 1 Гц и даже ниже. Последние разработки усилителей мощности (СПАК) являются усилителями постоянного тока и имеют встроенную систему поддержания нулевого положения стола вибратора.

Ограничения на высоких частотах

Верхняя граничная частота большинства вибрационных систем определяется вибратором. С достаточной для практики точностью частотный диапазон для максимальной толкающей силы определяется как частота основного резонанса арматуры умноженная на коэффициент 1.3. Это справедливо для нагрузок с малой массой. При более тяжелых нагрузках, для крепления которых используется оснастка, верхняя частота определяется главным образом конструкцией оснастки.

Ограничения по максимальному ускорению

Величины ускорений (максимальные, синусоидальные), приводимые в таблицах, являются максимальными допустимыми уровнями для системы без нагрузки на столе вибратора. Эти ограничения определяются следующими причинами:

1. Максимальным допустимым уровнем для отдельно взятого вибратора системы. Этот уровень обычно равен 100 g ампл. (но может быть и ниже) и, как правило, не обеспечивает достижения максимальной производительности системы.
2. Максимальным допустимым уровнем системы по толкающей силе. Это относится обычно к системам, у которых усилитель мощности не обеспечивает достижения максимальной толкающей силы вибратора.

В обоих случаях невозможно достигнуть максимального пикового уровня ускорения во всем частотном диапазоне системы при небольшой нагрузке или без нее из-за того, что усилитель мощности не сможет обеспечить требуемое выходное напряжение на частотах, лежащих непосредственно перед частотой основного резонанса арматуры вибратора.

Общие выводы:

1. Определите требуемую толкающую силу с учетом массы арматуры, оснастки и вашей нагрузки.
2. Проверьте, чтобы уровни перемещения и скорости соответствовали режимам ваших испытаний.
3. Максимальную скорость в некоторых случаях можно увеличить при помощи согласующего трансформатора. При этом нужно пропорционально уменьшить толкающую силу.

ПАРАМЕТРЫ СЛУЧАЙНОЙ ВИБРАЦИИ

Параметры случайной вибрации определены стандартом ISO 5344. Параметры толкающей силы основаны на нормированном спектре в диапазоне 20-2000 Гц и отношении пикового значения ускорения к среднеквадратическому значению не менее 3 к 1. Для достижения таких высоких уровней ускорения все усилители мощности фирмы LDS спроектированы таким образом, чтобы обеспечить отношение пикового тока к среднеквадратическому не менее 3-х. Например, каждый 5-киловаттный модуль усилителя модели DPAK отдает выходной ток 50 А скв. при случайной вибрации, при этом пиковое значение тока достигает 150 А.

При сравнении вибрационных систем фирмы LDS с другими вибрационными системами важно, чтобы параметры этих систем определялись стандартом ISO 5344 и чтобы усилители мощности могли отдавать в нагрузку пиковый ток по крайней мере в три раза больше среднеквадратического значения для синусоидального сигнала. Если пиковое значение тока не удовлетворяет этому условию или в сигнале напряжения присутствуют значительные искажения, то в спектре мощности сигнала ускорения появятся нежелательные гармоники, которые могут привести к повреждению объекта испытаний.

Примечание 1.

Стандарт ISO 5344 устанавливает, что параметры толкающей силы при широкополосной случайной вибрации определяются по спектру, плоскому в диапазоне 100-2000 Гц и имеющему наклон 20 дБ/дек. в диапазоне 100-20 Гц. Эти же параметры можно определить по плоскому в диапазоне 20-2000 Гц спектру, который использовался до введения стандарта ISO.

Примечание 2.

Изменения параметров случайной вибрации в зависимости от частотного диапазона, формы спектра и нагрузки.

Создаваемая вибратором сила является функцией как спектральной плотности ускорения (формы спектра ускорения), так и динамической реакции нагрузки (которая может не соответствовать реакции чисто массовой нагрузки). Так как большинство реальных нагрузок имеют жесткое соединение с вибратором только в нижней части частотного диапазона, то получаемое среднеквадратическое ускорение может быть выше ускорения для чисто массовых нагрузок.

В некоторых случаях, если форма спектральной плотности ускорения, применяемая при испытаниях, отличается от формы спектра, определенного производителем, среднеквадратическое случайное ускорение (толкающая сила), создаваемое вибратором может быть меньше требуемого ускорения (толкающей силы), рассчитанного для чисто массовой нагрузки.

Параметры случайной вибрации для систем LDS определены с учетом массовой нагрузки, которая в два раза больше массы арматуры – это соответствует тестовой нагрузке M_1 стандарта ISO 5344. Форма тестового спектра плоская в диапазоне 20-2000 Гц, отношение пикового ускорения к среднеквадратическому ускорению не менее 3-х.

Для других частотных диапазонов, отличных от диапазона 20-2000 Гц, могут понадобиться некоторые корректировки параметров. В общем случае для форм спектров с верхней частотой менее 1000 Гц должна быть откорректирована величина случайной силы. Конкретные изменения будут зависеть от характеристик вибратора и частотного диапазона. Если испытания проводятся в узкополосном диапазоне, мы можем заранее определить производительность системы для любого заданного случайного профиля.

В некоторых случаях при использовании согласующего трансформатора корректировку параметров случайной вибрации можно свести к минимуму, если использовать отвод вторичной обмотки, предназначенной для синусоидального режима. Необходимо следить за тем, чтобы не превысить максимальный ток вибратора.

Общие выводы:

1. Учитывайте частотный диапазон случайной вибрации; если диапазон составляет 50-500 Гц, откорректируйте режимы или определите возможность использования обмотки

трансформатора для синусоидального режима, чтобы увеличить случайную толкающую силу.

2. По возможности рассматривайте нагрузку и оснастку как чистые массы. Это даст гарантированные безопасные границы для реальных нагрузок, у которых может произойти потеря контакта со столом или оснасткой на высоких частотах.
3. При любых сомнениях консультируйтесь с изготовителем вибрационной системы.

ПАРАМЕТРЫ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Параметры ударного процесса определены с учетом того, что ударным импульсом является полуволна синусоиды. Параметры системы обобщены в спецификации системы, в которой определены следующие ограничения:

1. Пиковое значение толкающей силы системы.
2. Уровень пикового ускорения.
3. Уровень пиковой скорости.
4. Пределы пикового ускорения и длительности импульса, которые рассчитаны для вибраторов LDS с перемещением 51 мм.
5. Уровни начального (предимпульсного) и конечного (послеимпульсного) ускорения, которые не превышают 10% заданного ударного уровня.

Общие положения

В большинстве случаев для данной системы пиковое значение толкающей силы примерно такое же, как и для синусоидального режима. Пиковое значение скорости также примерно равно значению скорости для синусоидального режима. Из этого следует, что пиковое значение силы (тока) и скорости (напряжения) можно изменять только переключением обмоток согласующего трансформатора, если таковые имеются.

Пиковое значение силы, развиваемое вибратором при ударе, может в два раза превышать пиковое значение для синусоидального режима при условии, что усилитель имеет достаточно мощности, чтобы обеспечить требуемые ток (силу) и напряжение (скорость) для данной формы ударного импульса. Оптимизировать параметры импульса силы для данной формы ударного импульса при отсутствии требования обеспечения высокой скорости можно также с помощью выбора вторичных обмоток согласующего трансформатора.

Чтобы любой вибратор мог обеспечить толкающую силу при ударе в два раза больше, чем при синусоидальном режиме, обычно необходим более мощный усилитель.

Если не требуется увеличения скорости при ударе, необходимо приблизительно удвоить мощность усилителя, чтобы получить пиковое значение силы ударного импульса в два раза больше, чем пиковое значение силы при синусоидальном режиме.

Важно отметить, что перемещение корпуса вибратора возрастает с увеличением массы нагрузки. Для большинства ударных испытаний можно заблокировать систему виброизоляции вибратора, чтобы корпус вибратора жестко крепился к станине.

Предупреждение: *Блокирование системы виброизоляции не рекомендуется при проведении синусоидальной и случайной вибрации.*

Таблицы режимов при ударных испытаниях можно получить по заказу для любой системы.

РАЗДЕЛ 3. ТЕРМИНОЛОГИЯ

g. 1). Гравитационная постоянная (ускорение свободного падения) равная 9.80665 м/с^2 .
2). Единица измерения перегрузки.

gn. Величина перегрузки. Определяется как отношение ускорения к ускорению свободного падения. Измеряется в g. Например, перегрузка $gn=5g$ равна ускорению $5 \cdot 9.81 \text{ м/с}^2$.

Акселерометр (Accelerometer). Датчик, выходной сигнал которого пропорционален ускорению. Выходной сигнал обычно измеряется в пКл/g (пикокулоны на единицу перегрузки).

Амплитуда (Amplitude). Определяет величину изменения уровня. Ее значение может быть пиковым, среднеквадратическим или средним. По отношению к перемещению она может представляться как пиковое значение или значение размаха (от пика к пику) относительно нулевой или средней точки.

Антирезонанс (Anti-resonance). Антирезонанс проявляется в динамической системе, если при постоянном уровне возбуждения отклик системы на какой-либо частоте стремиться к нулю.

Арматура (Armature). Арматурой называется подвижная часть вибратора. К нижней части арматуры крепится подвижная катушка. Верхняя часть арматуры, называемая столом, имеет резьбовые отверстия для крепления объекта испытаний или оснастки. Синонимы: подвижная система, подвижная часть, стол, вибросистема,

Вибрация (Vibration). Вибрация – это колебания точки или тела относительно положения равновесия.

Гармоника (Harmonic). Гармоника – это компонент, частота которого в целое число раз больше основной частоты. Например, второй гармоникой 100 Гц является 200 Гц.

Декада (Decade). Декада – интервал между двумя частотами, которые отличаются друг от друга в 10 раз. Например 10 – 100 – 1000 или 25 – 250 – 2500.

$$\text{Количество декад} = \lg \frac{\text{верхняя частота}}{\text{нижняя частота}}$$

Демпфер (Damping material). Субстанция или материал, используемый для рассеивания энергии колебаний.

Демпфирование (Damping). Процесс рассеивания энергии колебаний; мероприятия направленные на создание условий рассеивания энергии колебаний.

Децибел, дБ (decibel, dB). Логарифм отношения двух величин:

$$N(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{V_2}{V_1}$$

Для единиц мощности:

$$N(\text{дБ}) = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}$$

Длительность (Duration). Длительность импульса - это время изменения сигнала от нулевого значения до максимального и обратно до нулевого. Обычно выражается в миллисекундах.

Жесткость (Stiffness). Жесткость – это отношение изменения силы или момента к изменению положения (линейного или углового) упругого тела, вызванному изменением силы или момента.

Искажения (Distortion). Изменения формы сигнала, вызванные нелинейными свойствами системы.

Калибровка (Calibration). Применительно к акселерометрам это метод определения их чувствительности по заряду обычно путем сравнения со стандартным акселерометром, у которого чувствительность соответствует международному стандарту. Определение чувствительности акселерометра по известному ускорению зависит от аккуратности пользователя и используемого оборудования.

Колебания (Oscillation). Колебания – это изменение во времени уровня какой-либо величины по отношению к заданному исходному уровню.

Коэффициент демпфирования (Damping factor). Величина, выражающая эффективность метода демпфирования.

Масса (Mass). Масса есть инерционное свойство тела, способность тела ускоряться под действием приложенной силы. Также масса определяет вес тела, помещенного в гравитационное поле. Например, тело массой 1 кг на Земле весит 1 кг, а на Луне – 0,165 кг.

Октава (Octave). Октавой называется интервал между двумя частотами, значения которых отличаются в два раза. Например, 20 Гц и 40 Гц, 500 Гц и 1000 Гц и т.д.

$$\text{Количество во окт ав} = \frac{\lg \frac{fB}{fH}}{\lg 2}$$

Перемещение (Displacement). Перемещение – это векторная величина, которая определяет изменение положения точки или тела. Перемещение выражается пиковым значением или размахом.

Периодический процесс (Periodic). Периодический процесс – это такой процесс, который повторяется через регулярные промежутки времени, следовательно его можно предсказать.

Пик-фактор (Crest factor). Отношение пикового значения к среднеквадратическому. Для синусоиды это отношение равно $\sqrt{2}$. Чтобы перейти от среднеквадратического к пиковому нужно первое умножить на $\sqrt{2}$ (1.414213562). Однако для истинно случайного сигнала пик-фактор равен бесконечности, так как теоретически его уровень может быть равен бесконечности. Поэтому при виброиспытаниях используется значение пик-фактора равное 3, так как при этом значении возможно 99.73% всех условий при нормальном распределении.

Податливость (Compliance). Податливость – величина обратная жесткости.

Поперечное движение (Cross axial motion). Движение не в направлении действия возбуждающей силы. Обычно вызывается смещением центра тяжести объекта испытаний и оснастки.

Простое гармоническое движение (Simple harmonic motion). Самый простой вид движения, при котором амплитуда колебаний изменяется во времени по синусоидальному закону.

Резкость (Jerk). Равна производной по времени от ускорения. Резкость определяет темп изменения ускорения.

Резонанс (Resonance). Резонанс проявляется в системе, когда при постоянном уровне возбуждения реакция системы на какой-либо частоте стремится к бесконечности.

Резонанс обмотки (Armature structural resonance). У электродинамических вибраторов резонанс обмотки наблюдается на частоте, на которой ускорение в центре стола смещено на 90° относительно возбуждающей силы. Сила определяется по току, так как всегда пропорционально ему.

Сила (Force). Сила в один ньютон равна силе, приложенной к телу массой 1 кг и движущемуся с ускорением 1 м/с^2 . Сила может выражаться в килограммах силы (кгс) и иметь пиковое или среднеквадратическое значение.

Сила системы (System force). Определяет максимальную силу, которую может обеспечить вибрационная система. Она равна произведению максимально допустимого ускорения (пикового или среднеквадратического) и массы обмотки.

Сила требуемая (Force required). Определяется произведением подвижной массы (объекта испытаний, оснастки, обмотки и т.д.) и требуемого ускорения.

Скорость (Velocity). Скорость – это темп изменения перемещения. Скорость выражается в м/с или мм/с.

Случайный процесс (Random). Случайный процесс – это такой процесс, изменение уровня которого невозможно предсказать.

Спектральная плотность (Power spectral density). Спектральная плотность (плотность мощностного спектра) описывает мощность случайного колебательного процесса. Она равна среднеквадратическому ускорению в рассматриваемом диапазоне частот. Обычно выражается в единицах $\text{г}^2\text{с}^2/\text{Гц}$.

Степень свободы (Degree of freedom). В механике количество независимых направлений движения материального тела. Например, тело, которое может двигаться только вверх и вниз, имеет одну степень свободы.

Субгармоника (Sub-harmonic). Субгармоника – это компонент, частота которого в целое число раз меньше основной частоты. Например, второй субгармоникой 100 Гц является 50 Гц.

Ускорение (Acceleration). Ускорение представляет собой темп изменения скорости. Оно измеряется в м/с^2 или единицах перегрузки g . $1g=9,80665 \text{ м/с}^2$. Примечание: иногда вместо м/с^2 пишут мс^{-2} .

Широкий диапазон частот (Broad band). Здесь используется применительно к случайной вибрации с частотами более 500 Гц.