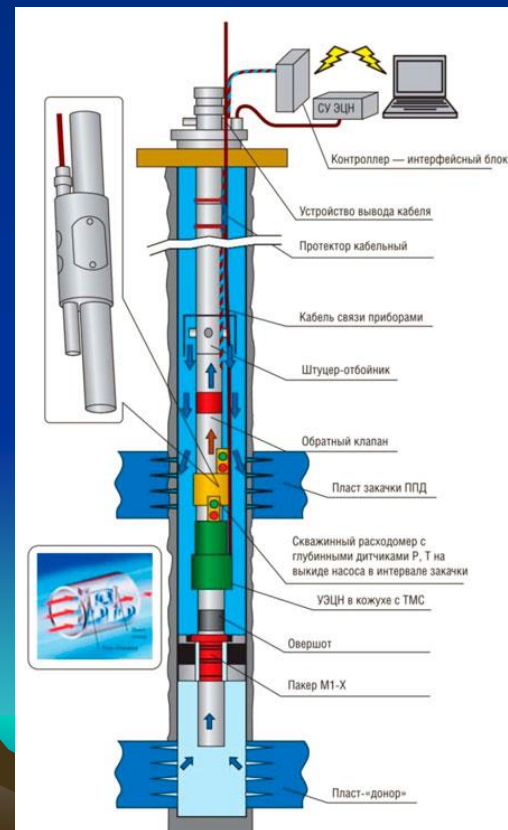


Лекция 5. «МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ»



«МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ»

5.1. Методы измерения вибрации

5.2. Средства измерения вибрации



5.1 Методы измерения вибрации

Вибрация - это механические колебания тела.

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.

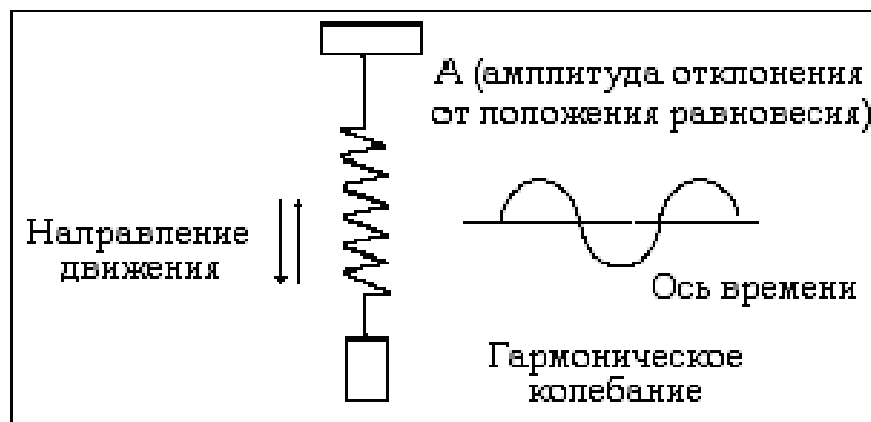


Рис. 5.1. Пример простейшего колебания.

5.1 Методы измерения вибрации

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 (1Гц= 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.

Уравнения колебаний

Если по вертикальной оси графика отложить положение (смещение) объекта, испытывающего простые гармонические колебания, а по горизонтальной шкале - время (см. рис.5.1), то результатом будет синусоида, описываемая уравнением:

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

где d -мгновенное смещение; D -максимальное смещение; $\omega = 2\pi F$ - угловая (циклическая) частота, $\pi = 3,14$.

5.1 Методы измерения вибрации

Скорость (или быстрота) изменения некоторой величины относительно времени, как известно из математики, определяется производной по времени:

$$V = dn/dt = D \cos(\omega t),$$

где n - мгновенная скорость.

Ускорение - это скорость изменения скорости:

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

где a - мгновенное ускорение.

5.1 Методы измерения вибрации

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:

$$V=1*100=100 \text{ мм/с}$$

5.1 Методы измерения вибрации

Ускорение равно смещению, умноженному на квадрат частоты, или

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

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

$$V=1 * 1000 = 1000 \text{ мм с} = 1 \text{ м/с},$$

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

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

5.1 Методы измерения вибрации

Динамика механических систем

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 (рис. 5.2.).

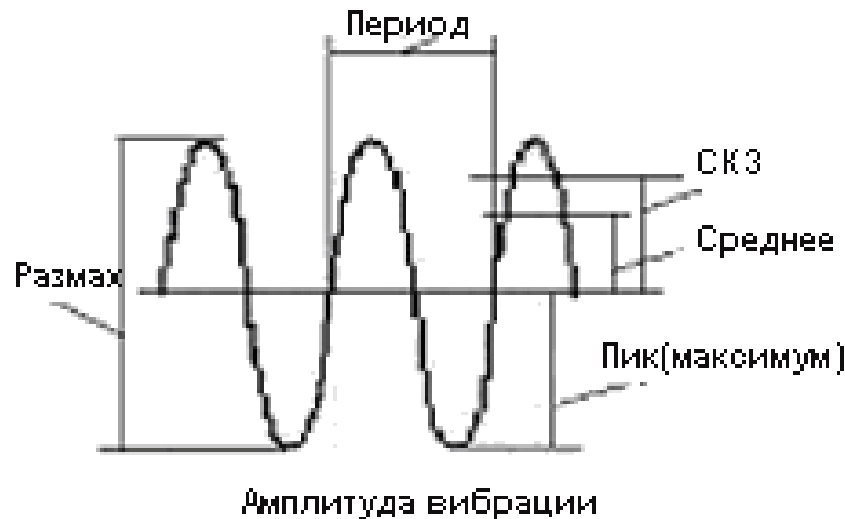


Рис. 5.2. Иллюстрация амплитуды вибрации.

5.1 Методы измерения вибрации

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.



Рис. 5.3. Среднеквадратическое отклонение амплитуды (СКЗ).

5.1 Методы измерения вибрации

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

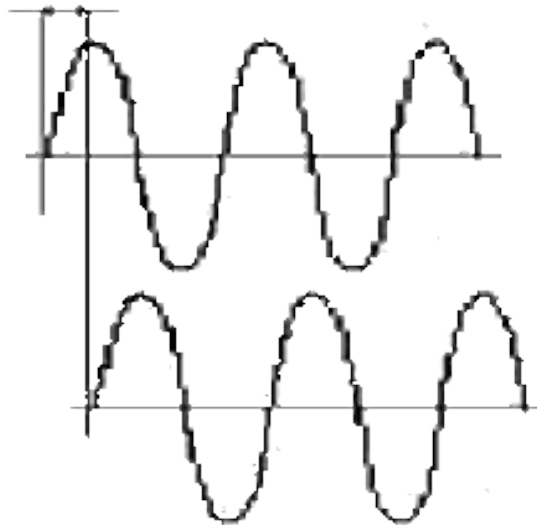


Рис. 5.4. Понятие фазы

5.1 Методы измерения вибрации

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.

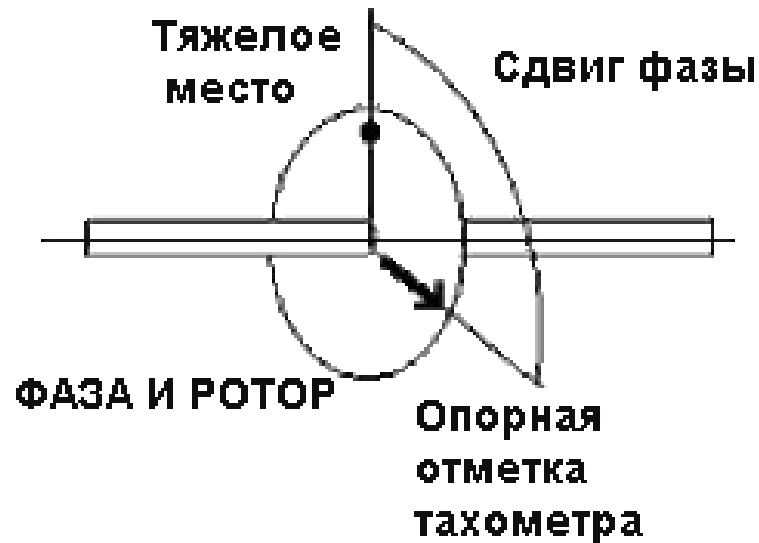


Рис. 5.5. Понятие сдвига фазы.

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.

5.1 Методы измерения вибрации

Единицы измерения вибрации



Рис. 5.6. Соотношения фазы и скорости.

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.

5.1 Методы измерения вибрации

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

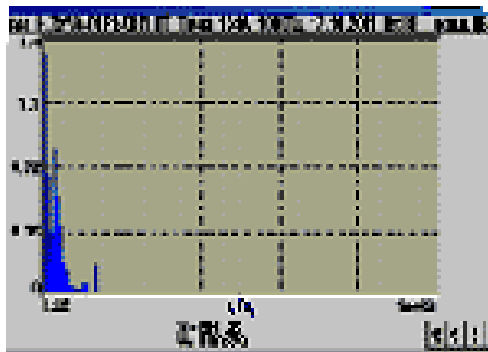
Виброускорение обычно измеряют в единицах g СКЗ (g - ускорение свободного падения). В действительности g не является системной единицей - это просто то ускорение, которое мы испытываем, находясь на Земле. Стандартными единицами измерения ускорения являются м/с^2 , а в англоязычных странах - дюйм/с².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

5.1 Методы измерения вибрации

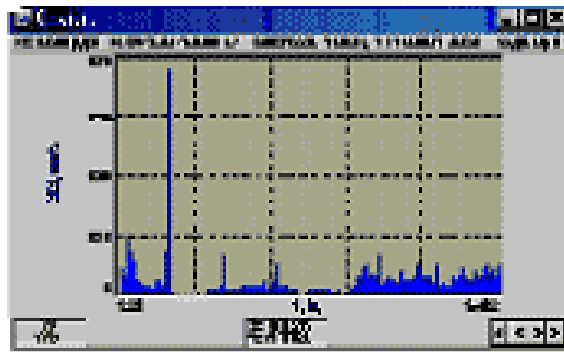
Величины смещения, скорости и ускорения в стандартных международных единицах связаны следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} V [\text{мм/с, пик}] &= 0,159 \times A / f [\text{мм/с}^2, \text{пик}] \\ D [\text{мкм, размах}] &= 318,4 \times V / f [\text{мм/с, пик}] \\ D [\text{мкм, размах}] &= 50,7 \times A / f^2 [\text{мм/с}^2, \text{пик}] \end{aligned}$$

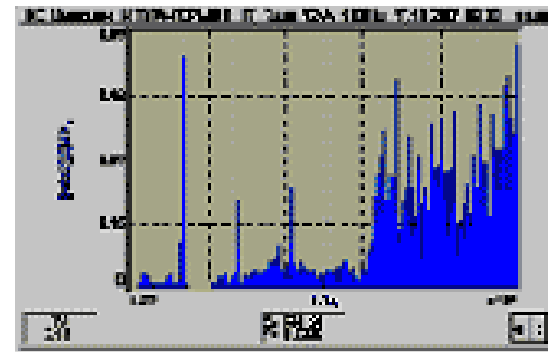
$$\begin{aligned} V &= 1/(2\pi f) \times A \\ D &= 1/(2\pi f)^2 \times A \\ D &= 1/(2\pi f) \times V \end{aligned}$$



Виброперемещение



Виброскорость



Виброускорение

Рис. 5.7. Представление одного вибросигнала в виде виброперемещения, виброскорости и виброускорения.

5.1 Методы измерения вибрации

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.

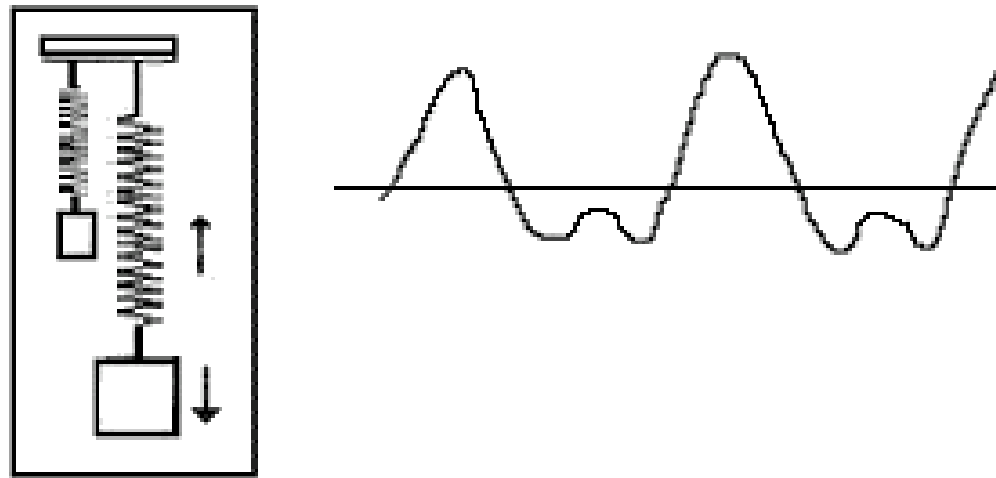


Рис.5.8. Высоко- и низкочастотная вибрации накладываются друг на друга и образуют сложную временную реализацию.

5.1 Методы измерения вибрации

Энергия и мощность

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.

5.1 Методы измерения вибрации

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.

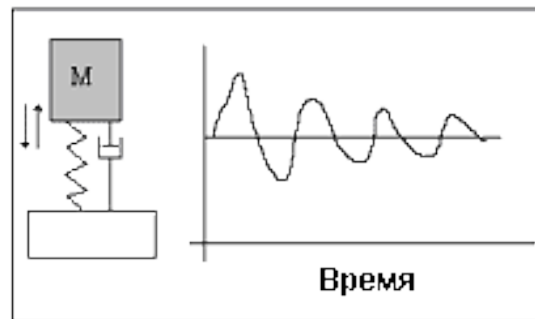


Рис.5.9. Интерпретация понятия собственной частоты.

5.1 Методы измерения вибрации

Линейные и нелинейные системы

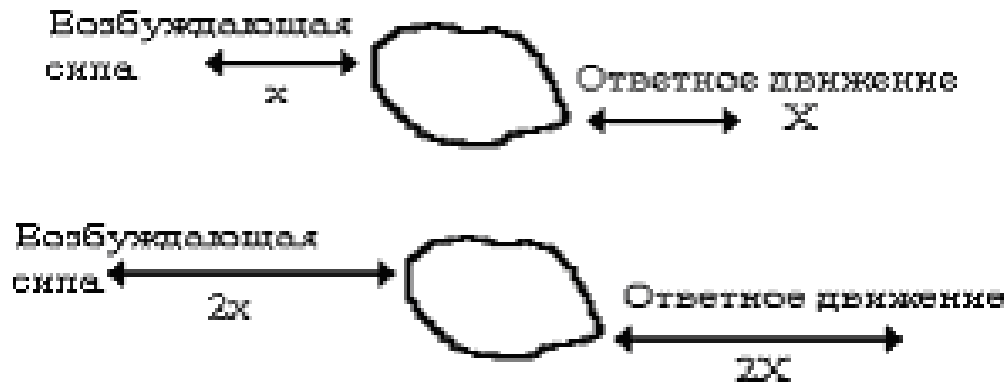


Рис. 5.10. Иллюстрация понятия линейная система.

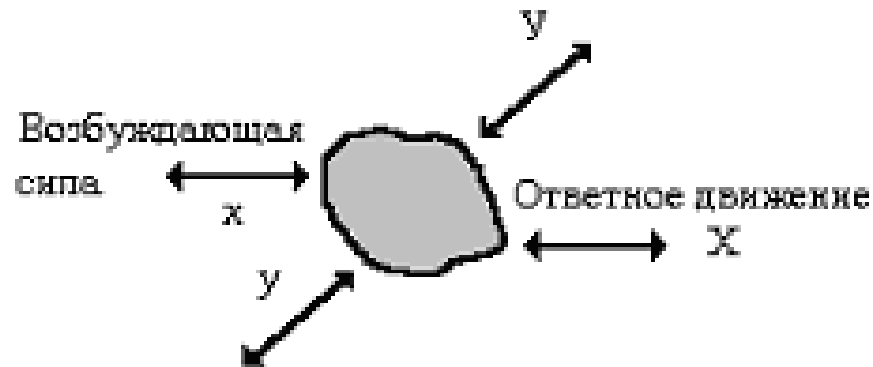


Рис. 5.11. Линейная система не дает на выходе сигнал с частотами, отсутствовавшими во входных сигналах.

5.1 Методы измерения вибрации

Нелинейные системы

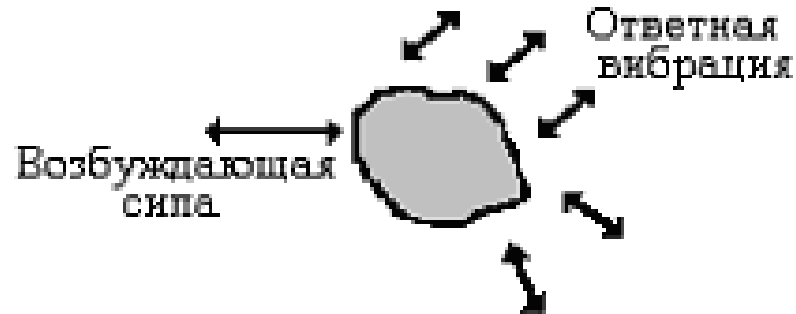


Рис. 5.12. Иллюстрация нелинейной системы.

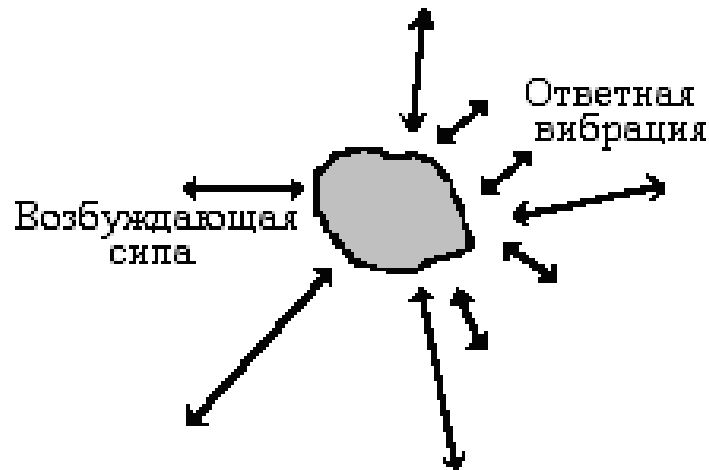


Рис. 5.13. Пример отсечения сигнала в усилителе, когда входной уровень превышает допустимый размах напряжения или тока блока питания усилителя

5.1 Методы измерения вибрации

Нелинейности роторных машин



Рис. 5.14. Иллюстрация нелинейности роторных машин

5.1 Методы измерения вибрации

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 выделятся 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.

5.1 Методы измерения вибрации

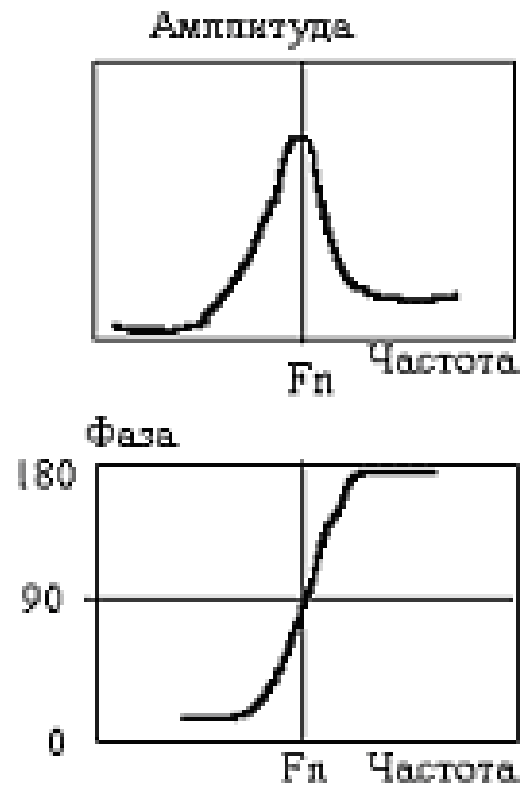


Рис. 5.15.

5.1 Методы измерения вибрации

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 прикладываемой силы не определяется. Получаемая 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.

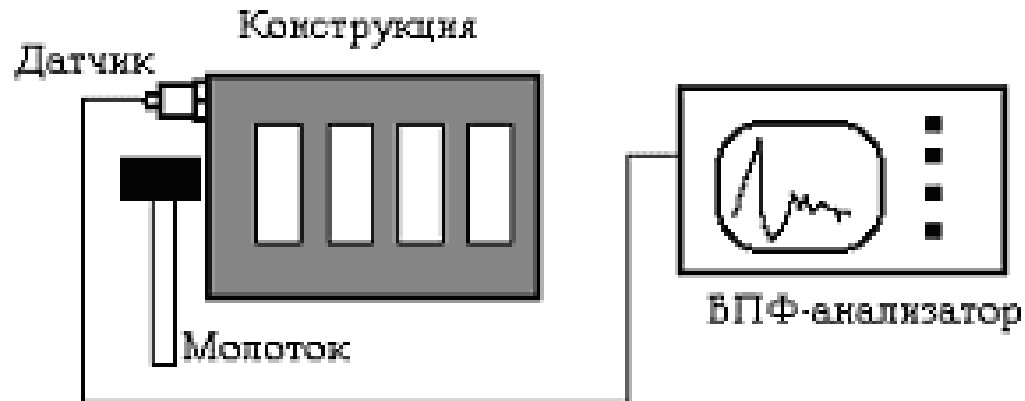


Рис. 5.16. Иллюстрация понятия тест-удар.

5.1 Методы измерения вибрации



Рис. 5.17. Пример записи собственных частот по всем трем осям.

5.1 Методы измерения вибрации

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	

Рис. 5.18. Иллюстрация частотного анализа.

5.1 Методы измерения вибрации

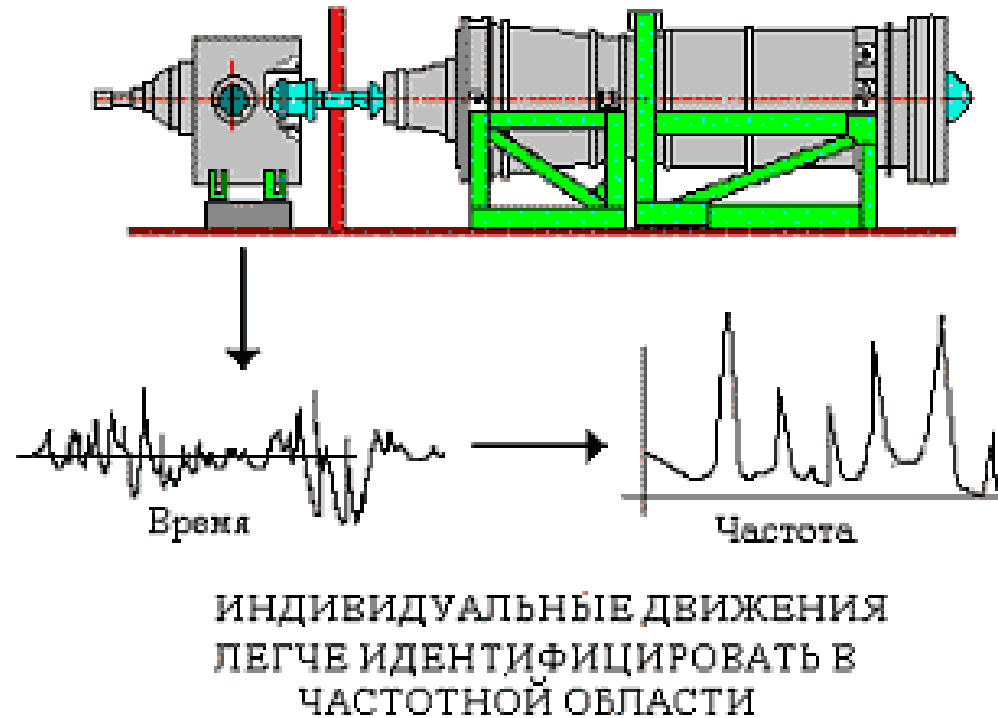


Рис. 5.19. Частотные составляющие сигнала отделены друг от друга и явно выражены в спектре, а их уровни легко идентифицировать.

5.1 Методы измерения вибрации

события, перекрывающиеся друг с другом во временной области разделяются в частотной области на отдельные компоненты.

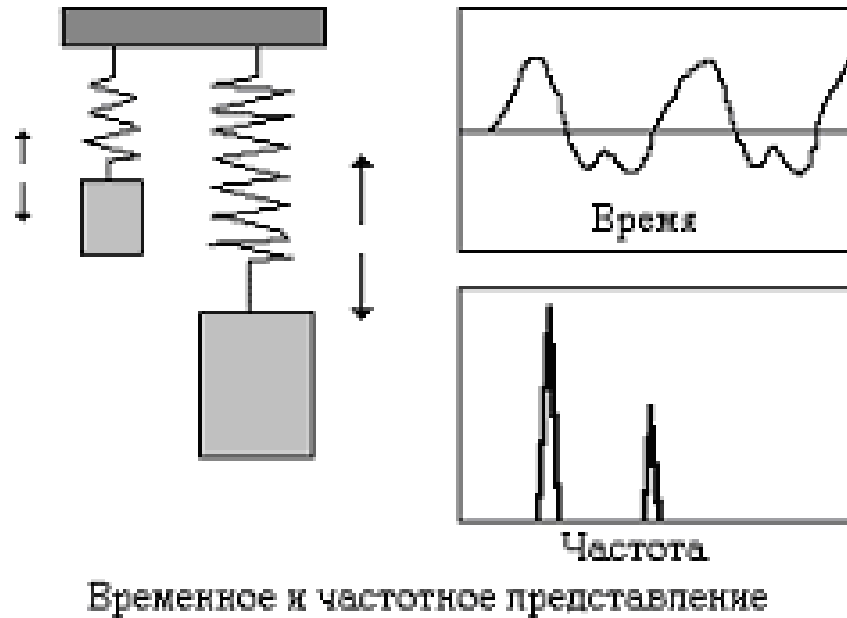


Рис. 5.20. События, перекрывающиеся друг с другом во временной области разделяются в частотной области на отдельные компоненты.

5.1 Методы измерения вибрации

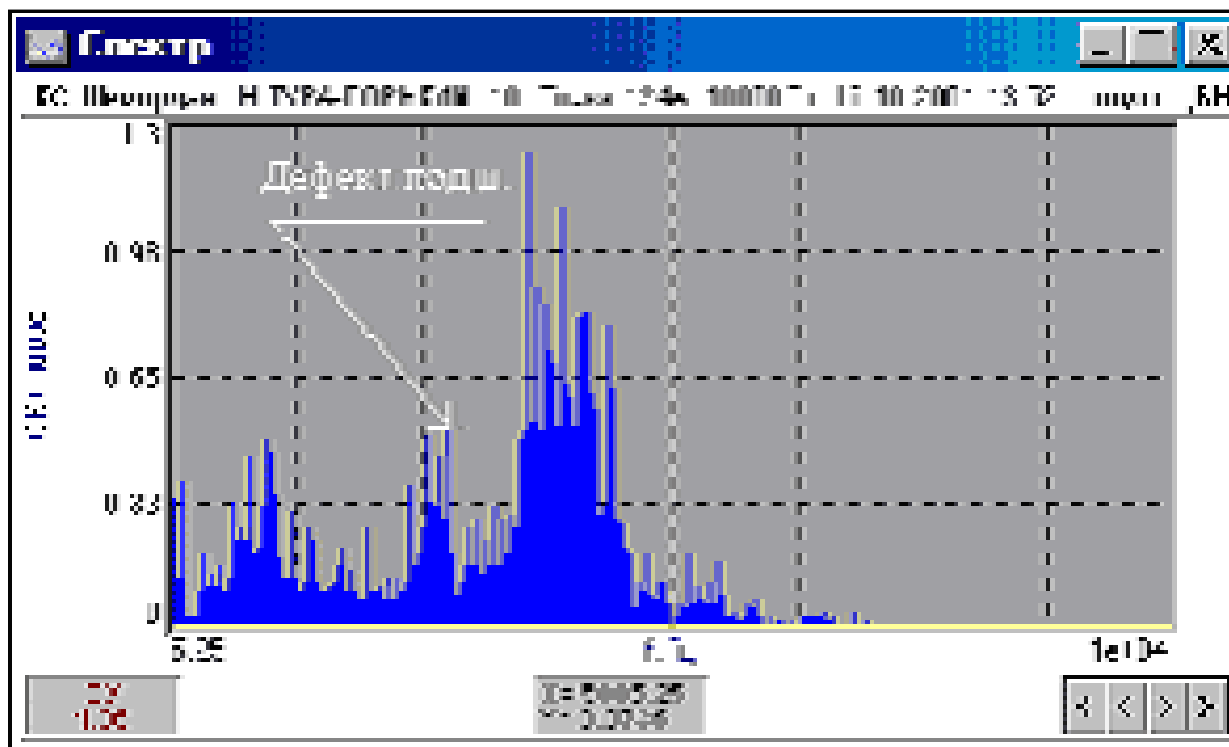


Рис. 5.21. Спектр сигнала.

5.1 Методы измерения вибрации

Как выполняется частотный анализ?

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

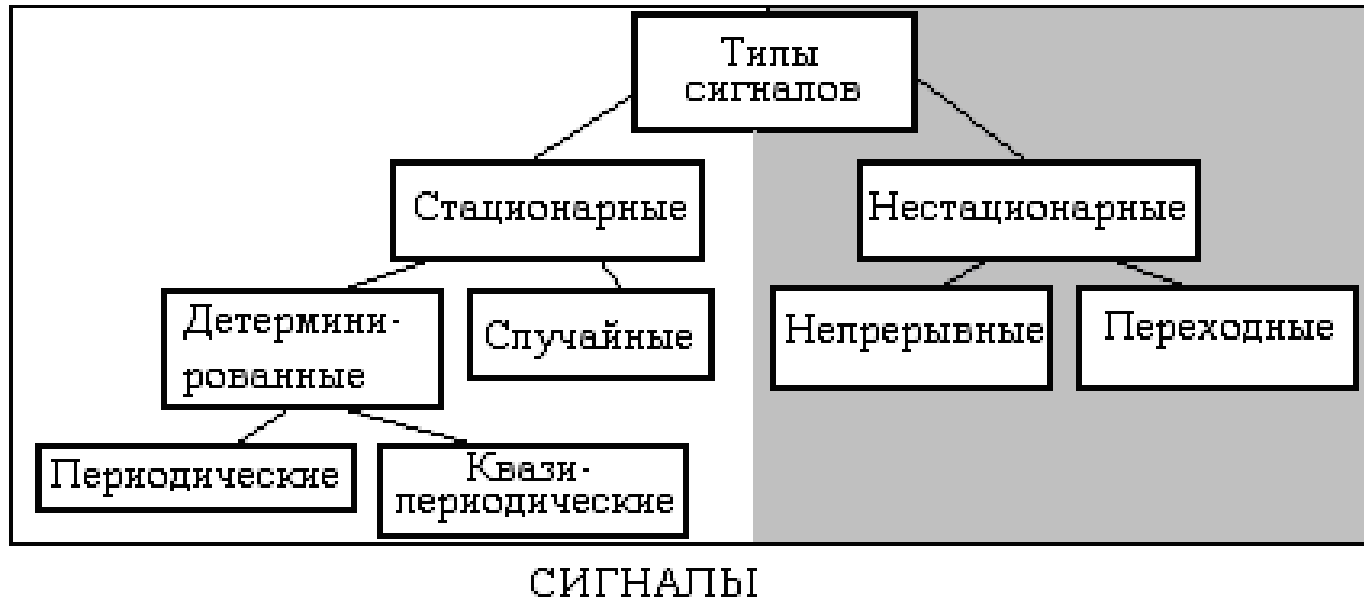


Рис. 5.22. Различные типы сигналов

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.

5.1 Методы измерения вибрации

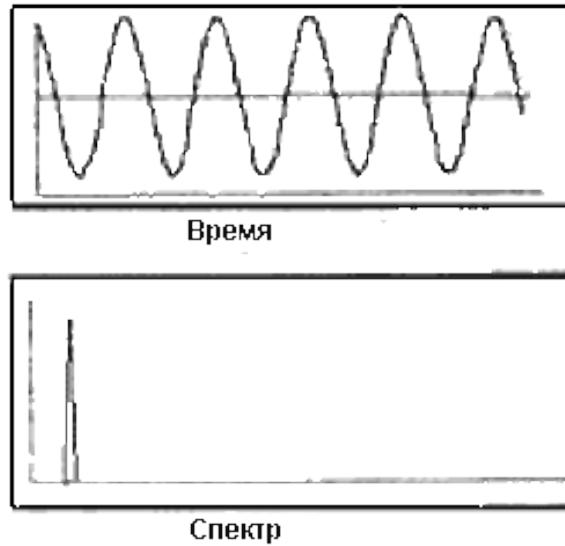


Рис.5.23. Примеры временных реализаций и их спектров

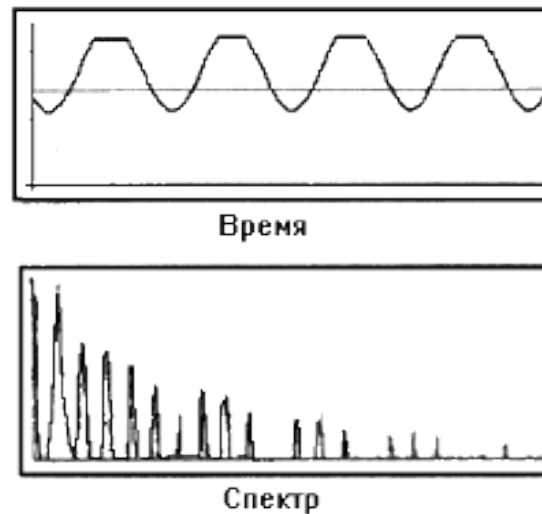
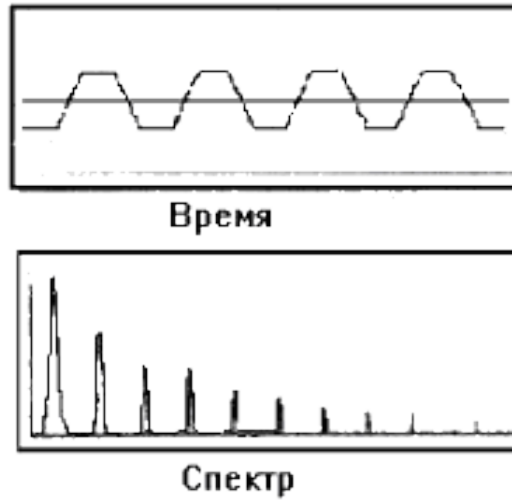


Рис. 5.24. Гармонический спектр периодического колебания типа обрезанной синусоиды

5.1 Методы измерения вибрации

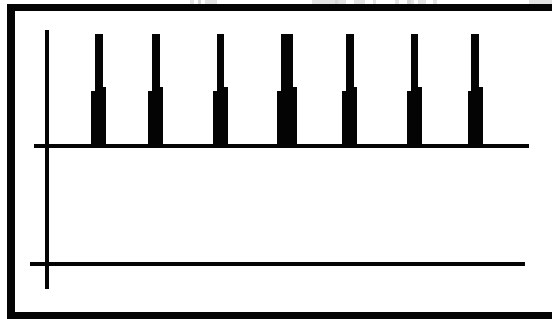


*Рис. 5.25. Симметричный временной график колебания
(временная реализация)*

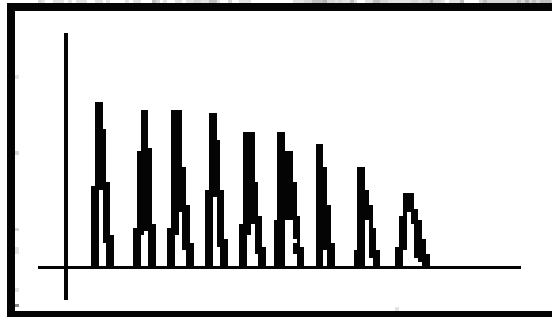


Рис. 5.26. Непрерывный спектр

5.1 Методы измерения вибрации



Время



Частота

Рис. 5.27. Результирующий спектр, состоящий из гармоник

5.1 Методы измерения вибрации

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.

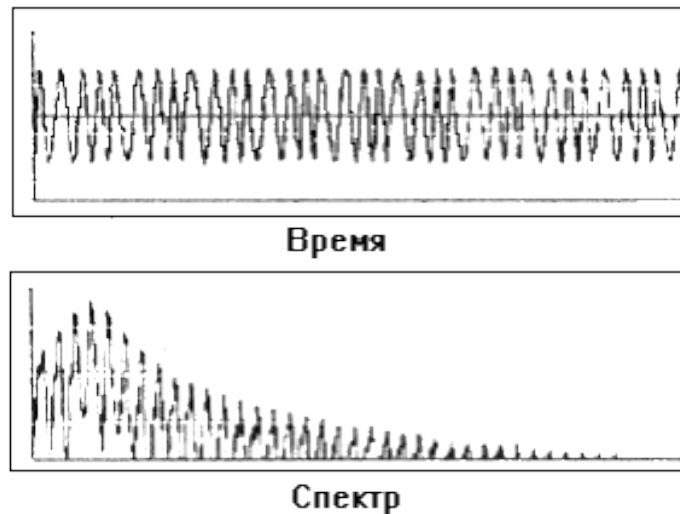


Рис. 5.28. Иллюстрация модуляции

5.2. Средства измерения вибрации

Для измерения вибрации и дополнительной оценки уровня шума применяются специализированные виброметры, виброскопы и универсальные шумовиброметры.

При измерении вибраций всегда участвуют три элемента: вибрирующее звено, исходное звено и устройство для измерения движения вибрирующего звена относительно невибрирующего. Средство измерения параметров вибраций носит название ***виброметр*** (рис. 5.37, а).

Масса 1 связывается с основанием прибора 4 с помощью пружины 2 и демпфера 3. Преобразователь 5 выдаёт сигнал смещения корпуса относительно массы 1, в зависимости от параметров массы 1, пружины 2 и демпфера 3. Сигнал может быть пропорциональным относительно перемещению массы 1 и основания прибора 4, относительной скорости или ускорению. Масса 1 виброметра носит название сейсмического элемента, а система, образующаяся из массы 1, пружины 2 и демпфера 3 – сейсмической системы.

5.2. Средства измерения вибрации

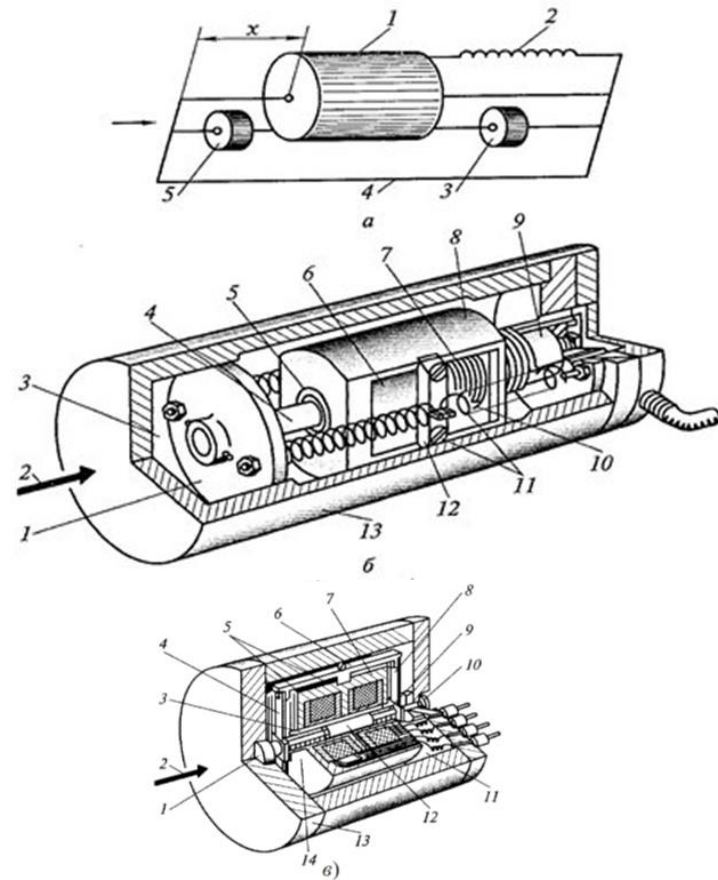


Рис. 5.37. Средства измерения вибраций:
а – конструкция вибromетра (1 – масса; 2 – пружина; 3 – демпфер;
4 – основание прибора; 5 – преобразователь); б – конструкция
электромагнитного линейного вибromетра (1 – направляющий диск; 2 – ось
чувствительности; 3 – жидкость; 4 – опорный стержень; 5 – втулка; –
постоянный магнит; 7 – обмотка; 8 – сейсмический элемент; 9 – каркас
катушки; 10 – паз; 11 – воздушный зазор; 12 – пружинный мост; 13 – корпус
прибора); в – конструкция вибromетра с индуктивным мостом (1 – опорный
стержень; 2 – входная ось; 3 и 9 – немагнитная втулка; 4 – пружина; 5 –
катушки; 6 – лента; 7 – сейсмический элемент; 8 – пластинчатая пружина; 10
– паз; 11 – жидкость; 12 – якорь; 13 – корпус; 14 – шток).

Рекомендуемая литература

1. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учебное пособие. В 5 ч. / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, Г.В. Мозгова. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – Ч. 2. – 108 с.
2. Зайцев, С.А. Контрольно-измерительные приборы и инструменты : учебное пособие / С.А. Зайцев, Д.Д. Грибанов, А.Н. Толстов, Р.В. Меркулов. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 464 с.
3. Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений : учебник для вузов / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – 3-е изд., стер. Издательский центр «Академия», 2006. – 336 с.
4. Харт, Х. Введение в измерительную технику / Х. Харт ; пер. с нем. – М.: Мир, 1999. – 391 с.
5. Ключев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Ключева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
6. Эткин, Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика / Л.Г. Эткин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 408 с.
7. Болтон, У. Карманный справочник инженера метролога / У. Болтон. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – 384 с.].