

ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ

по материалам фирмы DLI (под редакцией Смирнова В.А.)

Что такое вибрация?

Вибрация - это механические колебания тела.

Самый простой вид вибрации - это колебание или повторяющееся движение объекта около положения равновесия. Этот тип вибрации называется общей вибрацией, потому что тело перемещается как единое целое и все его части имеют одинаковую по величине и направлению скорость. Положением равновесия называют такое положение, в котором тело находится в состоянии покоя или положение которое оно займет, если сумма действующих на него сил равна нулю.

Колебательное движение твердого тела может быть полностью описано в виде комбинации шести простейших типов движения: поступательного в трех взаимно перпендикулярных направлениях (x, y, z в декартовых координатах) и вращательного относительно трех взаимно перпендикулярных осей (Ox, Oy, Oz). Любое сложное перемещение тела можно разложить на эти шесть составляющих. Поэтому о таких телах говорят, что они имеют шесть степеней свободы.

Например, корабль может перемещаться в направлении оси "корма-нос" (прямо по курсу), подниматься и опускаться вверх-вниз, двигаться в направления оси правый борт-левый- борт, а также вращаться относительно вертикальной оси и испытывать бортовую и килевую качку.

Представим себе некий объект, перемещения которого ограничены одним направлением, например, маятник настенных часов. Такая система называется системой с одной степенью свободы, т.к. положение маятника в любой момент времени может быть определено одним параметром- углом в точке закрепления. Другим примером системы с одной степенью свободы является лифт, который может перемещаться только вверх и вниз вдоль ствола шахты.

Вибрация тела всегда вызывается какими-то силами возбуждения. Эти силы могут быть приложены к объекту извне или возникать внутри него самого. Далее мы увидим, что вибрация конкретного объекта полностью определяется силой возбуждения, ее направлением и частотой. Именно по этой причине вибрационный анализ позволяет выявить силы возбуждения при работе машины. Эти силы зависят от состояния машины, и знание их характеристик и законов взаимодействия позволяет диагностировать дефекты последней.

Простейшее гармоническое колебание

Самыми простыми из существующих в природе колебательных движений являются упругие прямолинейные колебания тела на пружине (рис.1).

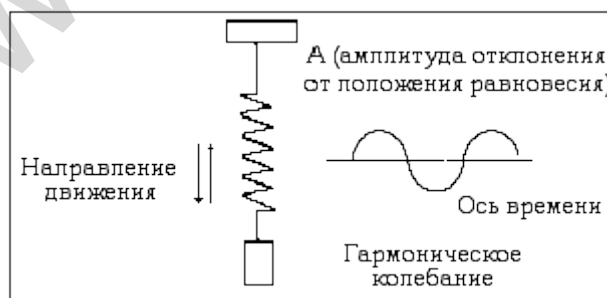


Рис. 1. Пример простейшего колебания.

Такая механическая система обладает одной степенью свободы. Если отвести тело на некоторое расстояние от положения равновесия и отпустить, то пружина вернет его в точку равновесия. Однако тело приобретет при этом определенную кинетическую энергию, проскочит точку равновесия и деформирует пружину в противоположном направлении. После этого скорость тела начнет уменьшаться, пока оно не остановится в другой крайней позиции, откуда сжатая или растянутая пружина опять начнет возвращать тело назад в положение равновесия. Такой процесс будет повторяться вновь и вновь, при этом происходит непрерывное перетекание энергии от тела

(кинетическая энергия) к пружине (потенциальная энергия) и обратно.

На рис.1 представлен также график зависимости перемещения тела от времени. Если бы в системе отсутствовало трение, то эти колебания продолжались бы непрерывно и бесконечно долго с постоянными амплитудой и частотой. В реальных механических системах такие идеальные гармонические движения не встречаются. Любая реальная система обладает трением, которое приводит к постепенному затуханию амплитуды и превращает энергию колебаний в тепло. Простейшее гармоническое перемещение описывается следующими параметрами:

T - период колебаний.

F - частота колебаний, $= 1/T$.

Период - это интервал времени, который необходим для завершения одного цикла колебания, то есть это время между двумя последовательными моментами пересечения нулевой точки в одном направлении. В зависимости от быстроты колебаний, период измеряют в секундах или миллисекундах.

Частота колебаний - величина обратная периоду, определяет количество циклов колебания за период, она измеряется в герцах ($1\text{Гц} = 1/\text{секунду}$). Когда рассматриваются вращающиеся машины, то частота основного колебания соответствует частоте вращения, которая измеряется в об/мин ($1/\text{мин}$) и определяется как:

$$\omega = F \times 60,$$

где F - частота в Гц,
т.к. в минуте 60 секунд.

Уравнения колебаний

Если по вертикальной оси графика отложить положение (смещение) объекта, испытывающего простые гармонические колебания, а по горизонтальной шкале - время (см. рис.1), то результатом будет синусоида, описываемая уравнением:

$$d = D \sin(\omega t),$$

где d - мгновенное смещение;

D - максимальное смещение;

$$\omega = 2\pi F - \text{угловая (циклическая) частота, } \pi = 3,14.$$

Это та самая синусоидальная кривая, которая всем хорошо известна из тригонометрии. Ее можно считать простейшей и основной временной реализацией вибрации. В математике функция синуса описывает зависимость отношения катета к гипотенузе от величины противолежащего угла. Синусоидальная кривая при таком подходе является просто графиком синуса в зависимости от величины угла. В теории вибраций синусоидальная волна также является функцией времени, однако один цикл колебания иногда рассматривают также как изменение фазы на 360 градусов. Об этом мы еще поговорим подробнее при рассмотрении понятия фазы.

Упомянутая выше скорость движения определяет быстроту изменения положения тела. Скорость (или быстрота) изменения некоторой величины относительно времени, как известно из математики, определяется производной по времени:

$$v = dd/dt = \omega D \cos(\omega t),$$

где v - мгновенная скорость.

Из этой формулы видно, что скорость при гармоническом колебании также ведет себя по синусоидальному закону, однако, вследствие дифференцирования и превращения синуса в косинус, скорость сдвинута по фазе на 90 (то есть на четверть цикла) относительно смещения.

Ускорение - это скорость изменения скорости:

$$a = dv/dt = -\omega^2 D \sin(\omega t),$$

где a - мгновенное ускорение.

Следует отметить, что ускорение сдвинuto по фазе еще на 90 градусов, на что указывает отрицательный синус (то есть на 180 градусов относительно смещения).

Из приведенных уравнений видно, что скорость пропорциональна смещению, умноженному на частоту, а ускорение - смещению, умноженному на квадрат частоты.

Это означает, что большие смещения на высоких частотах должны сопровождаться очень большими скоростями и чрезвычайно большими ускорениями. Представьте, например, вибрирующий объект, который испытывает смещение 1 мм с частотой 100 Гц. Максимальная скорость такого колебания будет равна смещению, умноженному на частоту:

$$v = 1 \times 100 = 100 \text{ мм с}$$

Ускорение равно смещению, умноженному на квадрат частоты, или

$$a = 1 \times (100)^2 = 10000 \text{ мм с}^2 = 10 \text{ м с}^2$$

Ускорение свободного падения g равно $9,81 \text{ м/с}^2$. Поэтому в единицах g полученное выше ускорение приблизительно равно

$$10/9,811 \text{ g}$$

Теперь посмотрим, что произойдет, если мы увеличим частоту до 1000 Гц

$$v = 1 \times 1000 = 1000 \text{ мм с} = 1 \text{ м/с},$$

$$a = 1 \times (1000)^2 = 1000000 \text{ мм/с}^2 = 1000 \text{ м/с}^2 = 100 \text{ g}$$

Таким образом, мы видим, что высокие частоты не могут сопровождаться большими смещениями, поскольку возникающие в этом случае огромные ускорения вызовут разрушение системы.

Динамика механических систем

Небольшое компактное тело, например кусочек мрамора, можно представить как простую материальную точку. Если приложить к ней внешнюю силу, она придет в движение, которое определяется законами Ньютона. В упрощенном виде, законы Ньютона гласят, что покоящееся тело будет оставаться в покое, если на него не действует внешняя сила. Если же к материальной точке приложена внешняя сила, то она придет в движение с ускорением, пропорциональным этой силе.

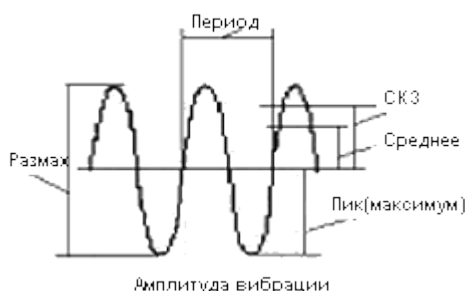
Большинство механических систем является более сложными, чем простая материальная точка, и они совсем не обязательно будут перемещаться под воздействием силы как единое целое. Роторные машины не являются абсолютно твердыми и отдельные их узлы имеют различные жесткости. Как мы увидим далее, их реакция на внешнее воздействие зависит от природы самого воздействия и от динамических характеристик механической конструкции, причем эту реакцию очень тяжело предсказать. Проблемы моделирования и предсказания реакции конструкций на известное внешнее воздействие решаются с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и модального анализа. Здесь мы не будем подробно останавливаться на них, так как они достаточно сложны, однако для понимания сущности вибрационного анализа машин полезно рассмотреть, как взаимодействуют между собой силы и конструкции.

Измерения амплитуды вибрации

Для описания и измерения механических вибраций используются следующие понятия:

Максимальная Амплитуда (Пик) - это максимальное отклонение от нулевой точки, или от положения равновесия.

Размах (Пик-Пик) - это разница между положительным и отрицательным пиками. Для синусоидального колебания размах в точности равен удвоенной пиковой амплитуде, так как временная реализация в этом случае симметрична. Однако, как мы скоро увидим, в общем случае это неверно.



Среднеквадратическое значение амплитуды (СКЗ) равно квадратному корню из среднего квадрата амплитуды колебания. Для синусоидальной волны СКЗ в 1,41 раза меньше пикового значения, однако такое соотношение справедливо только для данного случая.

СКЗ является важной характеристикой амплитуды вибрации. Для ее расчета необходимо возвести в квадрат мгновенные значения амплитуды колебаний и усреднить получившиеся величины по времени. Для получения правильного значения, интервал усреднения должен быть не меньше одного периода колебания. После этого извлекается квадратный корень и получается СКЗ.

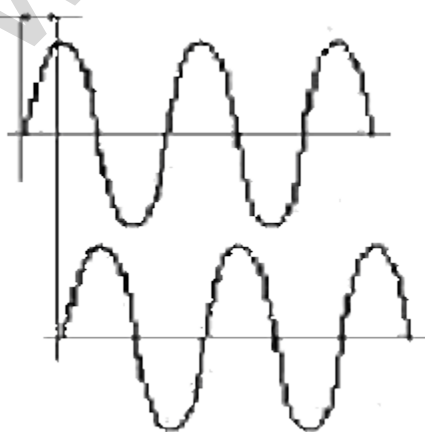


СКЗ должно применяться во всех расчетах, относящихся к мощности и энергии колебания. Например, сеть переменного тока 117В (речь идет о северо-американском стандарте). 117 В - это среднеквадратичное значение напряжения, которое применяется для расчета мощности (Вт), потребляемой включенными в сеть приборами. Напомним еще раз, что для синусоидального сигнала (и только для него) среднеквадратичная амплитуда равна $0,707 \times$ пик.

Понятие фазы

Фаза есть мера относительного сдвига во времени двух синусоидальных колебаний. Хотя по своей природе фаза является временной разностью, ее почти всегда измеряют в угловых единицах (градусах или радианах), которые представляют собой *доли цикла* колебания и, следовательно, не зависят от точного значения его периода.

Задержка 1/4 периода = сдвигу по фазе на 90 градусов

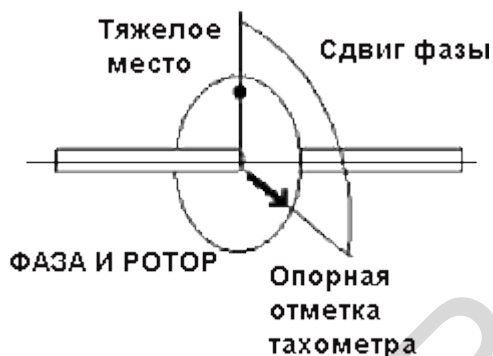


Понятие ФАЗЫ

Разность фаз двух колебаний часто называют *сдвигом фазы*. Сдвиг фазы в 360 градусов представляет собой временную задержку на один цикл, или на один период, что, по существу, означает полную синхронность колебаний. Разность фаз в 90 градусов соответствует сдвигу колебаний на 1/4 цикла друг относительно друга и т.д. Сдвиг фазы может быть положительным либо отрицательным, то есть одна временная реализация может отставать от другой или, наоборот,

опережать ее.

Фазу можно также измерять по отношению к конкретному моменту времени. Примером этого является фаза дисбалансовой компоненты ротора (тяжелого места), взятая относительно положения какой-то его фиксированной точки. Для измерения этой величины необходимо сформировать прямоугольный импульс, соответствующий определенной опорной точке на валу. Этот импульс может генерироваться тахометром или любым другим магнитным или оптическим датчиком, чувствительным к геометрическим или световым неоднородностям на роторе, и называется иногда тахоимпульсом. Измеряя задержку (опережение) между циклической последовательностью тахоимпульсов и вибрацией, вызванной дисбалансом, мы тем самым определяем и их фазовый угол.



Фазовый угол может измеряться относительно опорной точки как в направлении вращения, так и в направлении, противоположном вращению, т.е. либо как фазовая задержка, либо как фазовое опережение. Различные производители оборудования используют как тот, так и другой подходы.

Единицы измерения вибрации

До сих пор мы рассматривали вибросмещение как *меру амплитуды* вибрации. Вибросмещение равно расстоянию от точки отсчета, или от положения равновесия. Помимо колебаний по координате (смещение), вибрирующий объект испытывает также колебания скорости и ускорения. Скорость представляет собой быстроту изменения координаты и обычно измеряется в м/с. Ускорение есть скорость изменения скорости и обычно измеряется в м/с² или в единицах g (ускорение свободного падения).

Как мы уже видели, графиком смещения тела, испытывающего гармонические колебания, является синусоида. Мы показали также, что и виброскорость в этом случае подчиняется синусоидальному закону. Когда смещение максимально, скорость равна нулю, так как в этом положении происходит изменение направления движения тела. Отсюда следует, что временная реализация скорости будет сдвинута по фазе на 90 градусов влево относительно временной реализации смещения. Другими словами, скорость опережает по фазе смещение на 90 градусов.

Вспомнив, что ускорение - это скорость изменения скорости, легко, по аналогии с предыдущим, понять, что ускорение объекта, испытывающего гармонического колебания, также синусоидально и равно нулю, когда скорость максимальна. И наоборот, когда скорость равна нулю, ускорение максимально (скорость изменяется наиболее быстро в этот момент). Таким образом, ускорение опережает по фазе скорость на 90 градусов. Эти соотношения приведены на рисунке.



Существует еще один вибрационный параметр, а именно, быстрота изменения ускорения, называемая **резкостью (jerk)**.

Резкость - это то внезапное прекращение замедления в момент остановки, которое вы ощущаете, когда тормозите на автомобиле, не отпуская педаль тормоза. В измерении этой величины заинтересованы, например, производители лифтов, потому что пассажиры лифтов чувствительны именно к изменению ускорения.

Краткая справка по единицам измерения амплитуды

В англоязычных странах **вибросмещение** обычно измеряют в миллидюймах (1/1000 дюйма; 1 дюйм = 2,54 см), и по традиции применяют значение "peak-to-peak" (размах). В европейских странах принята международная система единиц и вибросмещение измеряют в микрометрах (мкм).

Виброскорость обычно измеряют в м/с или в мм/с, в англоязычных странах - дюйм/с (ips). При измерении виброскорости используются как СКЗ, так и пиковые значения. В некоторых странах, например, в США, в силу давней традиции, пиковое значение является более употребительным.

Виброускорение обычно измеряют в единицах g СКЗ (g - ускорение свободного падения). В действительности g не является системной единицей - это просто то ускорение, которое мы испытываем, находясь на Земле. Стандартными единицами измерения ускорения являются м/с², а в англоязычных странах - дюйм/с². $1g=9.81\text{м/с}^2$.

Процесс преобразования смещения в скорость или скорости в ускорение эквивалентен математической операции дифференцирования. Обратное преобразование ускорения в скорость и скорости в смещение называется интегрированием. Сегодня можно проводить эти операции внутри самих измерительных приборов и легко переходить от параметров измерения к другим.

На практике, однако, дифференцирование приводит к росту шумовой составляющей сигнала, и поэтому оно редко применяется. Интегрирование, напротив, может быть осуществлено с высокой точностью с помощью простых электрических цепей. Это является одной из причин, почему акселерометры сегодня стали основными датчиками вибрации: их выходной сигнал можно легко подвергнуть однократному или двукратному интегрированию и получить либо скорость, либо смещение. Интегрирование, однако, непригодно для сигналов с очень низкой частотой (ниже 1 Гц), так как в этой области уровни паразитного шума чрезвычайно увеличиваются и точность интегрирования падает. Большинство имеющихся на рынке интеграторов правильно работают на частотах выше 1 Гц, что достаточно почти для всех приложений, связанных с вибрациями.

Смещение, скорость и ускорение

Как отмечалось выше, вибрационный сигнал смещения на определенной частоте может быть преобразован в скорость посредством дифференцирования. Дифференцирование сопровождается умножением амплитуды на частоту, поэтому амплитуда виброскорости на определенной частоте пропорциональна смещению, умноженному на эту частоту. При фиксированном смещении, скорость будет удваиваться с удвоением частоты, а если частота увеличится в десять раз, то и скорость умножится на десять.

Чтобы получить из скорости ускорение, необходимо еще одно дифференцирование, а, значит, и еще одно умножение на частоту. Поэтому, ускорение при фиксированном смещении будет пропорционально квадрату частоты.

Проиллюстрируем это на следующем примере: вы без труда можете махать рукой, отводя ее вперед и назад на 30 см, делая один цикл в одну секунду, т.е. с частотой 1 Гц. Вероятно, вы сможете осуществлять движения с такой амплитудой в 5 или 6 раз быстрее, то есть с частотой 5-6 Гц. Однако представьте себе, насколько быстро должна двигаться ваша рука, чтобы проходить туда и обратно то же самое расстояние с частотой 100 Гц или 1000 Гц.

А теперь представьте себе, какую силу вам придется приложить для этого. По второму закону Ньютона, сила равна массе, умноженной на ускорение. Поэтому при заданном смещении сила также пропорциональна квадрату частоты. Именно по этой причине мы никогда не сталкиваемся с процессами, где большие ускорения сопровождаются большими смещениями. На практике просто не существует таких огромных сил, которые требуются для этого, а если бы они нашлись, то были бы крайне разрушительны.

Исходя из этих простых рассуждений, легко понять, что одни и те же вибрационные данные, представленные в виде графиков смещения, скорости или ускорения будут выглядеть по-разному. На

графике смещения будет усилена низкочастотная область, а на графике ускорения - высокочастотная при ослаблении низкочастотной.

Величины смещения, скорости и ускорения в стандартных международных единицах связаны следующими уравнениями:

$$V [\text{мм/с, пик}] = 0,159 \times A / f [\text{мм/с}^2, \text{пик}]$$

$$D [\text{мкм, размах}] = 318,4 \times V / f [\text{мм/с, пик}]$$

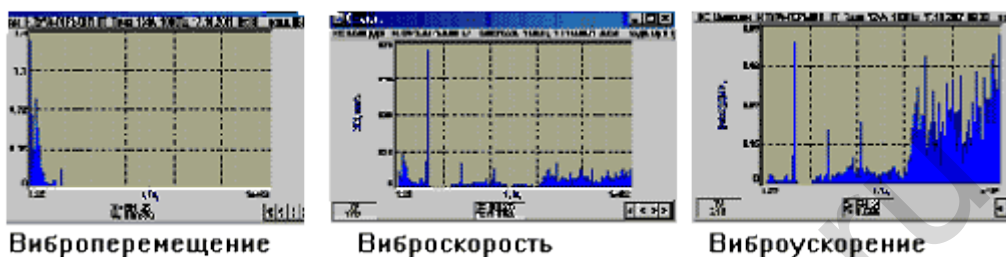
$$D [\text{мкм, размах}] = 50,7 \times A / f^2 [\text{мм/с}^2, \text{пик}]$$

$$V = 1 / (2\pi f) \times A$$

$$D = 1 / (2\pi f)^2 \times A$$

$$D = 1 / (2\pi f) \times V$$

На приведенном рисунке один и тот же вибрационный сигнал представлен в виде виброперемещения, виброскорости и виброускорения.

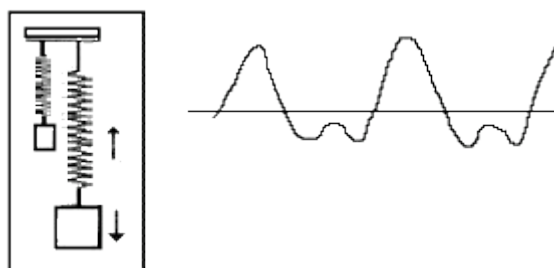


Обратите внимание, что график смещения очень трудно анализировать на высоких частотах, зато высокие частоты хорошо видны на графике ускорения. Кривая скорости наиболее равномерно по частоте среди этих трех. Это типично для большинства роторных машин, однако в некоторых ситуациях самыми равномерными являются кривые смещения или ускорения. Лучше всего выбирать такие единицы измерения, для которых частотная кривая выглядит наиболее плоской: тем самым обеспечивается максимум визуальной информации для наблюдателя. Для диагностики машин наиболее часто применяется виброскорость.

Сложная вибрация

Вибрация есть движение, вызванное колебательной силой. У линейной механической системы частота вибрации совпадает с частотой возбуждающей силы. Если в системе одновременно действуют несколько возбуждающих сил с разными частотами, то результирующая вибрация будет суммой вибраций на каждой частоте. При этих условиях результирующая временная реализация колебания уже не будет синусоидальной и может оказаться очень сложной.

На данном рисунке высоко- и низкочастотная вибрации накладываются друг на друга и образуют сложную временную реализацию. В простых случаях, подобных этому, достаточно легко определить частоты и амплитуды отдельных компонент, анализируя форму временного графика (временную реализацию) сигнала, однако большинство вибрационных сигналов значительно сложнее, и их гораздо труднее интерпретировать. Для типичной роторной машины часто весьма сложно извлечь необходимую информацию о ее внутреннем состоянии и работе, изучая лишь временные реализации вибрации, хотя в некоторых случаях анализ последних является достаточно мощным инструментом, о чем мы поговорим далее в разделе о мониторинге вибраций машин.



Для возбуждения вибрации необходимо затратить энергию. В случае вибрации машин эта энергия генерируется двигателем самой машины. Таким источником энергии может быть сеть переменного тока, двигатель внутреннего сгорания, паровая турбина и т.д. В физике энергия определяется как способность совершать работу, а механическая работа есть произведение силы на расстояние, на котором действовала эта сила. **Единица измерения энергии и работы в международной системе (СИ) - Джоуль. Один Джоуль эквивалентен силе в один Ньютон, действующей на расстоянии в один метр.**

Доля энергии машины, приходящаяся на вибрацию, обычно не очень велика, по сравнению с полной энергией, необходимой для работы машины.

Мощность есть работа, выполняемая в единицу времени, или энергия, затрачиваемая в единицу времени. В системе СИ мощность измеряется в Ваттах, или в Джоулях в секунду. Мощность в одну лошадиную силу эквивалентна 746 Ваттам. Мощность вибрации пропорциональна квадрату амплитуды колебаний (аналогично, электрическая мощность пропорциональна квадрату напряжения или тока).

В соответствии с законом сохранения энергии, энергия не может возникать из ничего или исчезать в никуда: она переходит из одной формы в другую. Энергия вибраций механической системы постепенно диссипирует (то есть переходит) в тепло.

При анализе вибрации более или менее сложного механизма полезно рассмотреть источники вибрационной энергии и пути, по которым эта энергия передается внутри машины. Энергия всегда движется от источника вибрации к поглотителю, в котором она превращается в тепло. Иногда этот путь может быть очень коротким, однако в других ситуациях энергия может пропутешествовать на большие расстояния, прежде чем поглотится.

Важнейшим поглотителем энергии машины является трение. Различают трение скольжения и вязкое трение. Трение скольжения возникает вследствие относительного перемещения различных частей машины друг относительно друга. Вязкое трение создается, например, пленкой масляной смазки в подшипнике скольжения. Если трение внутри машины мало, то ее вибрация обычно велика, т.к. из-за отсутствия поглощения энергия вибраций накапливается. Например, машины с подшипниками качения, называемыми иногда антифрикционными, обычно вибрируют сильнее, чем машины с подшипниками скольжения, в которых смазка действует как значительный поглотитель энергии. Поглощением энергии вибраций вследствие трения объясняется также применение в авиации заклепок вместо сварных соединений: клепаные соединения испытывают небольшие перемещения друг относительно друга, благодаря чему поглощается энергия вибраций. Тем самым предотвращается развитие вибрации до разрушительных уровней. Подобные конструкции называют сильно демпфированными. Демпфирование - это, по существу, мера поглощения энергии вибраций.

Собственные частоты

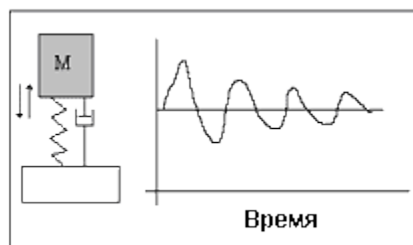
Любая механическая конструкция может быть представлена в виде системы пружин, масс и демпферов. Демпферы поглощают энергию, а массы и пружины - нет. Как мы видели в предыдущем разделе, масса и пружина образуют систему, которая имеет резонанс на характерной для нее собственной частоте. Если подобной системе сообщить энергию (например, толкнуть массу или оттянуть пружину), то она начнет колебаться с собственной частотой, а амплитуда вибрации будет зависеть от мощности источника энергии и от поглощения этой энергии, т.е. демпфирования, присущего самой системе. Собственная частота идеальной системы масса-пружина без демпфирования дается соотношением:

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}},$$

где F_n - Собственная частота;

k - коэффициент упругости (жесткость) пружины;

m - масса.



Отсюда следует, что с увеличением жесткости пружины увеличивается и собственная частота, а с увеличением массы собственная частота падает. Если система обладает демпфированием, а это так для всех реальных физических систем, то собственная частота будет несколько ниже рассчитанного по приведенной выше формуле значения и будет зависеть от величины демпфирования.

Множество систем пружина-масса-демпфер (то есть простейших осцилляторов), которыми можно моделировать поведение механической конструкции, называют степенями свободы. Энергия вибраций машины распределяется между этими степенями свободы в зависимости от их собственных частот и демпфирования, а также в зависимости от частоты источника энергии. Поэтому вибрационная энергия никогда не распределена равномерно по всей машине. Например, в машине с электродвигателем главным источником вибраций является остаточный дисбаланс ротора двигателя. Это приводит к заметным уровням вибрации на подшипниках двигателя. Однако если одна из собственных частот машины близка к оборотной частоте ротора, то ее вибрации могут быть велики и на довольно большом удалении от двигателя. Этот факт необходимо учитывать при оценке вибрации машины: точка с максимальным уровнем вибрации не обязательно располагается рядом с источником возбуждения. Вибрационная энергия часто перемещается на большие расстояния, например, по трубам, и может вызвать настоящее опустошение при встрече с удаленной конструкцией, чья собственная частота близка к частоте источника.

Явление совпадения частоты возбуждающей силы с собственной частотой называется резонансом. При резонансе система имеет колебания на собственной частоте и имеет большой размах колебаний. При резонансе колебания системы сдвинуты по фазе на 90 градусов относительно колебаний возбуждающей силы.

В до резонансной зоне (частота возбуждающей силы меньше собственной частоты) сдвига фаз между колебаниями системы и возбуждающей силы нет. Система движется с частотой возбуждающей силы.

В зоне после резонанса колебания системы и возбуждающей силы находятся в противофазе (сдвинуты относительно друг друга на 180 градусов). Резонансные усиления амплитуды отсутствуют. При росте частоты возбуждения амплитуда вибрации снижается, однако разность фаз в 180 градусов сохраняется для всех частот выше резонансной.

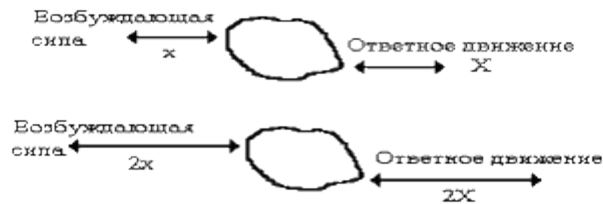
Линейные и нелинейные системы

Для понимания механизма передачи вибраций внутри машины важно усвоить понятие линейности и то, что понимают под линейной или нелинейной системами. До сих пор мы пользовались термином линейный лишь применительно к шкалам амплитуды и частоты. Однако этот термин применяют также для описания поведения любых систем, имеющих вход и выход. Системой мы называем здесь любое устройство или конструкцию, которые могут воспринимать возбуждение в какой-либо форме (вход) и давать на него соответствующий отклик (выход). В качестве примера можно привести магнитофоны и усилители, преобразующие электрические сигналы, или механические конструкции, где на входе мы имеем возбуждающую силу, а на выходе - вибросмещение, скорость и ускорение.

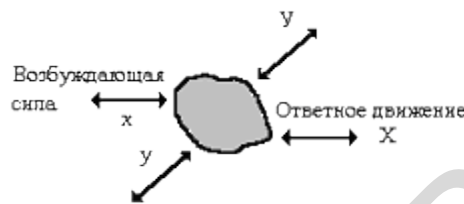
Определение линейности

Систему называют линейной, если она удовлетворяет двум следующим критериям:

Если вход x вызывает в системе выход X , то вход $2x$ даст выход $2X$. Иными словами, выход линейной системы пропорционален ее входу. Это проиллюстрировано на следующих рисунках:



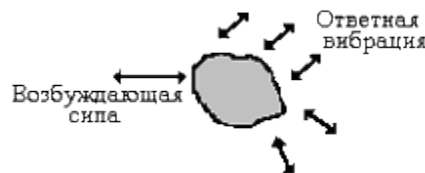
Если вход x дает выход X , а вход y - выход Y , то вход $x+y$ даст выход $X+Y$. Иными словами, линейная система обрабатывает два одновременных входных сигнала независимо друг от друга, причем они не взаимодействуют между собой внутри нее. Отсюда следует, в частности, что линейная система не дает на выходе сигнал с частотами, отсутствовавшими во входных сигналах. Это проиллюстрировано на следующем рисунке:



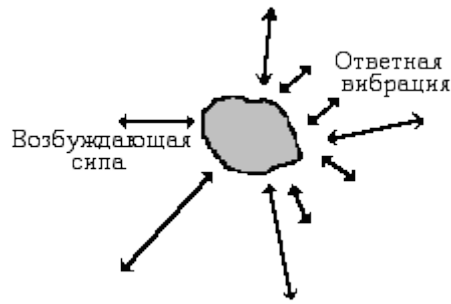
Обратите внимание, что эти критерии отнюдь не требуют, чтобы выход был аналоговым или сходным по своей природе со входом. Например, на входе может быть электрический ток, а на выходе - температура. В случае механических конструкций, в частности, машин, мы будем рассматривать в качестве входа вибрационную силу, а в качестве выхода - саму измеряемую вибрацию.

Нелинейные системы

Ни одна реальная система не является абсолютно линейной. Существует большое разнообразие нелинейностей, которые в той или иной степени присутствуют в любой механической системе, хотя, многие из них ведут себя почти линейно, особенно при слабом входе. Не полностью линейная система имеет на выходе частоты, которых не было на входе. Примером этого являются стереоусилители или магнитофоны, которые генерируют гармоники входного сигнала вследствие так называемое нелинейного (гармонического) искажения, ухудшающего качества воспроизведения. Гармоническое искажение почти всегда сильнее при высоких уровнях сигнала. Например, маленький радиоприемник звучит довольно чисто при тихом уровне громкости, и начинает трещать при усилении звука. Это явление проиллюстрировано ниже:



Многие системы имеют почти линейный отклик на слабый входной сигнал, но становятся нелинейными при более высоких уровнях возбуждения. Иногда существует определенный порог входного сигнала, незначительное превышение которого ведет к сильной нелинейности. Примером может служить отсечение сигнала в усилителе, когда входной уровень превышает допустимый размах напряжения или тока блока питания усилителя.



Еще одним типом нелинейности является взаимная модуляция, когда два или более входных сигнала взаимодействуют друг с другом и производят новые частотные компоненты, или модуляционные боковые полосы, отсутствовавшие в любом из них. Именно с модуляцией связаны боковые полосы в спектрах вибрации.

Нелинейности роторных машин

Как мы уже упоминали, вибрация машины - это, фактически отклик на силы, вызванные ее движущимися частями. Мы измеряем вибрацию в разных точках машины и находим значения сил. Измеряя частоту вибрации, мы предполагаем, что и вызывающие ее силы имеют те же частоты, а ее амплитуда пропорциональна величине этих сил. То есть мы предполагаем, что машина является линейной системой. В большинстве случаев такое предположение разумно.



Однако по мере того, как машина изнашивается, увеличиваются ее зазоры, появляются трещины и разболтанность и т.д., ее отклик будет все больше отклоняться от линейного закона, и в результате характер измеряемой вибрации может стать совершенно отличным от характера возбуждающих сил.

Например, несбалансированный ротор воздействует на подшипник с синусоидальной силой на частоте $1X$, и других частот в этом возбуждении нет. Если механическая структура машины нелинейная, то возбуждающая синусоидальная сила будет искажена, и в результирующем спектре вибрации помимо частоты $1X$ появятся ее гармоники. Количество гармоник в спектре и их амплитуда являются мерой нелинейности машины. Например, по мере износа подшипника скольжения в спектре его вибрации возрастает количество гармоник и увеличиваются их амплитуда.

Гибкие соединения с несоосностью являются нелинейными. Именно поэтому их вибрационные характеристики содержат сильную вторую гармонику оборотной частоты (то есть $2X$). Износ муфты с несоосностью часто сопровождается сильной третьей гармоникой оборотной частоты ($3X$). Когда силы с разными частотами взаимодействуют внутри машины нелинейным образом, возникает модуляция, и в спектре вибрации появятся новые частоты. Эти новые частоты, или боковые полосы, присутствуют в спектрах дефектных зубчатых передач, подшипников качения и т.д. Если зубчатое колесо имеет эксцентриситет или какую-то неправильную форму, то оборотная частота будет модулировать частоту зацепления зубьев, приводя к боковым полосам в спектре вибрации. Модуляция - это всегда нелинейный процесс, при котором появляются новые частоты, отсутствовавшие в возбуждающей силе.

Резонанс

Резонансом называют такое состояние системы, при котором частота возбуждения близка к собственной частоте конструкции, то есть частоте колебаний, которые будет совершать эта система,

будучи предоставлена самой себе после выведения из состояния равновесия. Обычно механические конструкции имеют множество собственных частот. В случае резонанса уровень вибрации может стать очень высоким и привести к быстрому разрушению конструкции.

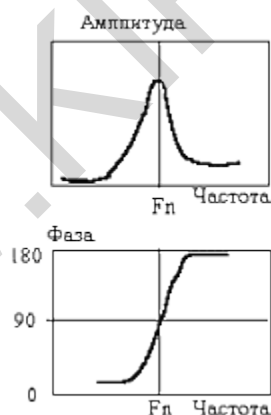
Резонанс проявляется в спектре в виде пика, положение которого остается постоянным при изменении скорости машины. Этот пик может быть очень узким или, наоборот, широким, в зависимости от эффективного демпфирования конструкции на данной частоте.

Для того, чтобы определить, имеет ли машина резонансы, можно выполнить один из следующих тестов:

Тест-удар (bump test) - По машине ударяют чем-нибудь тяжелым, например, киянкой, записывая при этом вибрационные данные. Если машина имеет резонансы, то в ее затухающей вибрации выделяются собственные частоты.

Разгон или Выбег - машину включают (или отключают) и одновременно снимают вибрационные данные и показания тахометра. Когда обороты машины приблизятся к собственной частоте конструкции, на временной реализации вибрации появятся сильные максимумы.

Тест с вариацией скорости - скорость машины меняют в широком диапазоне (если это возможно), снимая данные вибрации и показания тахометра. Полученные данные затем интерпретируют так же, как в предыдущем тесте. На рисунке приведена идеализированная кривая механического резонансного отклика. Поведение резонирующей системы под воздействием внешней силы, очень интересно и немного противоречит бытовой интуиции. Оно строго зависит от частоты возбуждения. Если эта частота ниже собственной (то есть располагается слева от пика), то вся система будет вести себя подобно пружине, в которой смещение пропорционально силе. В простейшем осцилляторе, состоящем из пружины и массы, именно пружина будет определять отклик на возбуждение такой силой. В этой частотной области поведение конструкции будет совпадать с обыденной интуицией, откликаясь на большую силу большим смещением, причем смещение будет находиться в фазе с силой.



В области справа от собственной частоты ситуация другая. Здесь масса играет определяющую роль, и вся система реагирует на силу, грубо говоря, так, как это делала бы материальная точка. Это означает, что пропорциональным приложенной силе будет ускорение, а амплитуда смещения будет относительно неизменной с изменением частоты.

Отсюда следует, что вибросмещение будет в противофазе с внешней силой (так как оно в противофазе с виброускорением): когда вы будете давить на конструкцию, она будет двигаться к вам и наоборот!

Если частота внешней силы в точности совпадает с резонансом, то система будет вести себя совершенно по-другому. В этом случае реакции массы и пружины взаимоуничтожатся, и сила будет видеть только демпфирование, или трение, системы. Если система является слабо демпфированной, то внешнее воздействие будет подобно толканию воздуха. Когда вы пробуете его толкнуть, он легко и невесомо уступает вам. Следовательно, на резонансной частоте вы не сможете приложить к системе большую силу, а если попытаетесь это сделать, то амплитуда вибрации достигнет очень больших значений. Именно демпфирование управляет движением резонансной системы на собственной частоте.

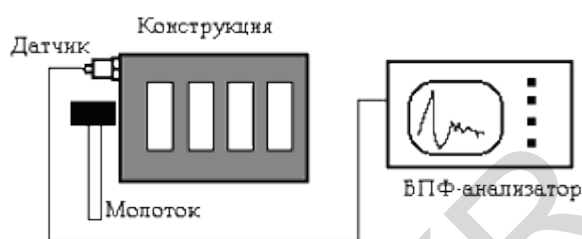
На собственной частоте сдвиг фазы (фазовый угол) между источником возбуждения и откликом

конструкции всегда составляет 90 градусов.

У машин с длинными роторами, например, турбин, собственные частоты называют критическими скоростями. Необходимо следить, чтобы в рабочем режиме таких машин их скорости не совпадали с критическими.

Тест-удар

Тест-удар - это хороший способ найти собственные частоты машины или конструкции. Ударное тестирование является упрощенной формой измерения подвижности, при которой не используется динамометрический молоток, и поэтому величина прилагаемой силы не определяется. Получающаяся в результате кривая не будет корректной в точном смысле. Однако пики этой кривой будут соответствовать истинным значениям собственных частот, что обычно достаточно для оценки вибрации машины.



Проведение Тест-удара с помощью БПФ анализатора чрезвычайно просто. Если анализатор обладает встроенной функцией отрицательной задержки, то ее триггер устанавливают на величину порядка 10% длины временной записи. Затем по машине вблизи места расположения акселерометра ударяют тяжелым инструментом с достаточно мягкой поверхностью. Для удара можно использовать стандартный измерительный молоток или кусок дерева. Масса молотка должна составлять около 10% массы испытываемой машины или конструкции. Если это возможно, временное окно БПФ анализатора должно быть экспоненциальным, чтобы обеспечить нулевой уровень сигнала в конце временной записи.

Слева приведена типичная кривая отклика на удар. При отсутствии в анализаторе функции задержки запуска может быть использована немного другая методика. В этом случае выбирается окно Ханна и задаются 8 или 10 усреднений. Затем запускают процесс измерений, а одновременно хаотически ударяют молотком до тех пор, пока анализатор не закончит измерения. Плотность ударов должна быть равномерно распределена во времени, чтобы частота их повторения не появилась в спектре. Если используется трехосевой акселерометр, то будут записываться собственные частоты по всем трем осям.



В этом случае для возбуждения всех мод колебаний убедитесь, что удары наносятся под 45 градусов ко всем осям чувствительности акселерометра.

Частотный анализ

Чтобы обойти ограничения анализа во временной области, обычно на практике применяют частотный, или спектральный, анализ вибрационного сигнала. Если временная реализация есть график во временной области, то спектр - это график в частотной области. Спектральный анализ эквивалентен преобразованию сигнала из временной области в частотную. Частота и время связаны друг с другом следующей зависимостью:

$$\text{Время} = 1/\text{Частота}$$

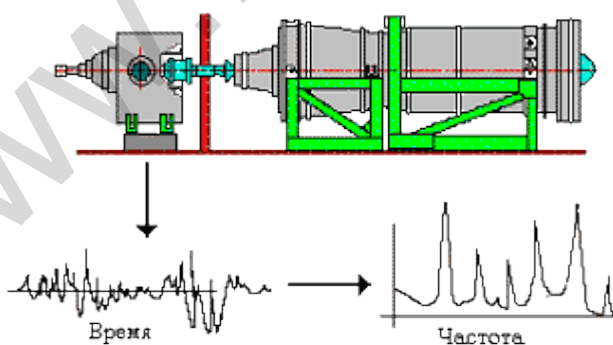
$$\text{Частота} = 1/\text{Время}$$

Расписание автобусов	
Время	Частота
06.10	Каждые 20 мин.
06.30	
06.50	
07.10	
07.30	

Расписание автобусов наглядно выявляет эквивалентность представлений информации во временной и частотной областях. Вы можете перечислить точные времена отправления автобусов (временная область), а можете сказать, что они уходят каждые 20 минут (частотная область). Та же самая информация значительно компактнее выглядит в частотной области. Очень длинное расписание по времени сжимается до двух строчек в частотном виде. Это очень показательно: события, занимающие большой интервал времени сжимаются в частотной области до отдельных полос.

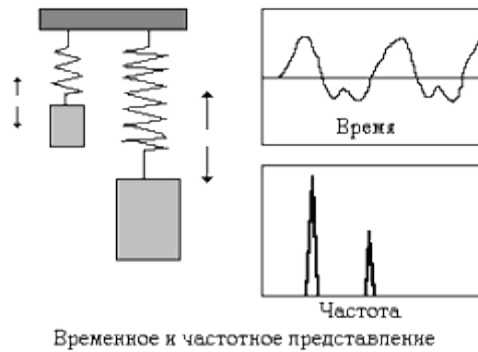
Для чего нужен частотный анализ?

Обратите внимание, что на приведенном рисунке, частотные составляющие сигнала отделены друг от друга и явно выражены в спектре, а их уровни легко идентифицировать. Эту информацию было бы очень непросто выделить из временной реализации.

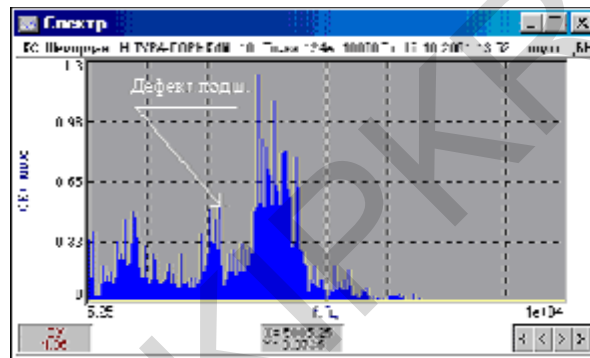


ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ
ЛЕГЧЕ ИДЕНТИФИЦИРОВАТЬ В
ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

На следующем рисунке видно, что события, перекрывающиеся друг с другом во временной области разделяются в частотной области на отдельные компоненты.



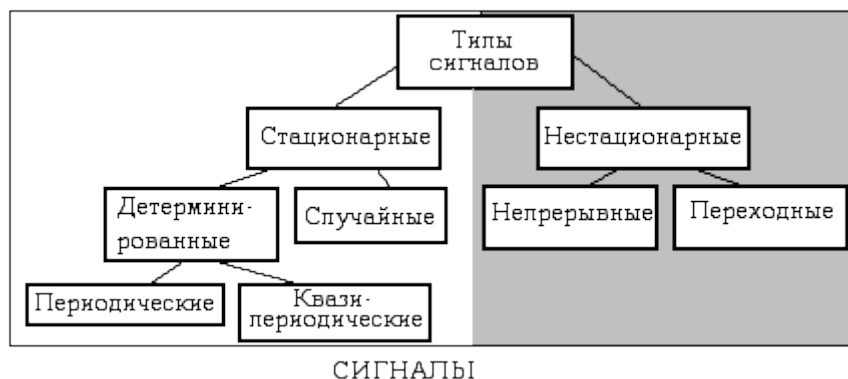
Временная реализация вибрации несет в себе большое количество информации, которая для невооруженного глаза незаметна. Часть этой информации может приходиться на очень слабые компоненты, величина которых может быть меньше, чем толщина линии графика. Тем не менее подобные слабые компоненты могут быть важны для выявления развивающихся неисправностей в машине, например, дефектов подшипников. Сама суть диагностики и обслуживания по состоянию, заключается в раннем обнаружении зарождающихся неисправностей, поэтому, необходимо обращать внимание и на чрезвычайно малые уровни вибрационного сигнала.



На приведенном спектре очень слабая компонента представляет небольшую развивающуюся неисправность в подшипнике, и она осталась бы незамеченной, если бы мы анализировали сигнал во временной области, то есть ориентировались на общий уровень вибрации. Поскольку СКЗ - это просто общий уровень колебания в широком частотном диапазоне, поэтому небольшое возмущение на подшипниковой частоте может остаться незамеченным в изменении уровня СКЗ, хотя для диагностики это возмущение очень важно.

Как выполняется частотный анализ?

Прежде чем приступить к процедуре выполнения спектрального анализа давайте взглянем на различные типы сигналов, с которыми нам предстоит работать.



С теоретической и практической точек зрения можно разделить сигналы на несколько групп. Различным типам сигналов соответствуют различные типы спектров, и во избежание ошибок при выполнении частотного анализа, важно знать характеристики этих спектров.

Стационарный сигнал

В первую очередь все сигналы делятся на *стационарные* и *нестационарные*. *Стационарный сигнал* имеет постоянные по времени статистические параметры. Если вы посмотрите несколько мгновений на стационарный сигнал и затем через какое-то время опять вернетесь к нему, то он будет выглядеть, по существу, тем же самым, то есть его общий уровень, распределение амплитуды и стандартное отклонение будут почти неизменными. Роторные машины производят, как правило, стационарные вибрационные сигналы.

Стационарные сигналы подразделяются далее на детерминированные и случайные. *Случайные (нестационарные) сигналы* непредсказуемы по своему частотному составу и уровням амплитуды, однако их статистические характеристики все-таки почти постоянны. Примеры случайных сигналов - дождь, падающий на крышу, шум реактивной струи, турбулентность в потоке газа или жидкости и кавитация.

Детерминированный сигнал

Детерминированные сигналы представляют собой специальный класс стационарных сигналов. Они сохраняют относительно постоянный частотный и амплитудный состав в течение длительного периода времени. Детерминированные сигналы генерируются роторными машинами, музыкальными инструментами и электронными генераторами. Они подразделяются в свою очередь на *периодические* и *квазипериодические*. Временная реализация периодического сигнала непрерывно повторяется через равные отрезки времени. Частота повторения квазипериодической временной формы варьируется во времени, однако на глаз сигнал кажется периодическим. Иногда роторные машины производят квазипериодические сигналы, особенно это относится к оборудованию с ременной передачей.

Детерминированные сигналы - это, по-видимому, наиболее важный тип для анализа вибраций машин, а их спектры схожи с приведенным здесь:

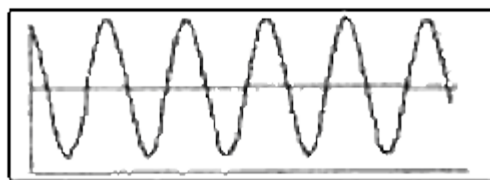
Периодические сигналы всегда имеют спектр с дискретными частотными компонентами, называемыми гармониками или гармоническими последовательностями. Сам термин гармоника пришел из музыки, где гармоники - это целые кратные фундаментальной (опорной) частоты.

Нестационарный сигнал

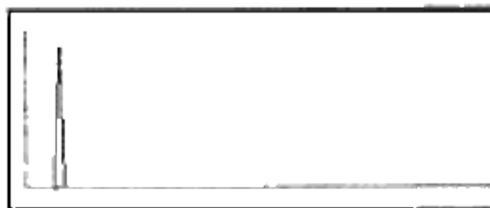
Нестационарные сигналы подразделяют на непрерывные и переходные. Примеры нестационарного непрерывного сигнала - вибрация, производимая отбойным молотком или артиллерийская канонада. Переходным, по определению, называют сигнал, начинающийся и заканчивающийся на нулевом уровне и длящийся конечное время. Он может быть очень коротким или довольно долгим. Примеры переходного сигналы - удар молотка, шум пролетающего самолета или вибрация машины на разгоне и выбеге.

Примеры временных реализаций и их спектров

Ниже приведены примеры временных реализации и спектров, иллюстрирующих важнейшие понятия частотного анализа. Хотя данные примеры в некотором смысле идеализированы, поскольку они были получены с помощью электронного генератора сигналов с последующей обработкой БПФ-анализатором. Тем не менее, они, определяют некоторые характерные черты, присущие спектрам вибрации машин.



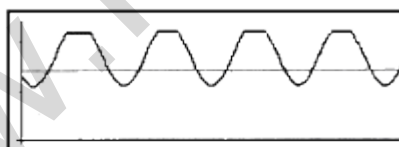
Время



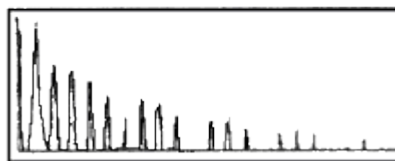
Спектр

Синусоидальное колебание содержит только одну частотную компоненту, а ее спектр - это единичная точка. Теоретически, истинное синусоидальное колебание существует в неизменном виде бесконечное время. В математике преобразование, переводящее элемент из временной области в элемент частотной области, называют преобразованием Фурье. Такое преобразование сжимает всю информацию, содержащуюся в синусоидальном колебании бесконечной продолжительности до единственной точки. На приведенном выше спектре единственный пик имеет конечную, а не нулевую ширину, что обусловлено погрешностью применяемого алгоритма численного расчета, называемого БПФ (см. далее).

В машине с дисбалансом ротора возникает синусоидальная возбуждающая сила с частотой $1X$, то есть один раз за один оборот. Если бы отклик такой машины был абсолютно линейным, то результирующая вибрация была бы также синусоидальной и подобна приведенной выше временной реализации. Во многих плохо сбалансированных машинах временная реализация колебаний действительно напоминает синусоиду, а в спектре вибрации имеется большой пик на частоте $1X$, то есть на оборотной частоте.



Время



Спектр

На следующем рисунке представлен гармонический спектр периодического колебания типа обрезанной синусоиды.

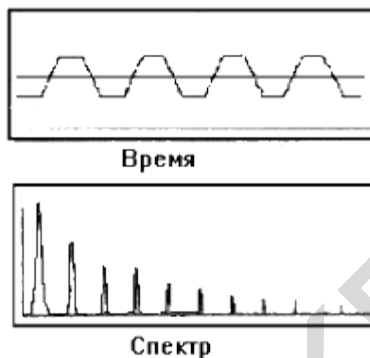
Этот спектр состоит из компонент, разделенных постоянным интервалом, равным $1/(\text{период колебания})$. Самая низшая из этих компонент (первая после нуля), называется основной, а все остальные - ее гармониками. Такое колебание было получено с помощью генератора сигналов, и, как видно из рассмотрения временного сигнала, оно несимметрично относительно нулевой оси (положения равновесия). Это означает, что сигнал имеет постоянную составляющую, превращающуюся в спектре в первую линию слева. Данный пример иллюстрирует способность спектрального анализа воспроизводить частоты вплоть до нулевой (нулевая частота соответствует постоянному сигналу или, другими словами, отсутствию колебаний).

Как правило, при вибрационном анализе машин нежелательно проводить спектральный анализ на таких низких частотах по ряду причин. Большинство датчиков вибраций не обеспечивают

правильные измерения до 0 Гц, и только специальные акселерометры, применяемые, например, в инерциальных навигационных системах, позволяют это делать. Для машинных вибраций наименьшая представляющая интерес частота обычно составляет 0,3X. В некоторых машинах это может быть ниже 1 Гц, чтобы измерять и интерпретировать сигналы ниже в диапазоне ниже 1 Гц необходимы специальные методики.

При анализе вибрационных характеристик машин не так уж редко приходится видеть временные реализации, срезанные наподобие приведенной выше. Обычно это означает, что в машине возникла какая-то разболтанность, и что-то ограничивает движение ослабленного элемента в одном из направлений.

Показанный далее сигнал аналогичен предыдущему, но срез в нем имеет место как с положительной, так и с отрицательной сторон.



В результате временной график колебания (временная реализация) получается симметричным. Сигналы подобного типа могут возникать в машинах, в которых движение ослабленных элементов ограничено в обоих направлениях. В этом случае в спектре также будут присутствовать гармонические составляющие, однако это будут только нечетные гармоники. Все четные гармонические составляющие отсутствуют. Любое периодическое симметричное колебание будет обладать похожим спектром. Спектр сигнала квадратной формы также выглядел бы подобно этому.

Иногда похожий спектр встречается в машине с очень сильной разболтанностью, в которой смещение вибрирующих частей ограничено с каждой стороны. Примером этого является разбалансированная машина с ослабленными затяжными болтами крепления.

Спектр короткого импульса, полученный с помощью генератора сигналов, очень широкий.



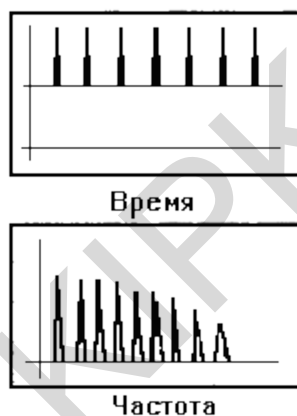
Обратите внимание, что его спектр не дискретный, а непрерывный. Другими словами энергия сигнала распределена по всему частотному диапазону, а не сосредоточена на нескольких отдельных частотах. Это характерно для недетерминированных сигналов, таких как случайный шум, и переходные процессы. Заметьте, что, начиная с определенной частоты, уровень равен нулю. Эта

частота обратно пропорциональна длительности импульса, поэтому чем короче импульс, тем шире его частотный состав. Если бы в природе существовал бесконечно короткий импульс (говоря математически, - *дельта-функция*), то его спектр занимал бы весь частотный диапазон от 0 до $+\infty$.

При исследовании непрерывного спектра обычно невозможно сказать, принадлежит ли он случайному сигналу или переходному. Это ограничение присуще частотному анализу Фурье, поэтому, сталкиваясь с непрерывным спектром полезно изучить его временную реализацию. Применительно к анализу вибрации машины, это позволяет отличить удары, имеющие импульсные временные реализации, и случайный шум, вызванный, например, кавитацией.

Единичный импульс, подобный этому, редко встречается в роторных машинах, однако при ударном тесте этот тип возбуждения используется специально для возбуждения машины. Хотя ее вибрационный отклик не будет такой классически гладкой кривой, какая приведена выше, но тем не менее он будет непрерывным в широком частотном диапазоне и иметь пики на собственных частотах конструкции. Это означает, что удар является очень хорошим типом возбуждения для выявления собственных частот, так как его энергия распределена непрерывно в широком частотном диапазоне.

Если импульс, имеющий приведенный выше спектр, повторяется с постоянной частотой, то результирующий спектр, который показан, здесь, будет уже не непрерывным, а состоящим из гармоник частоты повторения импульса, а его огибающая будет совпадать с формой спектра единичного импульса.

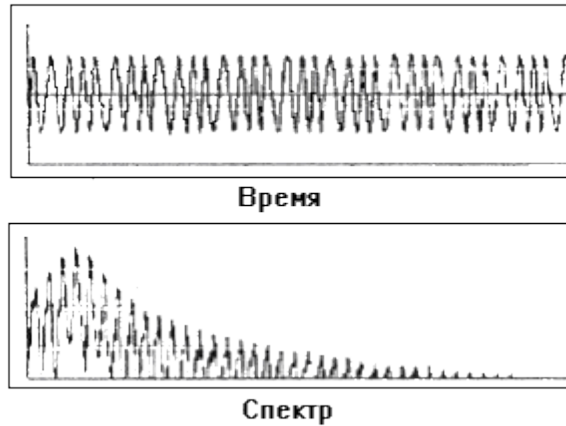


Подобные сигналы производят подшипники с дефектами (выбоины, царапины и т.п.) на одном из колец. Эти импульсы могут быть очень узкими, причем они всегда вызывают появление большой серии гармоник.

Модуляция

Модуляцией называют нелинейное явление, при котором несколько сигналов взаимодействуют друг с другом таким образом, что в результате получается сигнал с новыми частотами, отсутствовавшими в исходных.

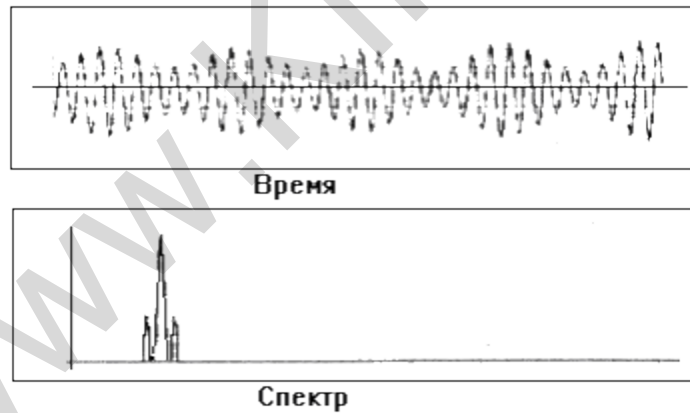
Модуляция - это бич звукоинженеров, поскольку она вызывает модуляционное искажение, досаждающее любителям музыки. Существует множество форм модуляции, включая частотную и амплитудную модуляцию. Давайте рассмотрим по отдельности основные ее типы. Показанная здесь частотная модуляция (frequency modulation - FM) есть варьирование частоты одного сигнала под воздействием другого, имеющего обычно более низкую частоту.



Модулируемая частота называется несущей. На представленном спектре максимальная по амплитуде компонента и есть несущая, а другие составляющие, которые похожи на гармоники, называют боковыми полосами. Последние располагаются симметрично по обеим сторонам от несущей с шагом, равным величине модулирующей частоты. Частотная модуляция часто встречается в спектрах вибрации машин, особенно в зубчатых передачах, где частота зацепления зубьев модулируется оборотной частотой колеса. Она также имеет место в некоторых акустических динамиках, хотя и на очень низком уровне.

Амплитудная модуляция

Частота временной реализации амплитудно модулированного сигнала, кажется постоянной, а ее амплитуда колеблется с постоянным периодом



Этот сигнал был получен посредством быстрого варьирования усиления на выходе электронного генератора сигналов в процессе записи. Периодическое изменение амплитуды сигнала с определенным периодом называют амплитудной модуляцией. Спектр в этом случае имеет максимальный пик на несущей частоте и по одной компоненте с каждой стороны. Эти дополнительные компоненты суть боковые полосы. Обратите внимание, что в отличие от частотной модуляции, приводящей к большому количеству боковых полос, амплитудная модуляция сопровождается только двумя боковыми полосами, которые располагаются относительно несущей симметрично на расстоянии, равном величине модулирующей частоты (в нашем примере модулирующая частота - это частота, с которой играли ручкой усиления при записи сигнала). В данном примере модулирующая частота значительно ниже модулируемой, или несущей, однако на практике они часто оказываются близкими друг к другу (например, на много роторных машинах, имеющих близкие частоты вращения роторов). Кроме того, в реальной жизни и модулирующий, и модулируемый сигналы имеют более сложную форму, чем приведенные здесь синусоиды.

Связь между амплитудной модуляцией и боковыми полосами можно наглядно представить в векторном виде. Представим временной сигнал в виде вращающегося вектора, величина которого равна амплитуде сигнала, а угол в полярных координатах - фазе. Векторное представление синусоидального колебания - это просто вектор постоянной длины, вращающийся вокруг своего начала со скоростью, равной частоте колебания. Каждый цикл временной реализации соответствует одному обороту вектора, т.е. один цикл - это 360 градусов.

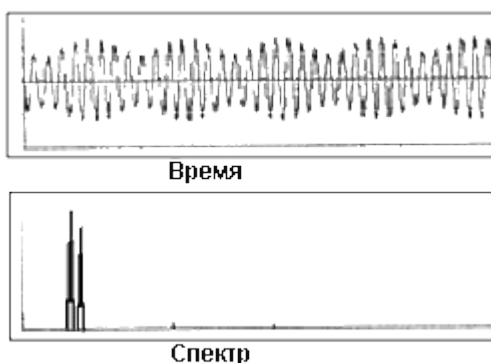
Амплитудная модуляция синусоидального колебания в векторном представлении выглядит как сумма трех векторов: несущей модулируемого сигнала и двух боковых полос, Векторы боковых полос вращаются один чуть быстрее, а другой чуть медленней несущего.

Добавление этих боковых полос к несущей приводит к изменениям амплитуды суммы. При этом несущий вектор кажется неподвижным, как если бы мы находились в системе координат, вращающейся с несущей частотой. Заметим, что при вращении векторов боковых полос между ними поддерживается постоянное фазовое соотношение, поэтому суммарный вектор вращается с постоянной частотой (с частотой несущей).

Чтобы представить подобным образом частотную модуляцию, достаточно ввести небольшое изменение фазовых соотношений боковых векторов. Если боковой вектор меньшей частоты развернуть на 180 градусов, то возникнет частотная модуляция. При этом результирующий вектор качается вперед и назад вокруг своего начала. Это означает возрастание и убывание его частоты, то есть частотную модуляцию. Следует отметить также, что результирующий вектор изменяется по амплитуде. То есть наряду с частотной присутствует и амплитудная модуляция. Чтобы получить векторное представление чистой частотной модуляции, необходимо ввести в рассмотрение множество боковых векторов, имеющих точно определенные фазовые соотношения друг с другом. В вибрации оборудования почти всегда присутствует как амплитудная, так и частотная модуляция. В таких случаях, некоторые боковые полосы могут складываться в противофазе, в результате чего верхние и нижние боковые полосы будут иметь различные уровни, то есть не будут симметричны относительно несущей.

Биения

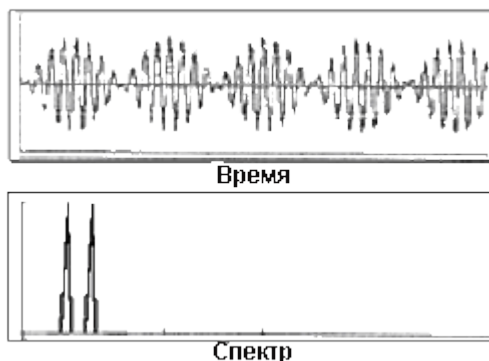
Приведенная временная реализация похожа на амплитудную модуляцию, однако, в действительности, это лишь сумма двух синусоидальных сигналов с немного отличающимися частотами, которая называется биение.



Из-за того, что эти сигналы немного различаются по частоте, их разность фаз изменяется в пределах от нуля до 360 градусов, а это означает, что их суммарная амплитуда будет то усиливаться (сигналы в фазе), то ослабляться (сигналы в противофазе). В спектре биения присутствуют компоненты с частотой и амплитудой каждого сигнала, и полностью отсутствуют боковые полосы. В данном примере амплитуды двух исходных сигналов различны, поэтому они не полностью взаимоуничтожаются в нулевой точке между максимумами. **Биение - это линейный процесс: оно не**

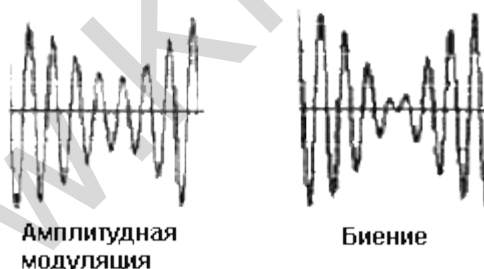
сопровождается появлением новых частотных компонент.

Электродвигатели часто генерируют вибрационные и акустические сигналы, напоминающие биения, в которых частота лже-биения равна удвоенной частоте проскальзывания. В действительности, это есть амплитудная модуляция вибрационного сигнала удвоенной частотой проскальзывания. Такое явление в электродвигателях иногда также называют биением, вероятно, по той причине, что при нем механизм звучит как расстроенный музыкальный инструмент, "бьет".



Этот пример биений аналогичен предыдущему, однако уровни складывающихся сигналов равны, поэтому они полностью взаимоуничтожаются в нулевых точках. Подобное полное взаимоуничтожение весьма редко встречается в реальных вибрационных сигналах роторного оборудования.

Выше мы видели, что биения и амплитудная модуляция имеют похожие временные реализации. Это действительно так, но с небольшой поправкой- в случае биений имеет место сдвиг фазы в точке полного взаимоуничтожений сигналов.

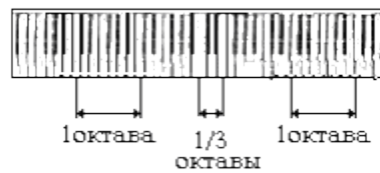


Логарифмическая частотная шкала

До сих пор мы рассматривали только один тип частотного анализа, в котором частотная шкала была линейной. Такой подход применим в том случае, когда частотное разрешение постоянно во всем частотном диапазоне, что характерно для так называемого узкополосного анализа, или анализа в полосах частот с постоянной абсолютной шириной. Именно такой анализ выполняют, например, БПФ-анализаторы.

Существуют ситуации, когда нужно провести частотный анализ, но узкополосный подход не обеспечивает представление данных в наиболее удобной форме. Например, когда изучается неблагоприятное воздействие акустического шума на организм человека. Человеческий слух реагирует не столько на сами частоты, сколько на их соотношения. Частота звука определяется по высоте тона, воспринимаемого слушателем, причем изменение частоты в два раза воспринимается как изменение тона на одну октаву, независимо от того, каковы точные значения частот. Например, изменение частоты звука со 100 Гц до 200 Гц соответствует увеличению высоты на одну октаву, но и увеличение с 1000 до 2000 Гц также есть сдвиг на одну октаву. Этот эффект настолько точно воспроизводится в широком частотном диапазоне, что удобно определить октаву, как полосу частот, у которой верхняя частота в два раза выше нижней, хотя в обыденной жизни октава есть лишь

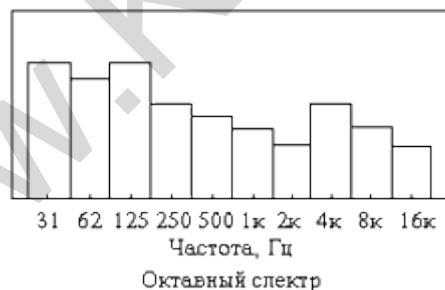
субъективная мера изменения звука.



Подводя итог, можно сказать, что ухо воспринимает изменение частоты пропорционально ее логарифму, а не самой частоте. Поэтому разумно выбирать для частотной оси акустических спектров логарифмическую шкалу, что и делается почти повсеместно. Например, частотные характеристики акустического оборудования всегда даются производителями в виде графиков с логарифмической частотной осью. При осуществлении частотного анализа звука также принято использовать логарифмический частотный масштаб.

Октавный и 1/3-октавный анализ

Октава представляет собой настолько важный частотный интервал для человеческого слуха, что анализ в так называемых октавных полосах утвердился в качестве стандартного типа акустических измерений. На рисунке показан типичный октавный спектр, в котором используются значения центральных частот в соответствии с международными стандартами ISO. Ширина каждой октавной полосы равна приблизительно 70% ее центральной частоты. Иными словами, ширина анализируемых полос увеличивается пропорционально их центральным частотам. По вертикальной оси октавного спектра обычно откладывают уровень в дБ.



Можно возразить, что частотное разрешение при октавном анализе слишком низкое для исследования вибрации машин. Однако можно определить более узкие полосы с постоянной относительной шириной. Наиболее общим примером этого является третьоктавный спектр, где ширина полос составляет примерно 27% от центральных частот. Три третьоктавные полосы укладываются в одну октаву, поэтому разрешение в таком спектре в три раза *лучше, чем при октавном анализе. При нормировании вибрации и шума машин* третьоктавные спектры часто применяются.

Важным преимуществом анализа в полосах частот с постоянной относительной шириной является возможность представления на едином графике очень широкого частотного диапазона с достаточно узким разрешением на низких частотах. Конечно, при этом страдает разрешение на высоких частотах, однако это не вызывает проблем в некоторых приложениях, например, при отыскании неисправностей в машинах.

Для диагностики машин узкополосные спектры (с постоянной абсолютной шириной полосы) очень полезны для обнаружения высокочастотных гармоник и боковых полос, однако для обнаружения многих простых неисправностей машин такое высокое разрешение часто не требуется. Оказывается, что спектры виброскорости большинства машин спадают на высоких частотах, и

поэтому спектры с постоянной относительной шириной полосы являются, обычно, более однородными в широком частотном диапазоне. Это означает, что подобные спектры позволяют лучше использовать динамический диапазон приборов. Третьоктавные спектры достаточно узки при низких частотах, что позволяет выявить первые несколько гармоник оборотной частоты, и могут эффективно использоваться для обнаружения неисправностей с помощью построения трендов.

Следует, однако, признать, что использование спектров с постоянной относительной шириной полосы в целях вибродиагностики не очень широко принято в промышленности, за исключением, быть может, нескольких достойных внимания примеров, таких как подводный флот.

Линейный и логарифмический амплитудные масштабы

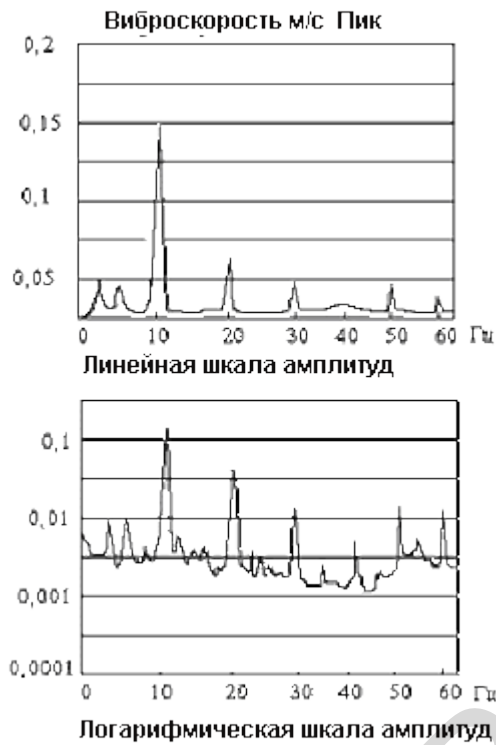
Может показаться, что лучше всего исследовать спектры вибрации в линейном масштабе амплитуды, который дает истинное представление измеренной амплитуды вибрации. При использовании линейной амплитудной шкалы очень легко выявить и оценить наивысшую компоненту в спектре, зато меньшие компоненты можно совершенно упустить или, в лучшем случае, возникнут большие трудности при оценке их величины. Человеческий глаз способен различить в спектре компоненты, которые приблизительно в 50 раз ниже максимальной, но все, что меньше этого будет упущено.

Линейный масштаб может применяться, если все существенные компоненты имеют примерно одинаковую высоту. Однако в случае вибрации машин, зарождающиеся неисправности в таких деталях, как, подшипники, порождают сигналы с очень малой амплитудой. Если мы хотим надежно отследить развитие этих спектральных компонент, толучше всего откладывать на графике логарифм амплитуды, а не ее саму. При таком подходе мы легко сможем изобразить на графике и визуально интерпретировать сигналы, отличающиеся по амплитуде в 5000, т.е. иметь динамический диапазон по меньшей мере в 100 раз больший, чем позволяет линейный масштаб.

Различные типы амплитудного представления для одной и той же вибрационной характеристики (линейный и логарифмический масштабы амплитуды) представлены на рисунке.

Обратите внимание, что на линейном спектре линейная амплитудная шкала большие пики читаются очень хорошо, но пики с низким уровнем трудно разглядеть. При анализе вибрации машин, однако, часто интересуются именно малыми компонентами в спектре (например, при диагностике подшипников качения). Не забывайте, что при мониторинге вибрации нас интересуют рост уровней конкретных спектральных компонент, указывающий на развитие зародившейся неисправности. В шариковом подшипнике двигателя может развиваться небольшой дефект на одном из колец или на шарике, а уровень вибрации на соответствующей частоте поначалу будет очень маленьким. Но это не означает, что им можно пренебречь, ибо преимущество обслуживания по состоянию в том и заключается, что оно позволяет обнаружить неисправность в начальной стадии развития. Необходимо следить за уровнем этого небольшого дефекта, чтобы предсказать, когда он превратится в существенную проблему, требующую вмешательства.

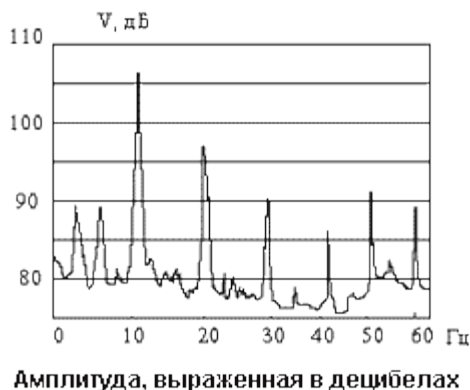
Очевидно, что, если уровень вибрационной компоненты, соответствующей какому-то дефекту, удваивается, то значит с этим дефектом произошли большие изменения. Мощность и энергия вибрационного сигнала пропорциональны квадрату амплитуды, поэтому ее удвоение означает, что в четыре раза больше энергии диссипирует в вибрацию. Если мы попытаемся отследить спектральный пик с амплитудой около 0.0086 мм/с, то нам придется очень непросто, потому что он окажется слишком маленьким по сравнению с гораздо более высокими компонентами.



На 2-м из приведенных спектров представлена не сама амплитуда вибрации, а ее логарифм. Поскольку в этом спектре используется логарифмическая амплитудная шкала, умножение сигнала на любую константу означает простой сдвиг спектра вверх без изменения его формы и соотношений между компонентами.

Как известно, логарифм произведения равен сумме логарифмов множителей. Это означает, что если изменение коэффициента усиления сигнала, не влияет на форму его спектра в логарифмическом масштабе. Этот факт значительно упрощает визуальную интерпретацию спектров, измеренных при различных коэффициентах усиления - кривые просто смещаются на графике вверх или вниз. В случае использования линейной шкалы форма спектра резко изменяется при изменении коэффициента усиления прибора. Обратите внимание, что хотя по вертикальной оси на приведенном графике используется логарифмическая шкала, единицы измерения амплитуды остаются линейными (мм/с, дюймы/с), что соответствует увеличению количества нулей после запятой.

И в данном случае мы получили огромное преимущество для визуальной оценки спектра, так как вся совокупность пиков и их соотношения теперь стала видимой. Другими словами, если мы будем теперь сравнивать логарифмические спектры вибраций машины, у которой подшипники испытывают износ, то мы увидим рост уровней только у подшипниковых тонов, тогда как уровни других компонент будут оставаться неизменными. Форма спектра сразу изменится, что можно будет обнаружить невооруженным глазом.



На следующем рисунке приведен спектр, где по вертикальной оси отложены децибелы. Это особый тип логарифмической шкалы, который очень важен для вибрационного анализа.

Децибел

Удобной разновидностью логарифмического представления является децибел, или дБ. По существу, он представляет собой относительную единицу измерения, в которой используется отношение амплитуды к некоторому опорному уровню. Децибел (дБ) определяется по следующей формуле:

$$L_v = 20 \lg (U/U_0),$$

где L = Уровень сигнала в дБ;

U - уровень вибрации в обычных единицах ускорения, скорости или смещения;

U_0 - опорный уровень, соответствующий 0 дБ.

Понятие децибела было впервые введено в практику компанией Bell Telephone Labs еще в 20-е годы. Первоначально оно применялось для измерений относительных потерь мощности и отношения сигнал-шум в телефонных сетях. Вскоре децибел стал использоваться в качестве меры уровня звукового давления. Будем обозначать уровень виброскорости в дБ как $V_{дБ}$ (от слова Velocity скорость), и определим его следующим образом:

$$L_v = 20 \lg (V/V_0),$$

или

$$L_v = 20 \lg \{V/(5 \times 10^{-8} \text{ м/с}^2)\}$$

Опорный уровень в 10^{-9} м/с^2 достаточен для того, чтобы все измерения вибраций машины в децибелах были бы положительными. Указанный стандартизованный опорный уровень соответствует международной системе СИ, однако он не признается в качестве стандарта в США и других странах. Например, в ВМС США и многих американских отраслях промышленности в качестве опорного берется значение 10^{-8} м/с . Это приводит к тому, что американские показания для той же виброскорости будут на 20 дБ ниже, чем в СИ. (В российском стандарте используется опорный уровень виброскорости $5 \times 10^{-8} \text{ м/с}$, поэтому российские показания L_v еще на 14 дБ ниже американских).

Таким образом, децибел - это логарифмическая относительная единица амплитуды колебаний, которая позволяет легко проводить сравнительные измерения. Любое увеличение уровня на 6 дБ соответствует удвоению амплитуды, независимо от исходного значения. Аналогично, любое изменение уровня на 20 дБ означает рост амплитуды в десять раз. То есть при постоянном соотношении амплитуд их уровни в децибелах будут различаться на постоянное число, независимо от их абсолютных значений. Такое свойство очень удобно при отслеживании развития вибрации (трендов): рост на 6 дБ всегда указывает на удвоение ее величины.

дБ и соотношения амплитуд

В приведенной ниже таблице показана взаимосвязь между изменениями уровня в дБ и соответствующими отношениями амплитуд.

Мы настоятельно рекомендуем использовать в качестве единиц измерения амплитуды вибрации именно децибелы, так как в этом случае становится доступно гораздо больше информации по сравнению с линейными единицами. Кроме того, логарифмическая шкала в дБ значительно нагляднее, чем логарифмическая шкала с линейными единицами.

Изменение уровня в дБ	Соотношение амплитуд	Изменение уровня в дБ	Соотношение амплитуд
0	1	30	31
3	1,4	36	60
6	2	40	100
10	3,1	50	310

12	4	60	1000
18	8	70	3100
20	10	80	10,000
24	16	100	100,000

Преобразование единиц измерений

Виброускорение и вибросмещение могут также выражаться в децибелах. Чтобы различать между ними, будем обозначать децибелы ускорения - **АдБ** (от Acceleration - ускорение), децибелы скорости - **ВдБ** (от Velocity - скорость), а децибелы смещения - **ДдБ** (от Displacement - смещение). Шкала АдБ является одной из наиболее употребительных; в качестве опорного уровня ускорения обычно используют значение 1 мкг (в России стандартный опорный уровень виброускорения - 1мкм/с², то есть почти в 10 раз ниже; это означает, что значение L_a в АдБ, взятое в соответствии с российским стандартом, будет на 20 дБ выше американского).

Оказывается, что при 3,16 Гц уровни виброскорости в ВдБ и виброускорения в АдБ совпадают (в американской системе это имеет место на частоте 159,2 Гц). Приведенные ниже формулы определяют взаимосвязи между уровнями виброускорения, скорости и смещения в АдБ, ВдБ и ДдБ соответственно:

$$L_V = L_A - 20 \lg(f) + 10,$$

$$L_V = L_D + 20 \lg(f) - 60,$$

$$L_D = L_A - 20 \lg(f^2) + 70,$$

ПРИМЕЧАНИЕ

Ускорение и Скорость в линейных единицах могут быть получены из соответствующих уровней по формулам:

$$A(\text{м/с}^2) = 10^{\frac{(L_a - 120)}{20}}$$

$$V(\text{м/с}) = 10^{\frac{(L_v - 146)}{20}}$$

ПРИМЕЧАНИЕ

Заметим, что для временных реализации во временной области всегда используются линейные единицы измерения амплитуды: мгновенное значение сигнала может быть и отрицательным, и поэтому его невозможно логарифмировать.

ПРИМЕЧАНИЕ

Ниже приведена удобная таблица соответствия уровней в ВдБ и амплитуды в мм/с

√дБ	мм/с	√дБ	мм/с	√дБ	мм/с
60	0,05	90	1,6	120	50
62	0,063	92	2	122	63
64	0,079	94	2,5	124	79
66	0,1	96	3,2	126	100
68	0,13	98	4	128	130
70	0,16	100	5	130	160
72	0,2	102	6,3	132	200
74	0,25	104	7,9	134	250
76	0,32	106	10	136	320

78	0,4	108	13	138	400
80	0,5	110	16	140	500
82	0,63	112	20	142	630
84	0,79	114	25	144	790
86	1	116	32	146	1000
88	1,3	118	40	148	1300

Исходный текст предоставлен компанией "Октава+"

www.kipkr.ru