

В.В. ПЕТРУХИН, С.В. ПЕТРУХИН

**ОСНОВЫ
ВИБРОДИАГНОСТИКИ
И СРЕДСТВА
ИЗМЕРЕНИЯ
ВИБРАЦИИ**



«Инфра-Инженерия»

В.В. Петрухин, С.В. Петрухин

ОСНОВЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов
Российской Федерации по нефтегазовому образованию
в качестве учебного пособия*

**Инфра-Инженерия
Москва
2010**

УДК 622.323:002.5(075.8)

ББК 33.13

ПЗ1

Рецензенты: *Вакулин А.А.*, д.т.н., профессор ТюмГНГУ; *Сергеев С.А.*, к.т.н., директор Тюменского учебного центра ОАО "Сибнефтепровод".

ПЕТРУХИН В.В., ПЕТРУХИН С.В.

П 31 Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации: учебное пособие. - Москва: Инфра-Инженерия, 2010. - 176 с.: ил.

ISBN 978-5-9729-0026-8

Приведены теоретические основы механических колебаний, термины и понятия вибрационной диагностики. Рассмотрены средства и методы измерения вибрации, приведена их классификация. Описано состояние современного рынка отечественных приборов для измерения, обработки и исследования вибрационных параметров. Рассмотрены основные приемы и методы вибродиагностики, приведены типичные случаи неисправностей машин, постановка диагноза методами вибродиагностики.

В основу пособия положены новейшие статьи и материалы ведущих отечественных и зарубежных фирм-диагностов и производителей средств измерения и обработки вибросигналов.

Предназначено для инженерно-технических специалистов, занимающихся разработкой и производством промышленного балансировочного оборудования и виброизмерительной аппаратуры, а также для студентов, обучающихся по специальностям, связанным с эксплуатацией и диагностикой машин и оборудования.

© ПЕТРУХИН В.В., ПЕТРУХИН С.В., авторы, 2010

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2010

ISBN 978-5-9729-0026-8

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ	7
1.1. Простейшее гармоническое колебание	7
1.2. Уравнения колебаний	9
1.3. Динамика механических систем	11
1.4. Измерения амплитуды вибрации	11
1.5. Понятие фазы	13
1.6. Единицы измерения вибрации	14
1.7. Сложные виды вибрации	18
1.8. Собственные частоты	20
1.9. Линейные и нелинейные системы	21
1.10. Нелинейные системы	22
1.11. Нелинейности роторных машин	23
1.12. Резонанс	24
1.13. Частотный анализ	26
1.14. Типы сигналов	28
1.15. Примеры временных реализаций и их спектров	30
1.16. Модуляция	34
1.17. Амплитудная модуляция	35
1.18. Биения	36
1.19. Логарифмическая частотная шкала	38
1.20. Октавный и 1/3-октавный анализ	39
2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ И ШУМА	45
3. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РЫНКА ПРИБОРОВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ	80
3.1. Современное состояние технических средств анализа вибрации	83

3.2. Вибропреобразователи	84
3.3. Простейшие средства измерения и анализа вибрации	99
3.4. Стационарные системы мониторинга и диагностики	102
3.5. Портативные системы мониторинга и диагностики	106
3.6. Исследовательские приборы и системы	111
4. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ	122
4.1. Общий обзор современных методов диагностики	122
4.2. Метод оценки технического состояния машин	131
4.3. Основы анализа данных и поиска неисправностей	144
4.4. Примеры из диагностики машин и оборудования	153
ЛИТЕРАТУРА	167

1.1. Простейшее гармоническое колебание

Вибрация (колебания) - это движение точки или механической системы, при котором происходит поочередное возрастание и убывание по времени, по крайней мере, одной координаты. Другими словами, вибрация - это механические колебания точки или механической системы [1].

Самый простой вид вибрации - 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, т.е. такие тела имеют шесть степеней свободы.

В качестве примера можно привести колебания корабля на волне, который может перемещаться в направлении оси "корма-нос" (прямо по курсу), подниматься и опускаться вверх-вниз, двигаться в направлении оси "правый борт – левый борт", а также вращаться относительно вертикальной оси и испытывать бортовую и килевую качку.

Вибрация тела всегда вызывается какими-то силами возбуждения. Эти силы могут быть приложены к объекту извне или возникать внутри него самого. 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.

Самыми простыми из существующих в природе колебательных движений являются упругие прямолинейные колебания тела на пружине (рис.1.1). 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.

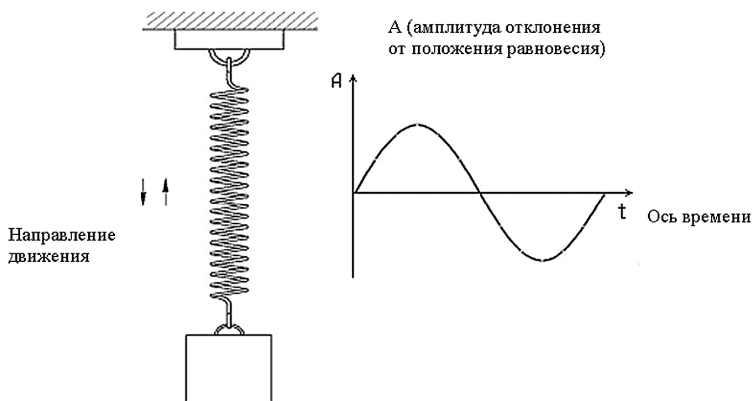


Рис. 1.1. Пример простейшего колебания

Такая механическая система обладает одной степенью свободы.

Процесс будет повторяться вновь и вновь, при этом происходит непрерывное перетекание энергии от тела (кинетическая энергия) к пружине (потенциальная энергия) и обратно.

На рис.1.1 представлен график зависимости перемещения тела от времени. Если бы в системе отсутствовало трение, то 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,

$$F = 1/T .$$

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 Гц= 1/секунду).

Когда рассматриваются вращающиеся машины, то частота основного колебания соответствует частоте вращения, которая измеряется в об/мин (1/мин) и определяется как

$$\omega = F \cdot 60,$$

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

1.2. Уравнения колебаний

Если по вертикальной оси графика отложить положение (смещение) объекта, испытывающего простые гармонические колебания, а по горизонтальной шкале - время (см. рис.1.1), то результатом будет синусоида, описываемая уравнением

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

где d - мгновенное смещение;

D - максимальное смещение;

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

Это обычная синусоида, известная 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.

Скорость движения определяет быстроту изменения положения тела. Скорость (или быстрота) изменения некоторой величины относительно

времени, как известно из математики, определяется производной по времени:

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

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:

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

где a - мгновенное ускорение.

Ускорение сдвинуто 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. 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:

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

Ускорение свободного падения g равно $9,81 \text{ м/с}^2$. Поэтому в единицах g полученное выше ускорение приблизительно равно $10/9,81 g$.

При увеличении частоты произойдет следующее: 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, высокие частоты не могут сопровождаться большими смещениями, поскольку возникающие в этом случае огромные ускорения вызовут разрушение системы.

1.3. Динамика механических систем

Небольшое компактное тело 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 являются более сложными, чем простая материальная точка, и они совсем необязательно 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.

1.4. Измерения амплитуды вибрации

Для описания и измерения механических вибраций используются следующие понятия (рис. 1.2).

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, но 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.

СКЗ является важной характеристикой амплитуды вибрации. Для ее расчета необходимо возвести в квадрат мгновенные значения амплитуды колебаний и усреднить получившиеся величины по времени.

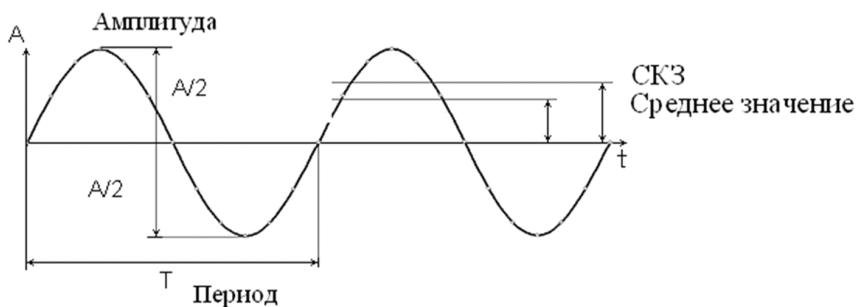


Рис. 1.2. Описание и измерение механических вибраций

Для получения правильного значения интервал усреднения должен быть не меньше одного периода колебания. После этого извлекается квадратный корень и получается СКЗ (рис.1.3).

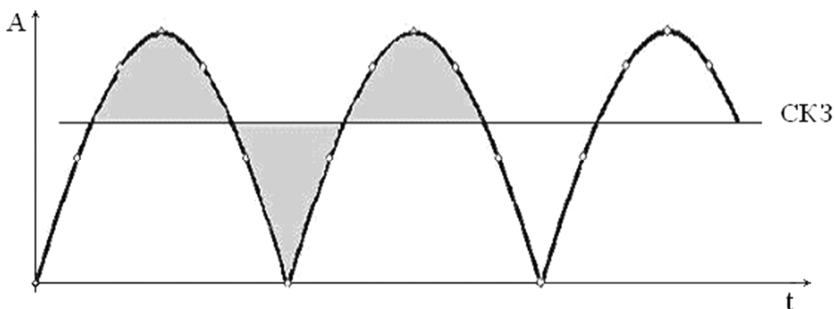


Рис. 1.3. Среднеквадратическое значение (закрашенные площади равны)

СКЗ должно применяться во всех расчетах, относящихся к мощности и энергии колебания. Например, сеть переменного тока 220В. 220В - это среднеквадратичное значение напряжения, которое применяется для расчета мощности (Вт), потребляемой включенными в сеть приборами.

1.5. 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.

Разность фаз двух колебаний часто называют сдвигом фазы. Сдвиг фазы в 360 градусов представляет собой временную задержку на один

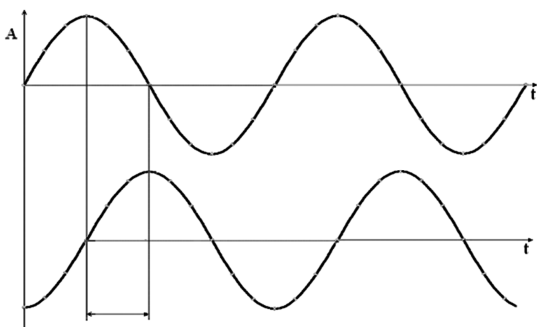


Рис. 1.4. Понятие фазы: задержка $\frac{1}{4}$ периода равна сдвигу по фазе на 90 градусов

цикл, или на один период, что, по существу, означает полную синхронность колебаний. Разность фаз в 90 градусов соответствует сдвигу колебаний на $\frac{1}{4}$ цикла друг относительно друга и т.д. Сдвиг фазы может быть положительным и 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 (тяжелого места) вращающейся детали (ротора), 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, определяется их фазовый угол.



Рис. 1.5. Фазовый угол (отметка)

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.

1.6. Единицы измерения вибрации

Обычно вибросмещение (виброперемещение) представляют 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).

Графиком смещения тела, испытывающего гармонические колебания, является синусоида, 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. Ускорение - это скорость изменения скорости, по аналогии с предыдущим, ускорение объекта, испытывающего гармоническое колебание, также синусоидально и равно нулю, когда скорость максимальна. И наоборот, когда скорость равна нулю, ускорение максимально (скорость изменя-

ется наиболее быстро в этот момент). Таким образом, ускорение опережает по фазе скорость на 90 градусов. Эти соотношения приведены на рис. 1.6.

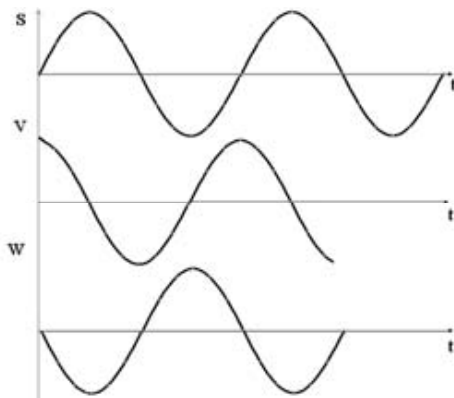


Рис. 1.6. Понятие фазы вибропараметров

Существует еще один вибрационный параметр, а именно, быстрота изменения ускорения, называемая резкостью.

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.

В англоязычных странах вибросмещение 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 пиковое значение. В некоторых странах, например, в США, в силу давней традиции пиковое значение является более употребительным.

Виброускорение измеряется 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/с^2 , а в англоязычных странах - дюйм/с².

Процесс преобразования смещения в скорость или скорости в ускорение эквивалентен математической операции дифференцирования. Обратное преобразование ускорения в скорость и скорости в смещение называется интегрированием. В настоящее время можно проводить эти опера-

ции внутри самих измерительных приборов и легко переходить от одних параметров измерения к другим.

На практике 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 двухкратному 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.

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.

По второму закону Ньютона, сила равна массе, умноженной на ускорение. Поэтому при заданном смещении сила также пропорциональна квадрату частоты. Именно по этой причине на практике не сталкиваются с процессами, где большие ускорения сопровождаются большими смещениями, 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 смещения, скорости или ускорения, представленные в виде графиков 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 рис. 1.7 один и тот же вибрационный сигнал представлен в виде виброперемещения, виброскорости и виброускорения.

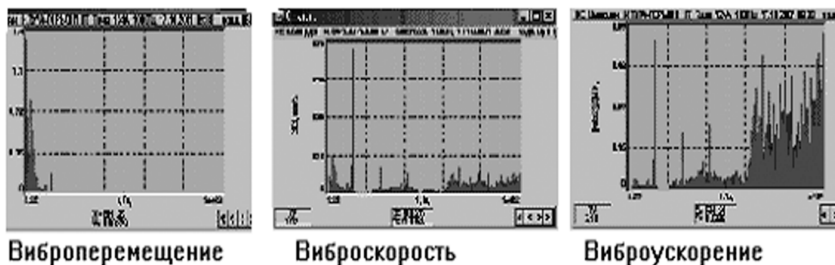


Рис. 1.7. Представление одного сигнала различными параметрами вибрации на мониторе виброизмерителя

График вибросмещения трудно анализировать на высоких частотах, зато высокие частоты хорошо видны на графике ускорения. Кривая скорости наиболее равномерна 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.

1.7. Сложные виды вибрации

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 рис. 1.8 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 ро-

торной 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 диагностики.

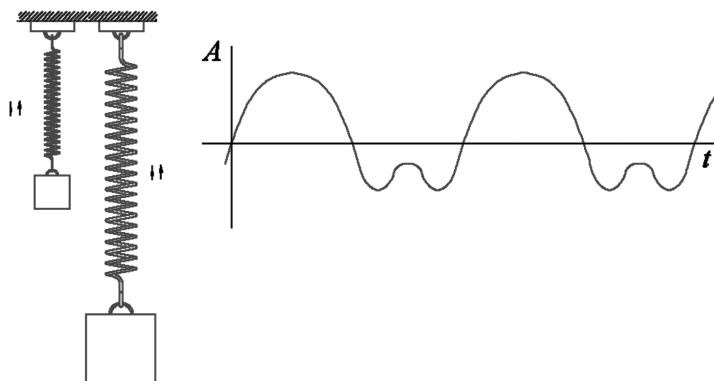


Рис. 1.8. Временная реализация колебательных процессов

Для возбуждения вибрации необходимо затратить энергию. В случае вибрации машин эта энергия генерируется приводом (двигателем) самой машины. Таким источником энергии может быть сеть переменного тока, двигатель внутреннего сгорания, паровая турбина и т.д. В физике энергия определена как способность совершения работы, 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 возникнуть 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 изучить 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, в других ситуациях энергия может пропутешествовать на большие расстояния, прежде чем поглотиться.

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 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 и тем самым предотвращается развитие вибрации до разрушительных уровней. Подобные конструкции называют сильно демпфированными. Демпфирование - по существу, мера поглощения энергии вибраций.

1.8. Собственные частоты

Любая механическая конструкция может быть представлена в виде системы пружин, масс и демпферов. Демпферы поглощают энергию, а массы и пружины - нет. 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 определяется соотношением

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

где Fn - собственная частота;

k - коэффициент упругости (жесткость) пружины;

m - масса.