

Тема 1. Основы вибрационного контроля.



ИСМАРТ (СЕВМАШВТУЗ) 2015г.

Тема 1. Основы вибрационного контроля.

Введение. Основные характеристики вибрации. Характеристики сигнала: амплитуда, период, длительность, среднеквадратичное и пиковое значения. Виброперемещение, виброскорость, виброускорение. Единицы измерения. Низкочастотная, среднечастотная, высокочастотная вибрация, ее свойства. Собственные частоты колебательных систем. Акселерометры, устройство и принцип работы. Требования к точкам установки и способам крепления датчиков. Фильтрация сигналов. Виброметры и виброанализаторы. Частотный и динамический диапазоны виброизмерительной аппаратуры. Компьютерные базы данных. Программы вибрационного мониторинга.

Практические занятия. Выбор точек контроля, режимов работы оборудования, периодичности контроля. Зоны состояния оборудования по вибрации по ГОСТ 10816.

Работа с виброметром.

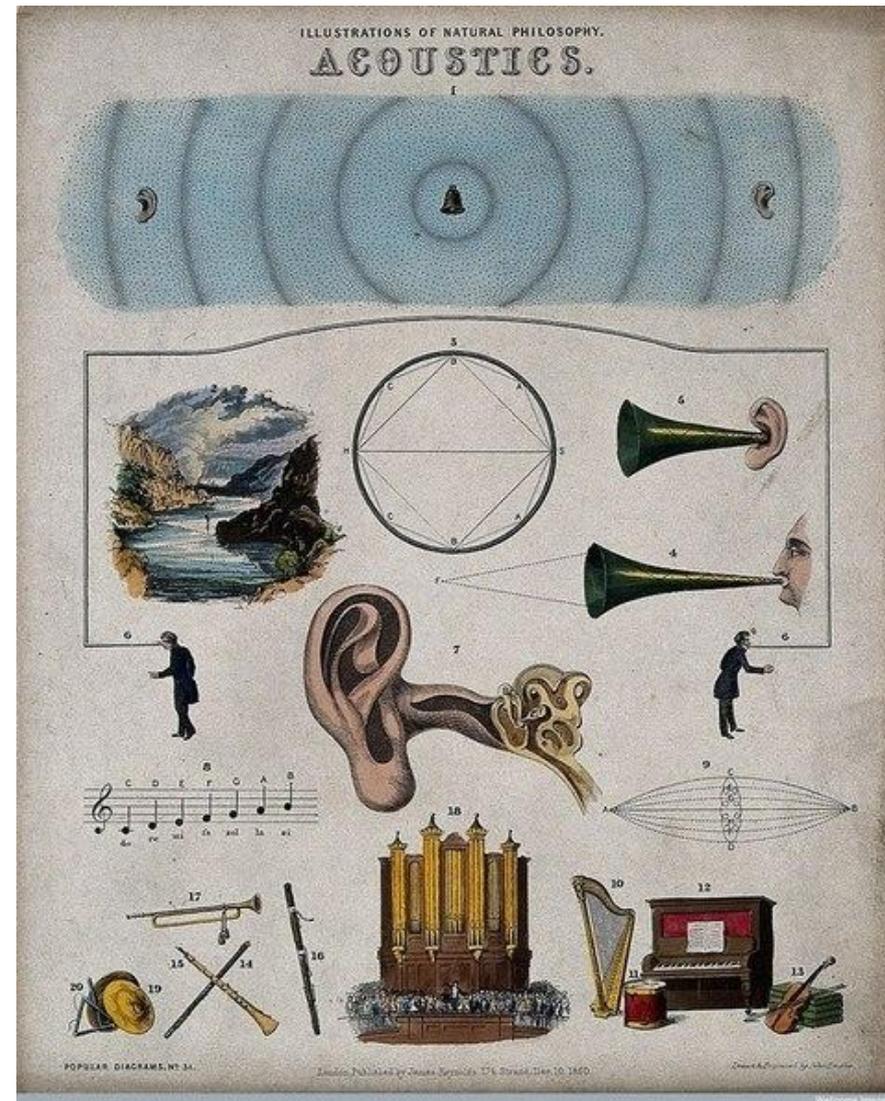
Основы вибрационного контроля. Введение. Колебания вокруг нас.

Практически все в нашей жизни совершает колебания - начиная от сердца и легких и кончая сменой дня и ночи. Мы слышим и говорим опять таки благодаря колебаниям, свет имеет колебательную природу.

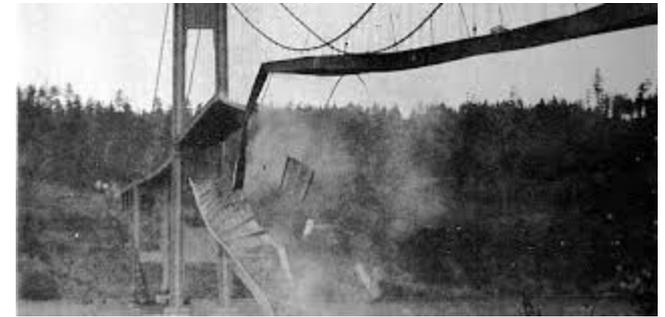
Даже атомы, из которых мы состоим тоже колеблются! Итак, что же такое колебания.

Колебания "vibration" это движения (изменения состояния), обладающие той или иной степенью повторяемости. Это могут быть механические колебания (колебания маятника, моста, корабля на волне, струны, колебания плотности и давления воздуха при распространении звука и т.п.) электромагнитные колебания (колебания напряженностей электрического и магнитного полей, и т.д.). Далее мы ограничимся лишь изучением механических колебаний.

Нет ничего проще качающегося маятника, в движении которого мы можем разобраться без особого труда. Автомобиль колеблется из-за неровностей дороги, а также потому, что работает его двигатель. В этом случае явления более сложны, но едва ли намного труднее для понимания. Скорее всего, эти примеры не производят большого впечатления. Рассмотрим теперь более впечатляющий пример



Такомский мост, США, штат Вашингтон



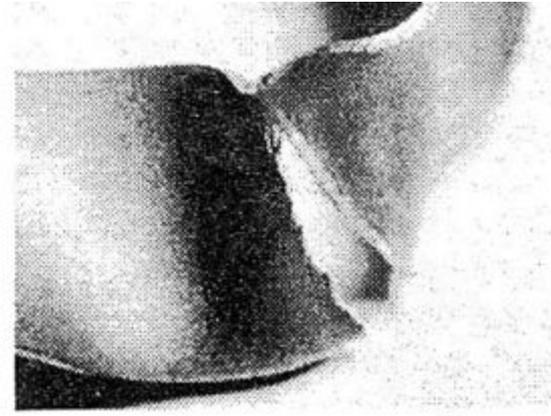
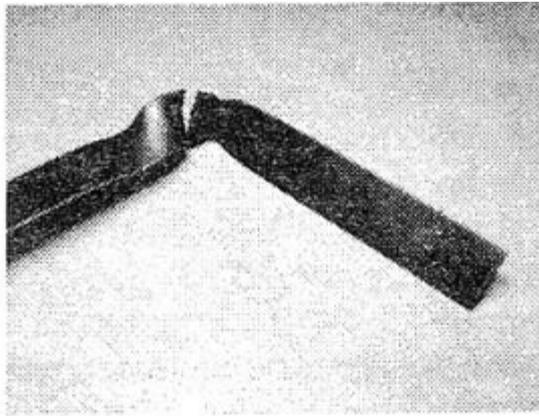
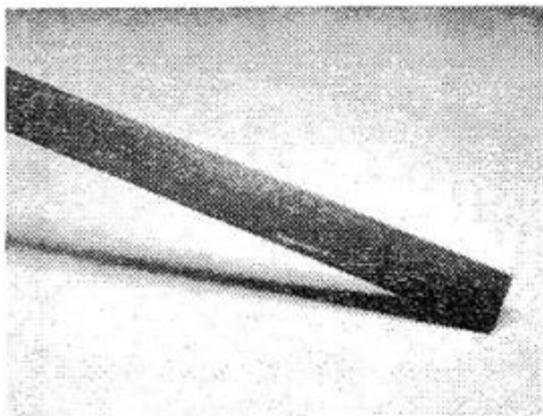
На фото запечатлён вид Такомого моста (США, штат Вашингтон). Подвесной мост через Такомский пролив с пролётом между опорами 854 м. При ветре 19 м/с (7 ноября 1940) установились крутильные колебания полотна моста с такой амплитудой, что угол наклона проезжей части к горизонту достигал 45° . После часа таких колебаний часть проезжего полотна отломилась и рухнула в воду. Мост был рассчитан на статическую ветровую нагрузку до скорости ветра 50 м/сек, но возможность возбуждения колебаний не была учтена. В данном случае колебания были вызваны ветром постоянной скорости и привели к тому, что эта конструкция разрушилась всего лишь через несколько месяцев после окончания ее строительства. Этих колебаний никто не предвидел и причина их возникновения оставалась некоторое время неясной. Ни один инженер-строитель не захотел бы повторить столь дорогую ошибку проектирования. Так что эта катастрофа явилась предметом весьма тщательного исследования. Не часто колебания выглядят так эффектно как колебания Такомого моста, однако можно привести еще ряд интересных примеров.



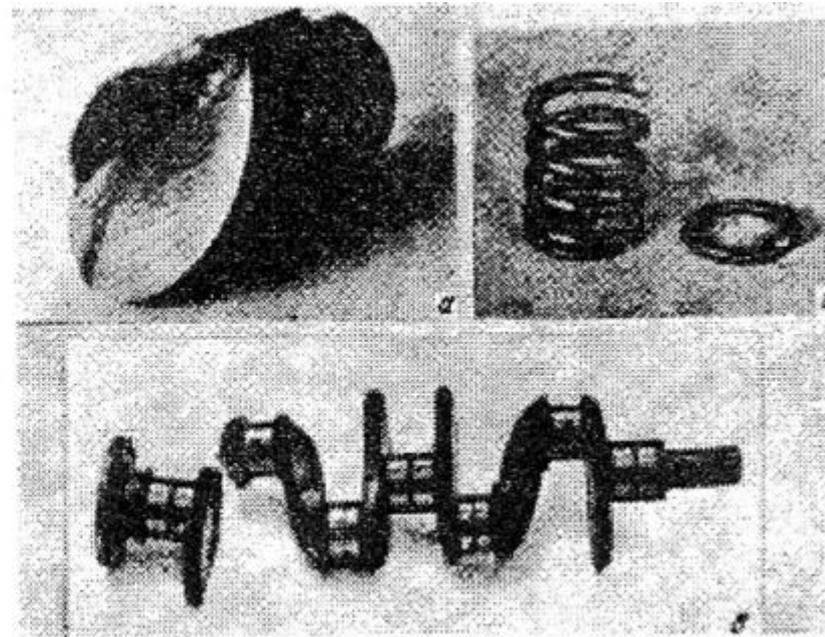
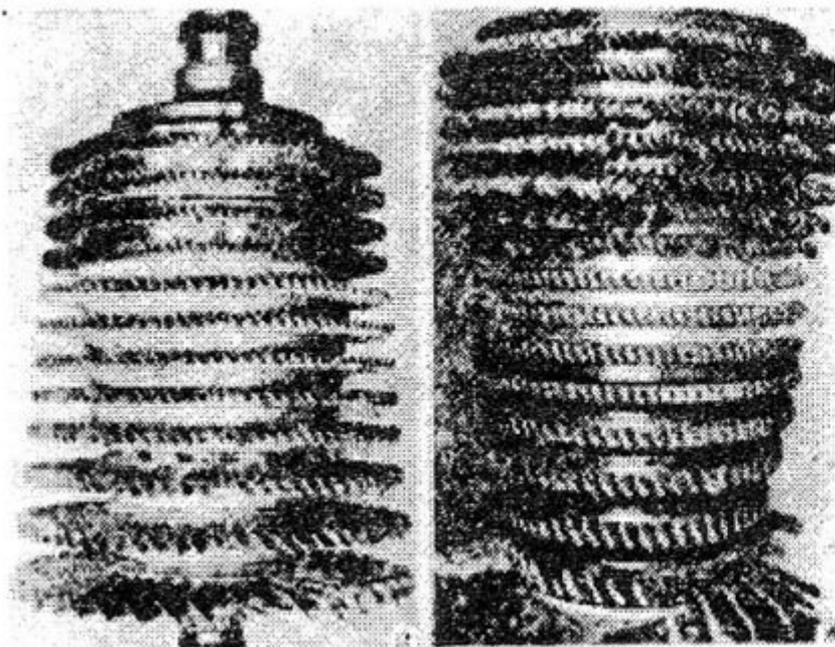


Один из таких случаев на следующем фото, где показана половина судна (а именно кормовая половина танкера “Пайн Ридж”) которое раскололось надвое в декабре 1960 г. Во время шторма в западной части Атлантического океана. Волны, которые действовали на это судно во время его эксплуатации, и особенно во время последнего рокового шторма, привели к возникновению дополнительных циклических напряжений в корпусе корабля. В конце концов судно не выдержало и разломилось на две части. Может показаться, что в данном случае проблема достаточно ясна и что в наши дни подобная гибель судна маловероятна, но на самом деле точный расчет напряжений в корпусе судна чрезвычайно затруднителен, не говоря уже о проблеме определения самих допустимых напряжений.

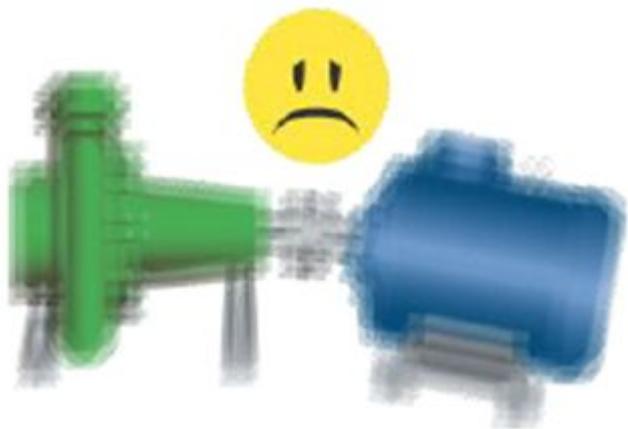
Эти примеры могут показаться далекими от повседневных проблем, решаемых инженерами-вибродиагностами но, тем не менее, “паразитная” вибрация существенно снижает срок службы (ресурс) роторного оборудования и может приводить к ощутимым финансовым (и не только!) потерям. Для понимания этого приведем еще один маленький пример. Все хорошо знают, что стальная лента является достаточно прочным материалом (стальная полоска имеющая сечение 1х20 мм выдерживает статическую нагрузку при растяжении в 400 килограмм). После нескольких перегибов в противоположные стороны она разламывается. При этом следует отметить, что изгибающие усилия, прикладываемые к полоске, гораздо меньше, чем статическая нагрузка. Полоса легко выдерживает несколько циклов изгиба, а потом ее способность к сопротивлению исчерпывается. Причем разрушение происходит внезапно.



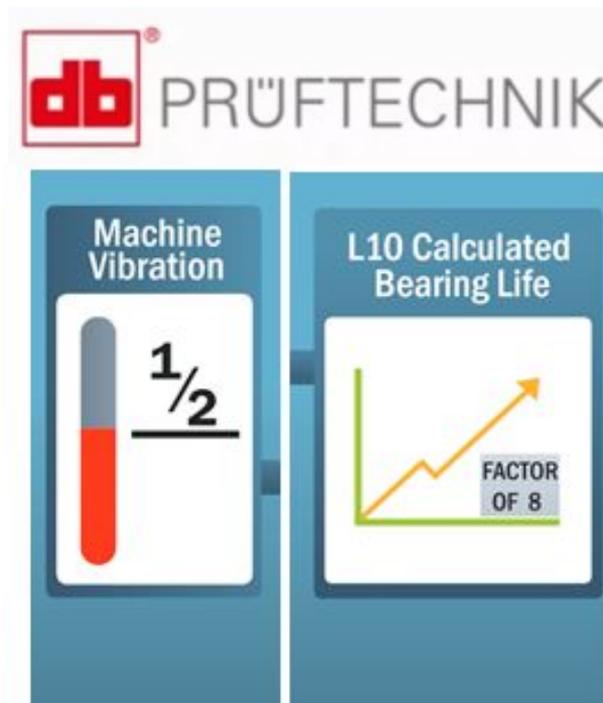
Все приведенные выше примеры иллюстрируют разрушение конструкции вследствие малоциклового усталости. Подобные явления могут возникать и во вращающемся оборудовании при чрезмерной вибрации. Известно, что уровни вибрации опор большинства роторов на нерезонансных режимах работы (в мкм) одного порядка со смещением их центра масс. Исходя из этого предположения, можно оценить уровни динамических сил, которые прибавляются к статическим нагрузкам, действующим на ротор. (Для ротора массой 1000 кг вращающегося с частотой 50 Гц дополнительные динамические силы будут иметь уровень порядка $1000[\text{кг}] \cdot 30[\text{мкм}] \cdot 4\pi^2 \cdot 50^2 [\text{Гц}] \sim 300(\text{кгс})$, т.е. порядка 30% от расчетной нагрузки). Эти силы в свою очередь, существенно снизят ресурс агрегата в целом. Выводы очевидны....



Последствия повышенной вибрации для оборудования: ускоренный износ подшипников, муфт, уплотнителей, повышенный расход электроэнергии

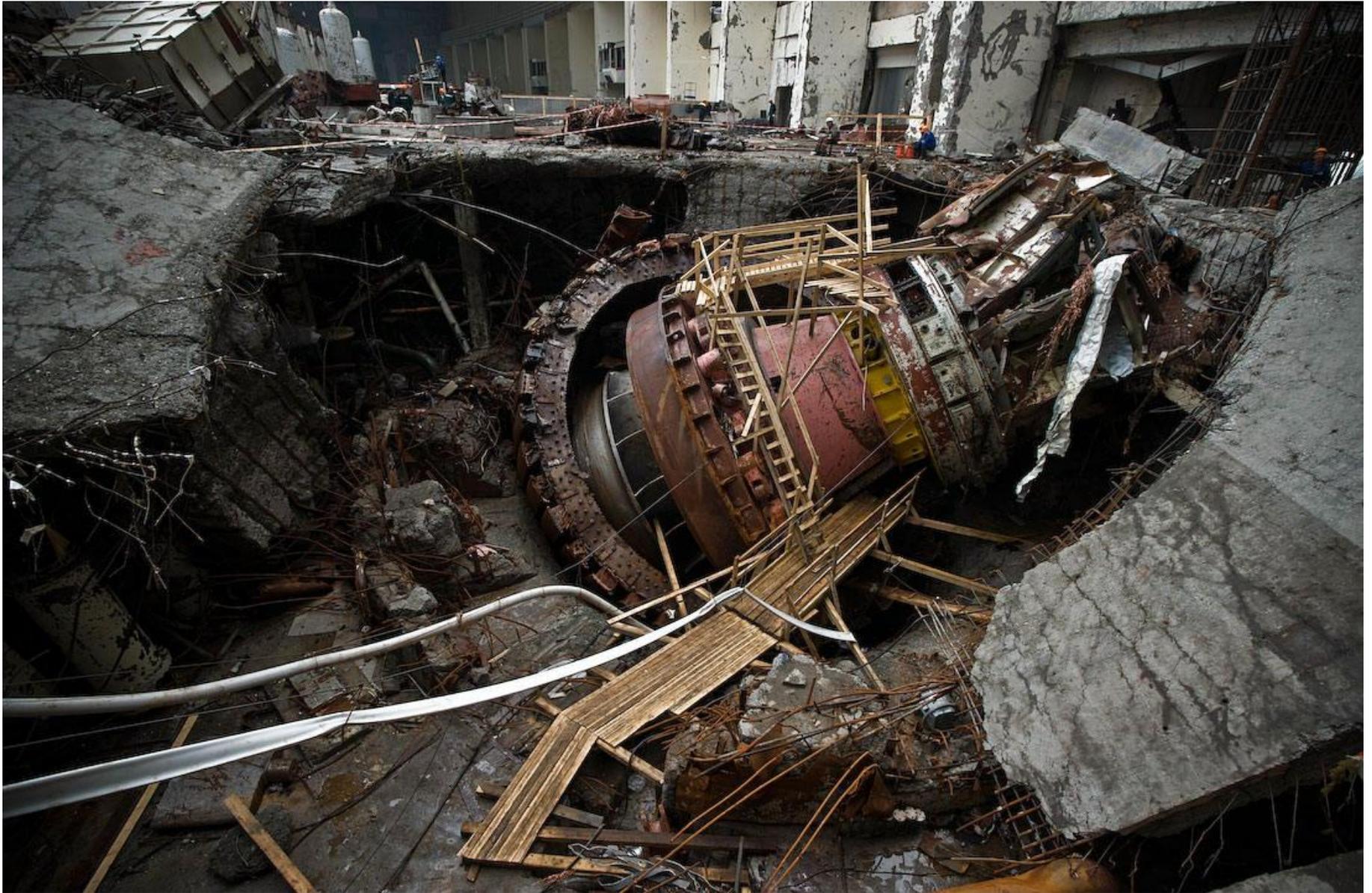


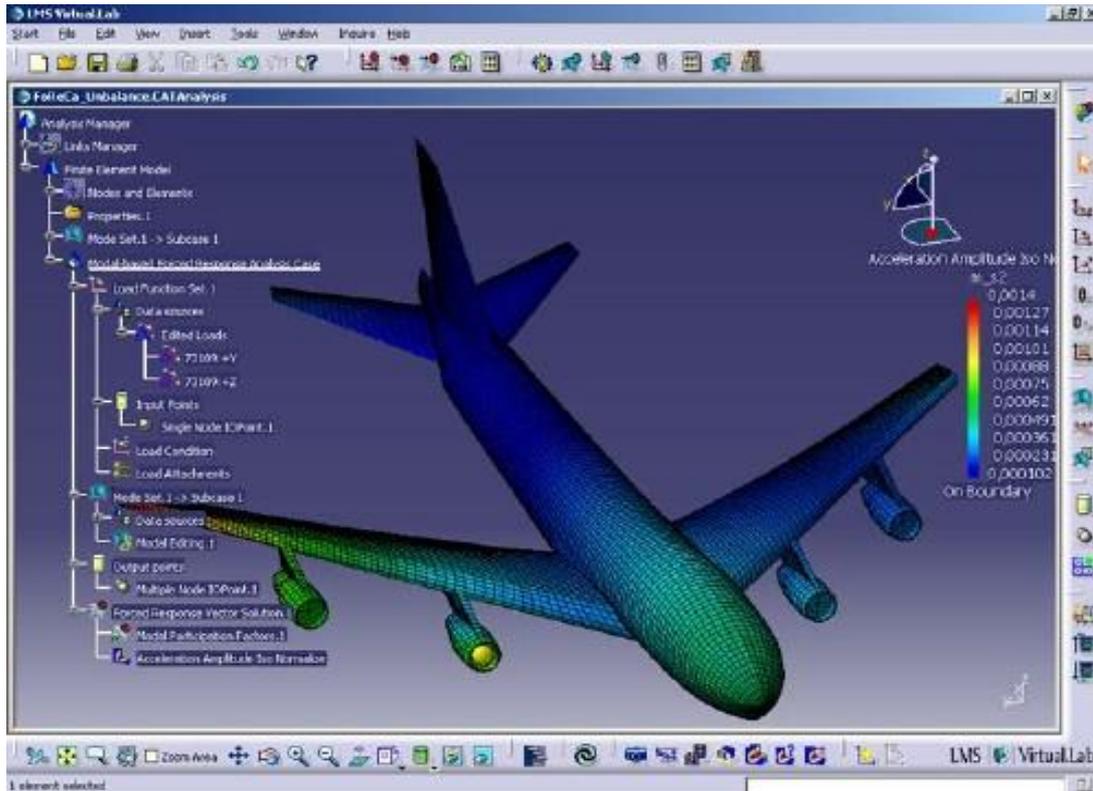
Уменьшение вибрации в 2 раза, увеличивает срок эксплуатации подшипников в 8 раз (в среднем).



На АЦБК в следствие регулярного контроля вибрации часть ПУ проработала без ремонта более 20 лет

Саяно-Шушенская ГЭС: после катастрофы







Вибростенды и другие возбудители механических колебаний находят широкое применение при исследованиях и испытаниях изделий, узлов и деталей, подвергаемых воздействию точно определенных механических колебаний с целью измерения и анализа их физической и эксплуатационной характеристики и оценки их стойкости в отношении влияния механических колебаний и ударов.

Механические колебания и организм человека

Уже в течение относительно длительного времени известно серьезное влияние механических колебаний на организм человека. Механические колебания могут быть причиной неясного видения, потери концентрации, раздражения, понижения трудоспособности и др. В некоторых случаях могут колебания определенных частоты и уровня даже вызывать постоянные повреждения внутренних органов человека.

Научные и исследователи уже более 30 лет занимаются психологическими эффектами механических колебаний, в частности колебаний, генерируемых ручными инструментами с механическим, пневматическим и электрическим приводом. Среди работников лесной промышленности, применяющих цепные пилы, хорошо известен синдром «белых пальцев». Постепенное перерождение нервной и сосудистой ткани приводит к потерям осязания и манипуляционной способности рук этих работников.



ПРОМСАНИТАРИЯ

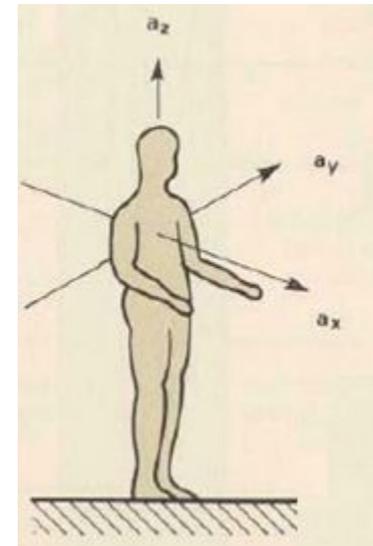
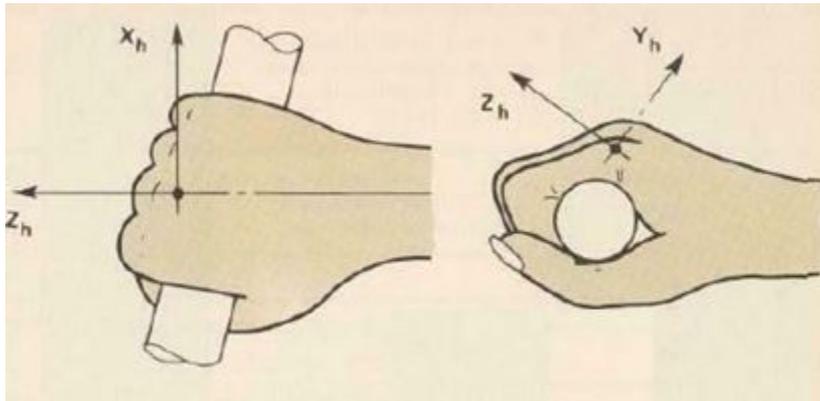
- В настоящее время действуют критерии и рекомендации, определяющие допустимые пределы и максимальные спектры механических колебаний ручек и рукояток ручных инструментов с механическим, пневматическим и электрическим приводом

Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.2.540-96 “Гигиенические требования к ручным инструментам и организации работ”

ГОСТ 12.1.020-79 Шум. Метод контроля на морских и речных судах

ГОСТ 12.1.047-852 Вибрация. Метод контроля на рабочих местах и в жилых помещениях морских и речных судов

ГОСТ 31319-2006 Вибрация ИЗМЕРЕНИЕ ОБЩЕЙ ВИБРАЦИИ И ОЦЕНКА ЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА Требования к проведению измерений на рабочих местах



ВИБРАЦИЯ

оказывает **вредное** влияние на:

- состояние машины
(увеличение вибрации в 2 раза выше допустимого снижает ресурс в 4 раза)
- работу и здоровье оператора
(санитарное нормирование)
- состояние окружающей среды
- качество продукции

Вибрация - эффективный диагностический сигнал

колебательные силы возникают непосредственно в месте появления дефекта, а машина “прозрачна” для вибрации

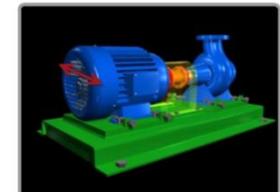
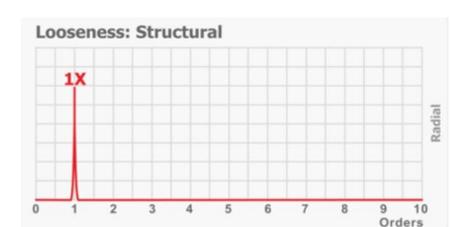
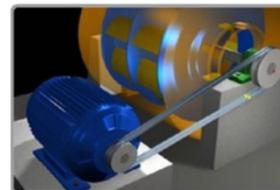
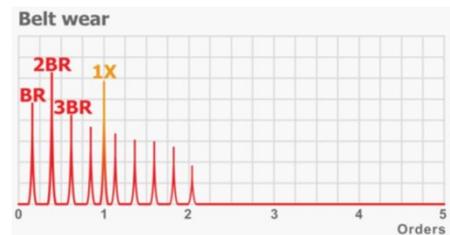
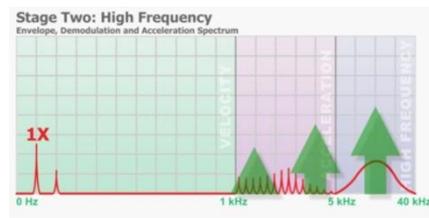
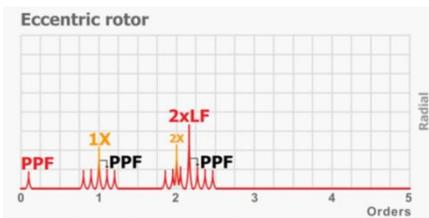
вибрация содержит максимальный объём диагностической информации

диагностировать можно на месте, без разборки и остановки оборудования

К важнейшим показателям судового электрооборудования относятся параметры вибрации, характеризующие качество его проектирования, изготовления и эксплуатации.

Анализ отказов электрооборудования в судовом исполнении показывает, что чаще всего встречаются дефекты электрических машин, являющиеся результатом износа механических узлов. В ряде случаев причинами отказов могут быть дефекты электрических и магнитных цепей электрических машин и аппаратов, систем охлаждения.

Практически все виды дефектов, определяющих ресурс электрооборудования, изменяют параметры сигнала вибрации. Вибродиагностические параметры могут быть основными при обнаружении дефектов механических узлов, магнитных цепей, потокосоздающих узлов.



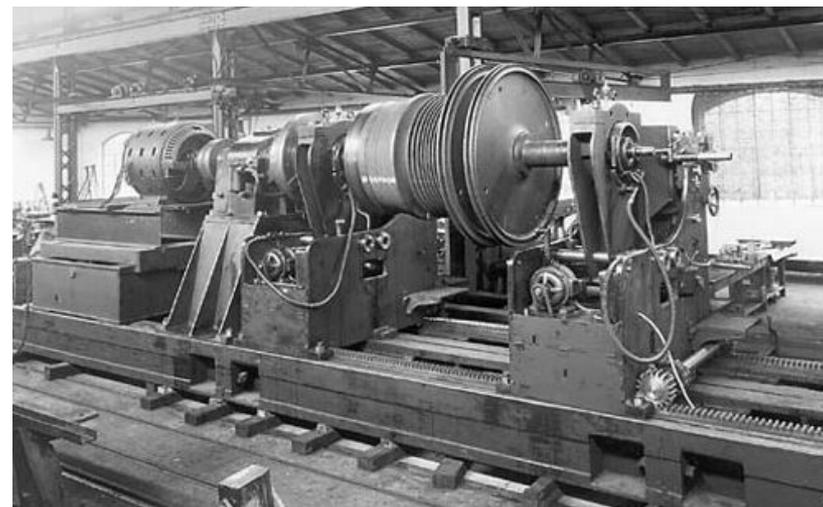
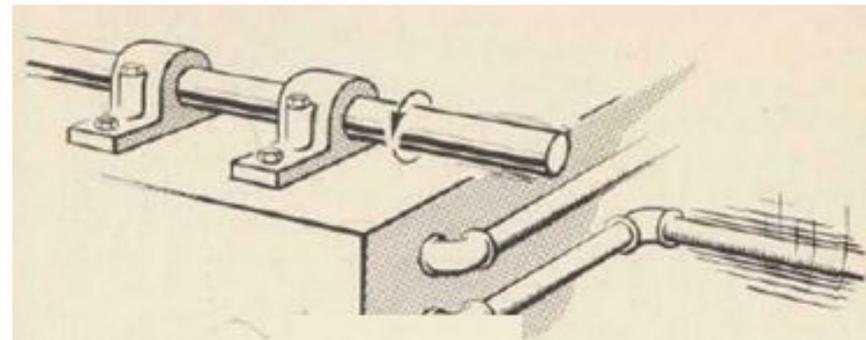
ИСТОЧНИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Избежать механических колебаний на практике почти нельзя, так как они обусловлены динамическими явлениями, сопровождающими присутствие допусков, зазоров и поверхностных контактов отдельных деталей машин и механизмов и сил, возникающих при вращении и возвратно-поступательном движении неуравновешенных элементов и деталей. Даже механические колебания с малой амплитудой часто вызывают резонансные колебания других элементов конструкций, усиливаются и становятся источником вибрации и шума.

Инженеры и техники занимаются вопросами, связанными с уменьшением механических колебаний и виброизоляции уже со времени разработки и производства первых машин и станков, в частности машин с механическим приводом.

Необходимость точного измерения и анализа механических колебаний возникла с первых шагов разработки и конструирования машин, учитывающих вопросы амортизации механических колебаний и виброизоляции. Исследование механических колебаний прочных машин медленного действия в прошлом основывались на опыте инженеров-конструкторов и применении несложных оптических приборов, измеряющих смещение механических колебаний.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ



 **100**
Years
Balancing
with Schenck



В последние 50-60 лет произошло быстрое развитие техники измерения и анализа механических колебаний (виброметрии) с тем, чтобы удовлетворить всем требованиям исследования и испытания новых, легких и быстродействующих машин и оборудования. Применение пьезоэлектрических акселерометров преобразующих механические колебания в электрические сигналы, раскрыло новые возможности точного измерения и анализа механических колебаний электронными измерительными приборами.

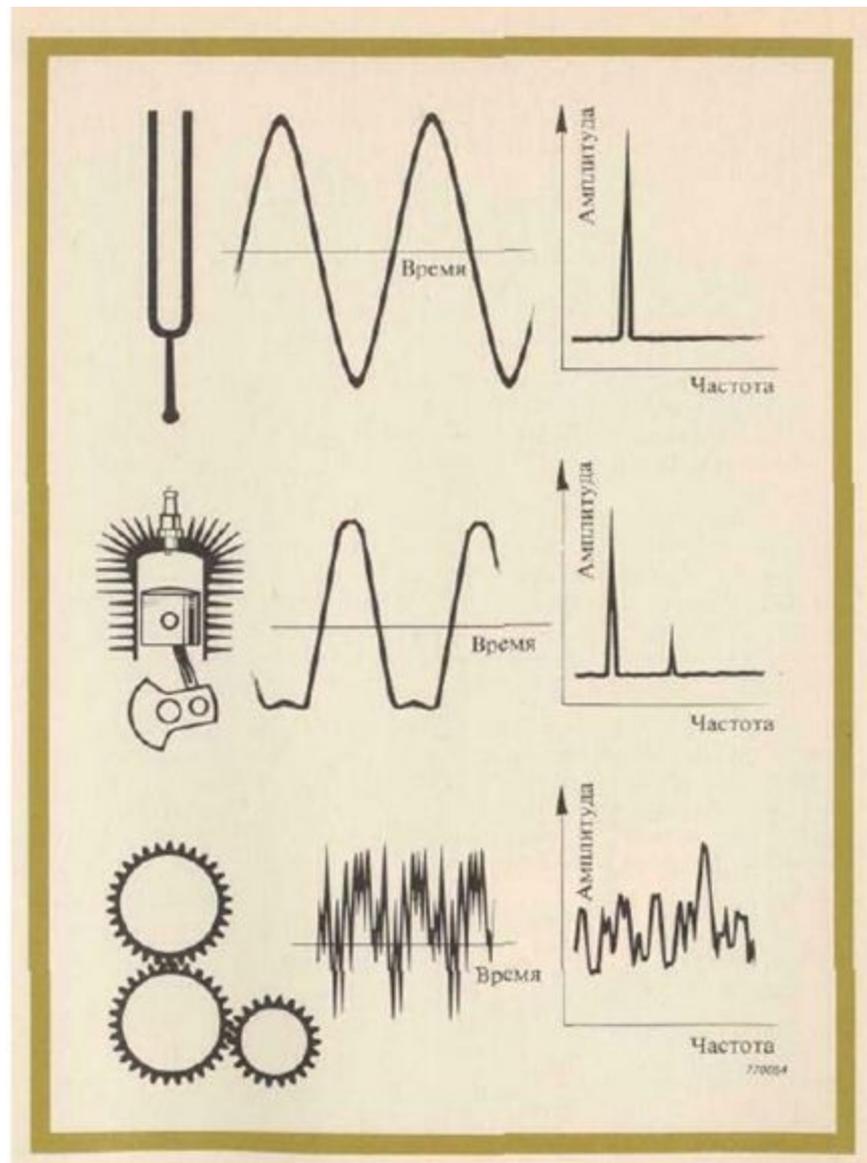
ПРИРОДА МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Тело считают вибрирующим, если оно совершает колебательное движение относительно опорного положения равновесия. Число полных циклов движения тела за единицу времени, т.е. за с. называется частотой и выражается в единицах Гц (герц)

Движение может быть простым и содержать лишь составляющую с одной частотой, например, движение камертона, или более сложным с несколькими составляющими, развивающимися одновременно на нескольких частотах. Примером здесь может служить движение поршня двигателя внутреннего сгорания.

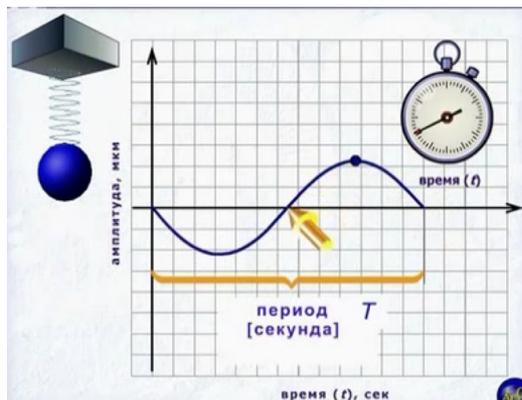
Встречающиеся на практике вибрации обычно являются сложными механическими колебаниями с многими составляющими на разных частотах. Следовательно, на основе лишь амплитудно-временной диаграммы нельзя определить ни число, ни частоты отдельных составляющих сложного колебательного процесса.

Отдельные составляющие сложных механических колебаний можно обнаружить и определить путем исследования зависимости их амплитуд от частоты. Разложение механических колебаний в индивидуальные частотные составляющие называется частотным анализом. Частотный анализ является основным методом диагностики, основанием которой является исследование механических колебаний. График зависимости амплитуды или уровня определенной величины механических колебаний от частоты называется частотной спектрограммой. Частотный анализ механических колебаний машин и механизмов нормально обнаруживает ряд выраженных частотных составляющих периодического характера, непосредственно связанных с основными движениями отдельных узлов и деталей исследуемой машины или механизма. Следовательно, частотный анализ дает возможность обнаружения отдельных источников механических колебаний.



- Вибрация - это движение точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин (ГОСТ 24346-80)
- Вибрация - механические колебания тела относительно опорного положения равновесия (ISO)
- Вибрационный неразрушающий контроль - это неразрушающий контроль, основанный на измерении упругих колебаний, возбуждаемых или возникающих в объекте контроля.
- Вибрационно-диагностический метод - это метод акустического неразрушающего контроля, основанный на анализе параметров вибрации, возникающей при работе объекта контроля.
- Вибрационная диагностика - это техническая диагностика, основанная на анализе вибрации объекта диагностирования.

ВИБРАЦИЯ



x - виброперемещение

$\dot{x} = dx / dt$ - виброскорость

$\ddot{x} = d^2x / dt^2$ - виброускорение

$$x(t) = x_0 \sin(\omega t + \varphi_0) = d \sin(\omega t + \varphi_0)$$

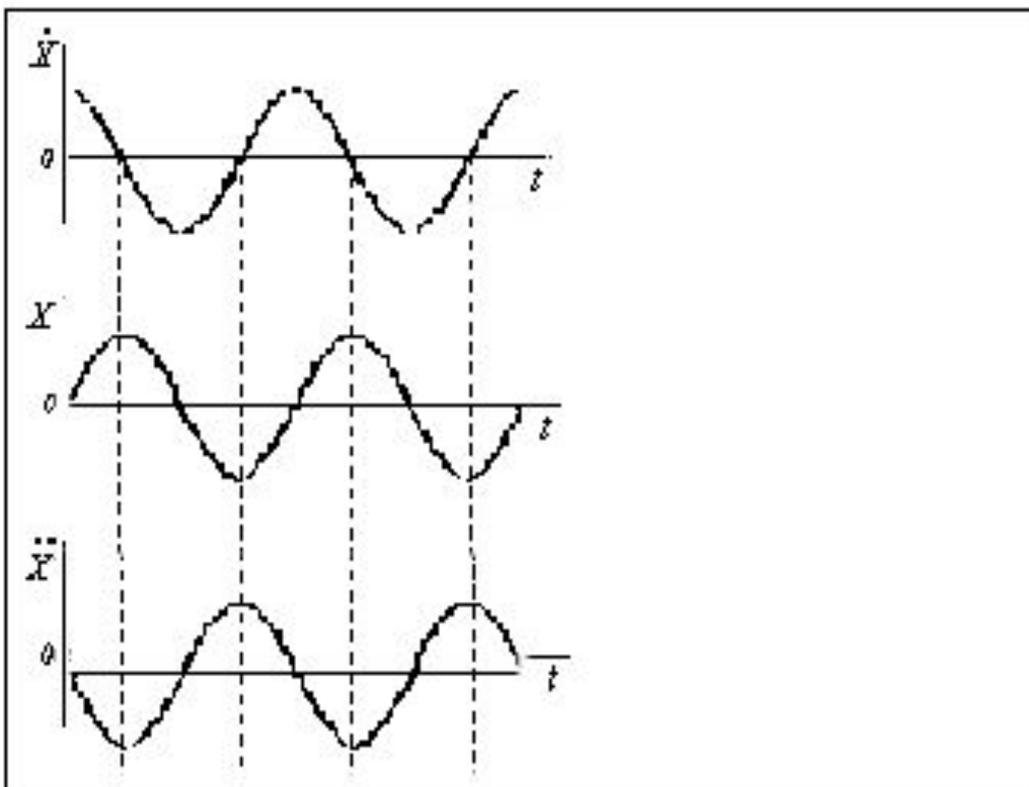
$$\dot{x}(t) = x_0 \omega \cos(\omega t + \varphi_0) = x_0 \omega \sin(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}) =$$

$$= v \sin(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2})$$

$$\ddot{x}(t) = -x_0 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) = x_0 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi) =$$

$$= a \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi)$$

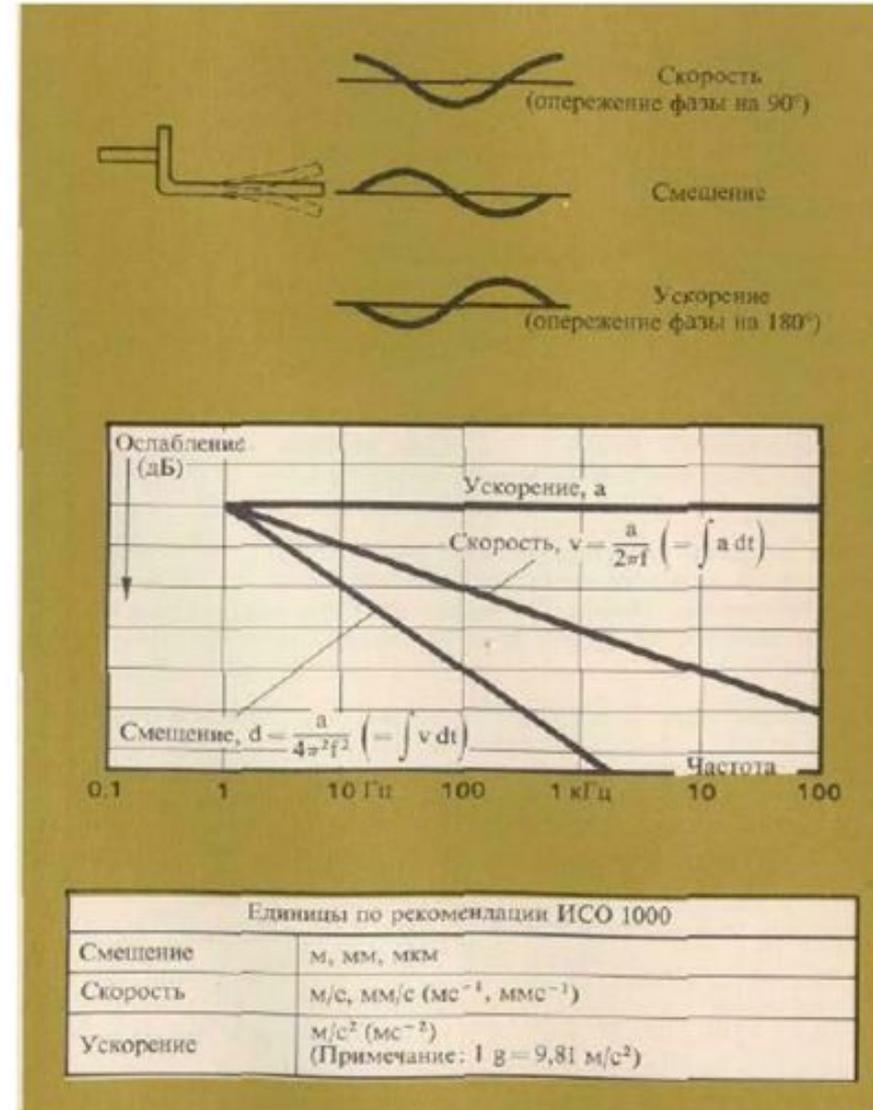
где $d = x_0$, $v = x_0 \omega$, $a = x_0 \omega^2$



ПАРАМЕТРЫ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ: УСКОРЕНИЕ. СКОРОСТЬ И СМЕЩЕНИЕ И СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ЕДИНИЦЫ

При рассмотрении камертона можно амплитуду волны колебаний полагать равной физическому смещению концов его плеч относительно положения покоя. Однако, в основу описания движения камертона можно положить не только смещение, а также скорость или ускорение колебаний. Форма волны и период рассматриваемых колебаний идентичны для смещения, скорости и ускорения. Главное различие этих трех параметров заключается во взаимном фазовом сдвиге их кривых, отображающих зависимость амплитуды от времени (см.рис.)

Амплитуды смещения, скорости и ускорения колебаний с синусоидальной формой волны взаимно связаны математическими функциями частоты и времени показанными на рисунке справа. Пренебрегая фазовыми соотношениями, т.е. опираясь на результаты измерения и анализа с усреднением во времени, скорость механических колебаний можно определить путем деления их ускорения на пропорциональный частоте фактор, а смещение можно аналогично получить делением ускорения на фактор, пропорциональный возведенной в квадрат частоте. Описанные выше операции автоматически осуществляются электронными интеграторами, встроенными в современных виброизмерительных приборах.



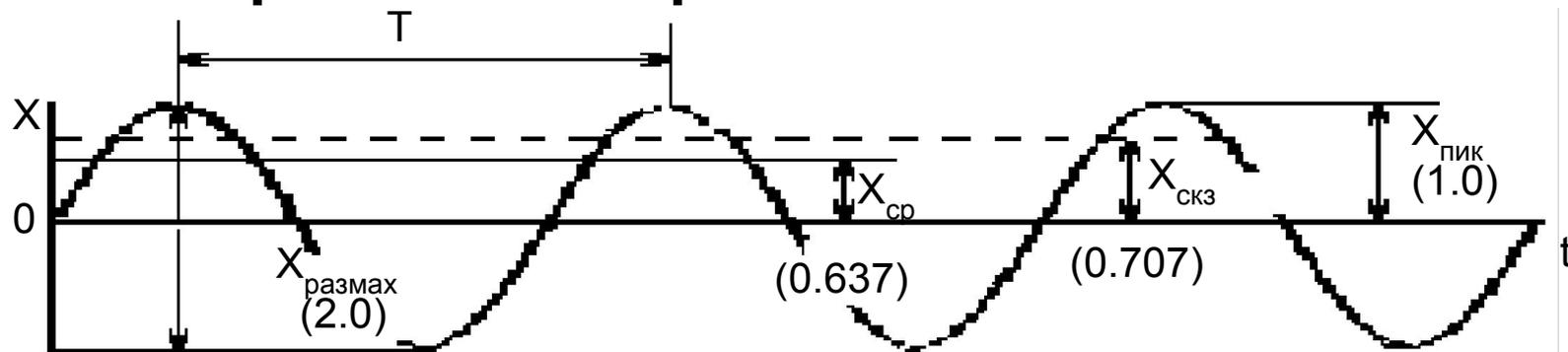
Единицы измерения вибрации

(линейные)

ИЗМЕРЕНИЕ	ЕДИНИЦЫ		ПРИМЕЧАНИЕ
	ЕВРОПА	США	
ПЕРЕМЕЩЕНИЕ D	<u>мкм – РАЗМАХ</u> (СКЗ)	мил – пик-пик, mils – peak to peak	Перемещение машины, конструкции или ротора связано с напряжением
СКОРОСТЬ V	<u>мм/с – СКЗ</u> (пик)	дюйм/с – пик или СКЗ in./sec – peak or RMS	Скорость движения во времени связана с усталостью узлов машины
УСКОРЕНИЕ A	<u>м/с² – ПИК</u> (СКЗ) м/с ² (g) – СКЗ	g – пик или СКЗ	Ускорение связано с силами , действующими в узлах машины

T	=	период (секунды) или
(1/CPS or		60/CPM)
f	=	1/T, частота (Гц) или
(CPS or CPM)		
n	-	скорость вращения
(об/мин) или		(RPM)

Простейшее гармоническое колебание



$$X(t) = X_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = X_0 e^{-j(\omega_0 t + \varphi_0)}$$

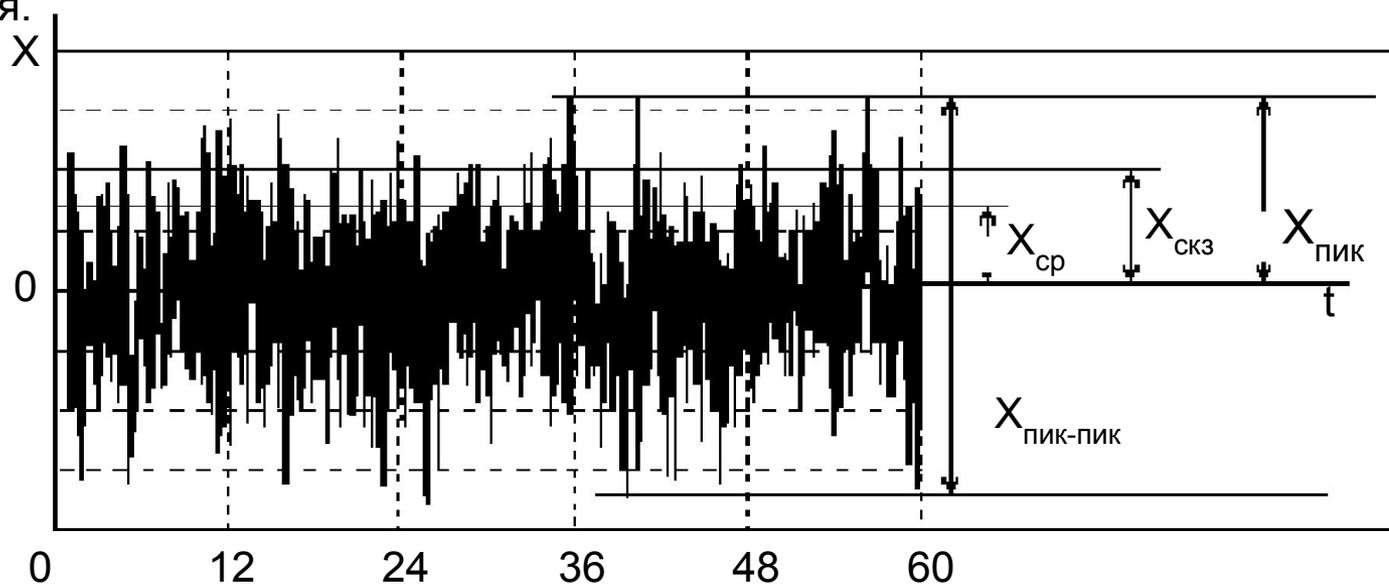
X_0 – амплитуда;

φ_0 – начальная фаза;

ω_0 – частота;

t – время.

Случайный сигнал



Временной сигнал вибрации и временной сигнал тока и напряжения



Параметры вибрационного сигнала

$X_{\text{пик}}$ - пиковое значение, которое характеризует максимальное значение колебаний, но не отображает его развитие во времени;

$$X_{\text{скз}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt}$$

- среднеквадратическое (эффективное) значение, представляющее собой квадратный корень из усредненных во времени возведенных в квадрат мгновенных значений. Это значение имеет особую важность, так как связано с энергией, а следовательно, с разрушающей способностью колебаний (Т - период колебания). Для синусоидальных колебаний $X_{\text{скз}} = X_{\text{пик}} / \sqrt{2}$;

$$X_{\text{сред}} = \frac{1}{T} \int_0^T |X| dt$$

- среднее абсолютное значение, связанное с временным развитием механических колебаний;

$X_{\text{размах}}$ - размах колебаний (двойная амплитуда). Для гармонических колебаний $X_{\text{размах}} = 2X_{\text{пик}} = 2X_{\text{скз}} \sqrt{2}$;

$K = X_{\text{пик}} / X_{\text{скз}}$ - пикфактор (амплитудный коэффициент), числовое значение которого тем больше, тем больше выражен импульсный или случайный характер колебаний. Для синусоидальных колебаний $K = \sqrt{2}$.

4_a

Пример решения задачи:

Задание: Определить среднеквадратическое значение виброперемещения ($d_{скз}$), если:

$n=600$ об/мин

$V_{пик}=7$ м/с

РЕШЕНИЕ:

Используемые формулы: $d = x_{скз}$, $v = x_{пик} \omega$, $d_{скз} = d_{пик} / \sqrt{2}$, $\omega = 2\pi f$

$$d_{скз} = \frac{V_{пик}}{2\pi(n/60)\sqrt{2}} = \frac{7}{2 \cdot 3,14(600/60) \cdot 1,41} = 0,079 \text{ мкм}$$

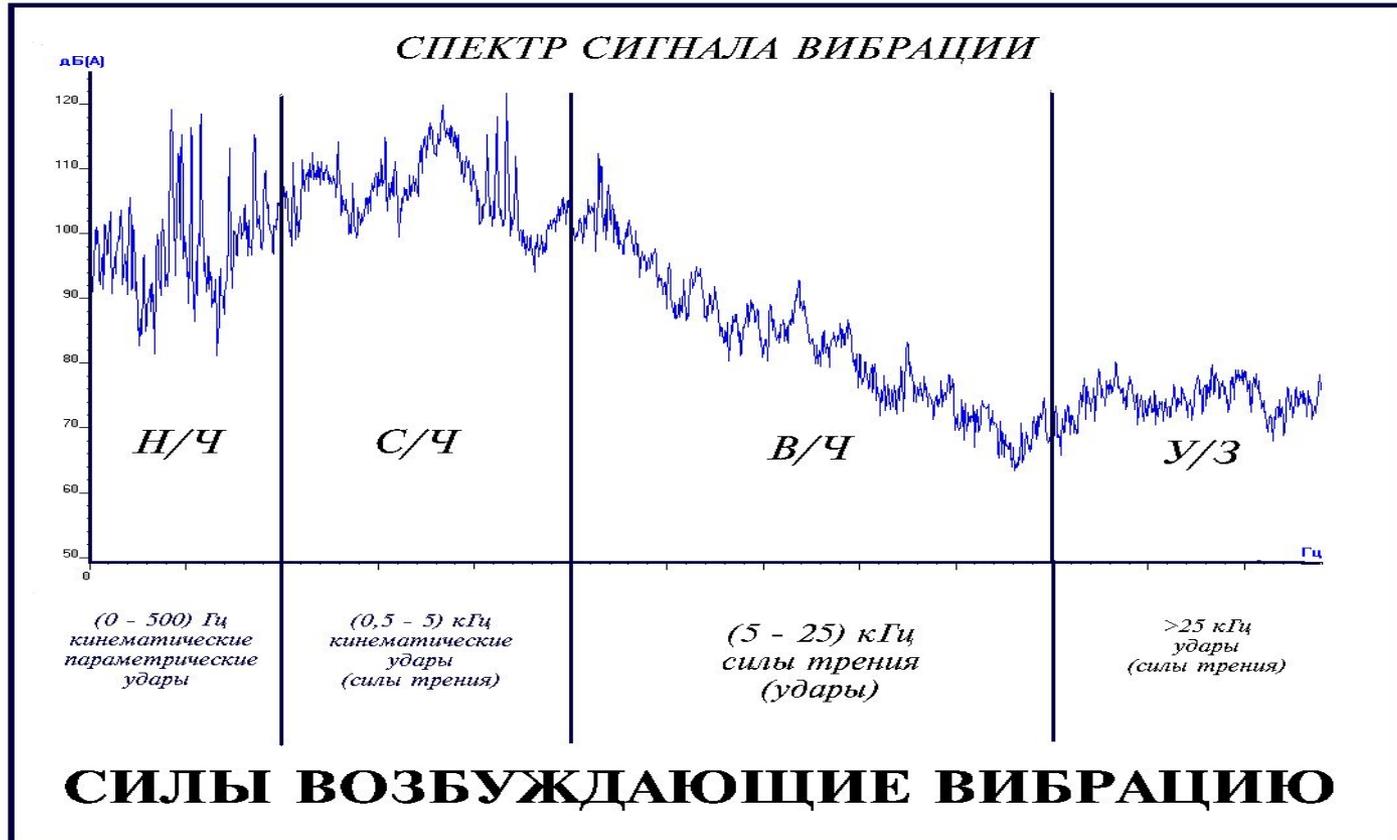
РЕЗОНАНС - явление возрастания амплитуды вынужденных колебаний в какой-либо колебательной системе, наступающее при приближении частоты периодического внешнего воздействия к одной из частот собственных колебаний системы.

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.

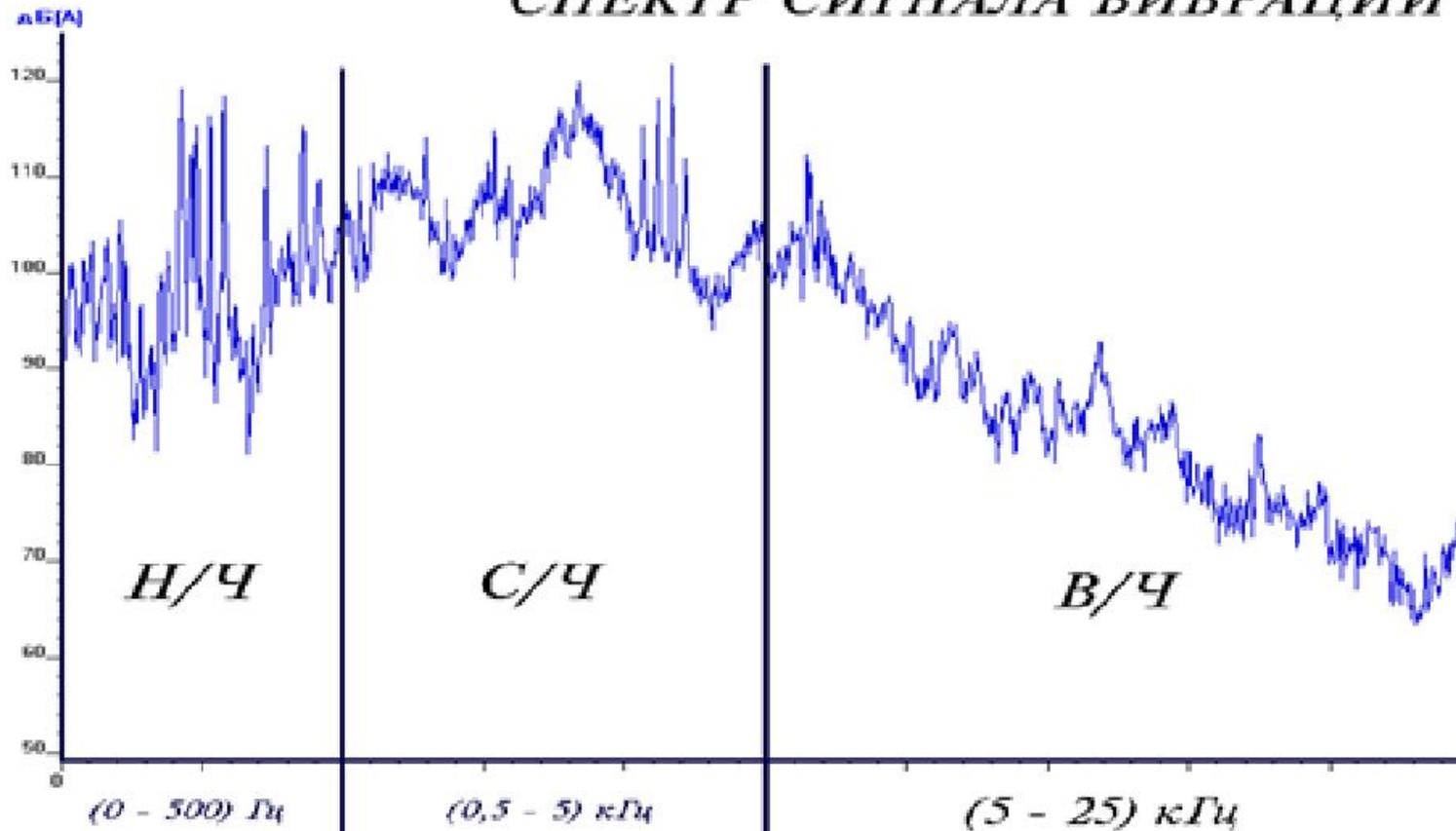
НЧ, СЧ, ВЧ вибрация

Вибрационный диапазон условно разделяют на три части:

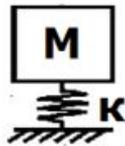
- низкочастотная вибрация (0-100..300 Гц);
- среднечастотная вибрация (100...300- 1000...3000 Гц);
- высокочастотная вибрация (1000...3000- ... Гц).



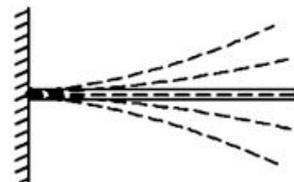
СПЕКТР СИГНАЛА ВИБРАЦИИ



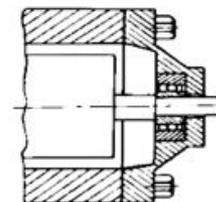
Механизм описывается как колебательная система с сосредоточенными параметрами. Всё тело движется как одно целое



Механизм описывается как КС с распределёнными параметрами. Колебания происходят за счёт внутренних деформаций тела



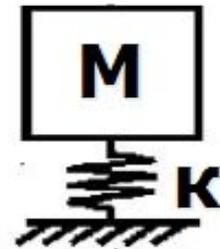
Для ВЧ характерен волновой характер распространения вибрации по границам сред. Механизм описывается как среда с границами.



Колебательные системы

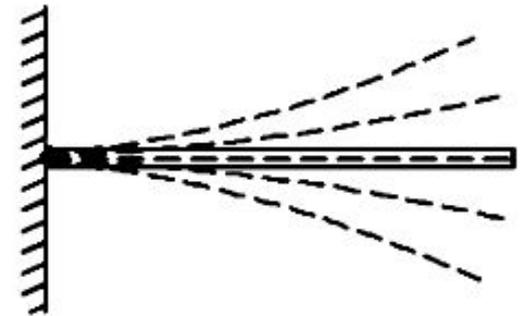
Сосредоточенные параметры

все тело движется как одно целое, без деформаций. Колебания как правило на низких частотах – до 300 Гц для обычных машин



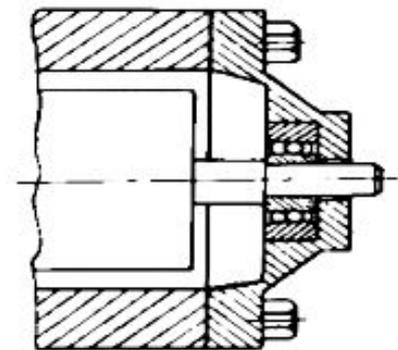
Распределенные параметры

колебания происходят за счет внутренних деформаций тела. Колебания как правило на средних частотах – до 2000 Гц для обычных машин



Среда с границами

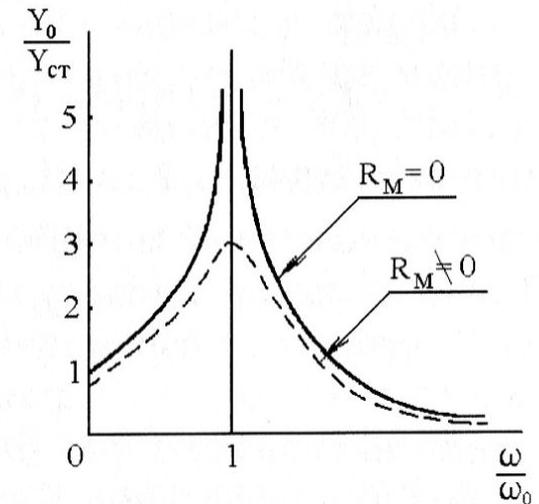
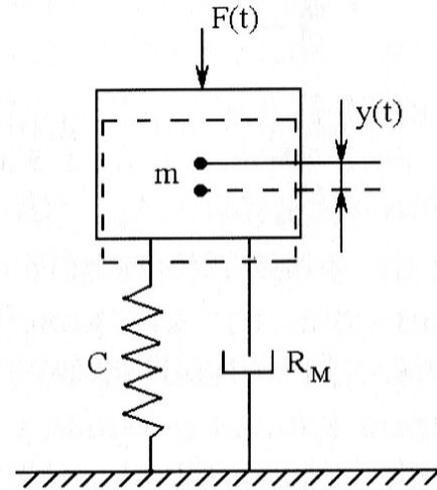
характерен волновой характер распространения вибрации по границам сред, вибрация анизотропна. Колебания как правило на высоких частотах – вплоть до ультразвука



НИЗКОЧАСТОТНАЯ ВИБРАЦИЯ

- Основной особенностью нч вибрации является то, что под действием вынуждающей силы машина или её элементы колеблются как единое целое. При математическом описании таких колебаний объект может быть представлен системой с сосредоточенными параметрами.
- На рис схематично показан механизм, упруго закреплённый на фундаменте с помощью виброизоляторов.

- M - масса механизма
- C - суммарная жёсткость виброизоляторов
- R_M - механическое сопротивление, определяющее,
- активные потери колебательной энергии
- $y(t)$ - смещение инерционного элемента от положения равновесия
- $F(t) = F_0 \cdot \cos \omega t$ – вынуждающая сила
- Колебания механизма будут также гармонического вида
- $y(t) = Y_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi)$
- $\omega_0 = \sqrt{C/m}$ - собственная частота колебаний механизма на виброизоляторах



В случае совпадения частоты вынужденных колебаний с частотой свободных (собственных) колебаний амплитуда их начинает возрастать, так как энергия колебаний увеличивается. Такое резкое возрастание амплитуды колебаний называют резонансом. Оно весьма опасно для детали или конструкции, так как вместе с возрастанием амплитуды возрастает деформация.

- НЧ вибрация медленно затухает при удалении от источника (аналогия постоянный ток)

СРЕДНЕЧАСТОТНАЯ ВИБРАЦИЯ

- Характерная особенность СЧ вибрации механизмов и конструкций- невозможность представить объект в виде системы с сосредоточенными параметрами, т.е. выделить в ней элементы, имеющие только инерционные и только упругие свойства. Это определяется тем, что каждый элемент на средних частотах обладает и теми и другими свойствами. Вынужденные колебания в этом случае нельзя представить в виде распространяющейся волны, однако в пространстве они уже приобретают собственные формы, отражающие свойства колебательной системы. Собственные формы колебаний хорошо иллюстрируются на примере вынужденных колебаний струны, натянутой между двумя неподвижными точками.

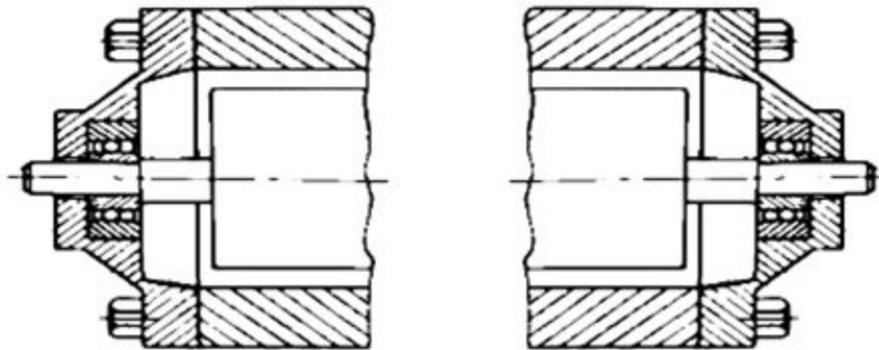


Рис. 12.2. Формы колебаний статора под действием радиальных электромагнитных сил (r – пространственный порядок колебаний)

- Большое число собственных форм колебаний не только целой машины или оборудования, но и отдельных их узлов, затрудняет определение амплитуд вынуждающих сил по результатам измерения амплитуды колебаний на определённой частоте. Особенно, если собственные частоты отдельных узлов находятся в области средних частот, а именно, в диапазоне, от 100-300 Гц до 1-3 кГц. Это усложняет выделение диагностической информации, заложенной в пространственных характеристиках вибрации. Поэтому параметры вибрации в области средних частот редко используются в качестве диагностических.

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ВИБРАЦИЯ

- Основная особенность ВЧ вибрации как машины в целом, так и её отдельных узлов и деталей- представление её в виде волновых процессов.
- Если объём упругой среды ограничен, что имеет место при распространении вч вибрации по элементам машин и оборудования, и при условии, что эти элементы могут быть представлены в виде стержней , пластин и т.п., то виды распространяющихся волн, их скорость и потери при распространении будут зависеть от граничных условий, т.е. формы узла и механических свойств материала.
- **Чем выше частота, тем больше её затухание при распространении.**



ДАТЧИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Датчики относительных перемещений хорошо подходят для некоторых специальных случаев мониторинга валов. Хотя частотный диапазон датчиков относительных перемещений, таких как зонды вихревых токов или проксимиторы, может быть расширен до 10000 Гц с их помощью эффективно могут быть выявлены только низкочастотные составляющие, так как высшие гармоники обычно выходят за пределы ограниченного частотного диапазона этих датчиков.

К широко используемым датчикам относятся датчики скорости и ускорения (акселерометры). В последние годы для измерения механических колебаний машин наиболее широко применяются пьезоэлектрические акселерометры благодаря их широким рабочим частотным и динамическим диапазонам, небольшим размерам, высокой надежности в течение длительного периода времени (отсутствие движущихся частей) и общей прочности. Так как часто при мониторинге необходимо, чтобы верхний предел частотного диапазона значительно превышал 1000 Гц и динамический диапазон позволял выявление амплитуд механических колебаний в превышающем 1000:1 диапазоне, то единственным рациональным выбором являются пьезоэлектрические акселерометры.



Акселерометр (от лат. *accelero*- ускорять и ...метр) датчик для измерения ускорения
Велометр (от лат. *velocitas*- скорость и ...метр) датчик для измерения скорости
Проксиметр (от лат. *Proximus*- ближний и ...метр) датчик для измерения смещения

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

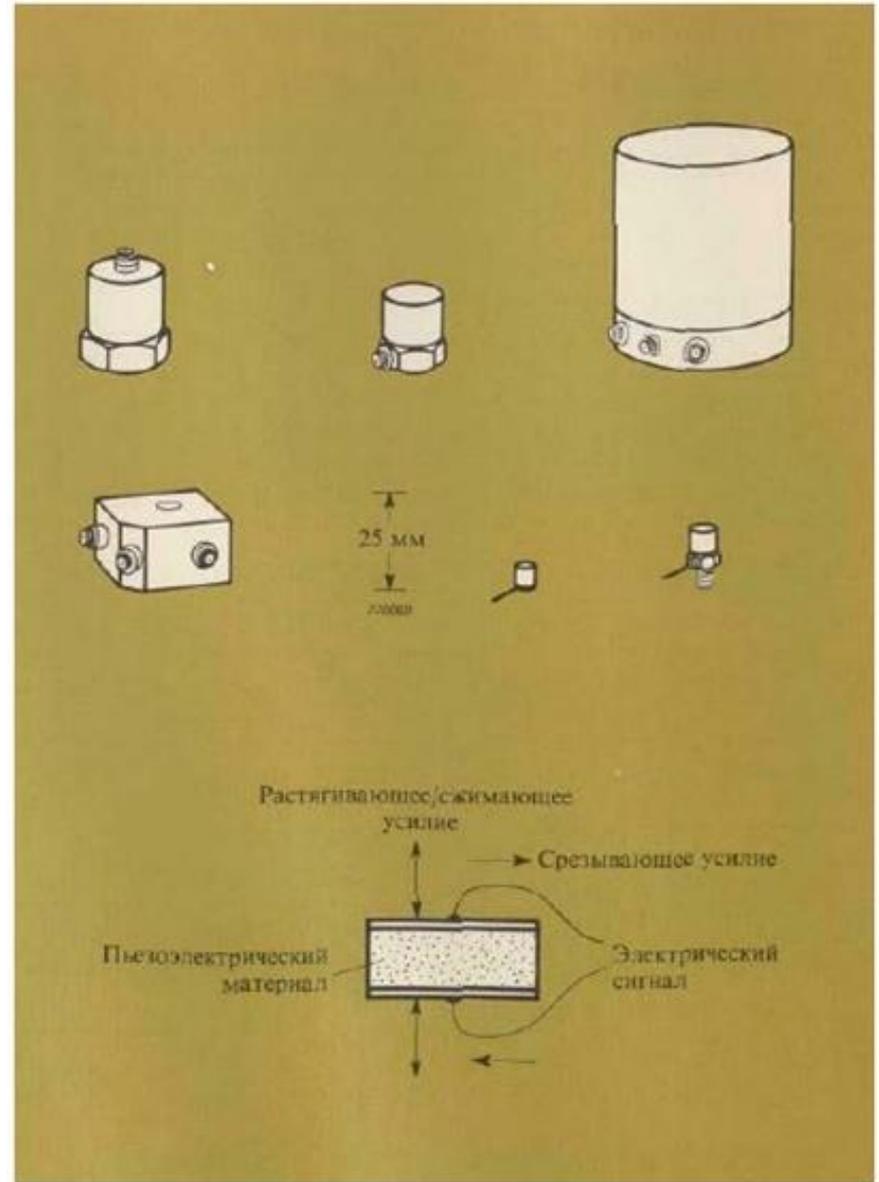
Пьезоэлектрический акселерометр является универсальным вибродатчиком, в настоящее время применяемым почти во всех областях измерения и анализа механических колебаний. Эксплуатационная характеристика пьезоэлектрических акселерометров в общем лучше характеристики любого другого вибродатчика.

Пьезоэлектрические акселерометры отличаются широкими рабочими частотными и динамическими диапазонами, линейными характеристиками в этих широких диапазонах, прочной конструкцией, надежностью и долговременной стабильностью параметров.

Так как пьезоэлектрические акселерометры являются активными датчиками, генерирующими пропорциональный механическим колебаниям механический сигнал, при их эксплуатации не нужен источник питания. Отсутствие движущихся элементов конструкции исключает возможность износа и гарантирует исключительную долговечность пьезоэлектрических акселерометров. Отметим, что отдаваемый акселерометром сигнал, пропорциональный ускорению, можно интегрировать с целью измерения и анализа скорости и смещения механических колебаний.

Основным элементом пьезоэлектрического акселерометра является диск из пьезоэлектрического материала, в качестве которого нормально используется искусственно поляризованная ферроэлектрическая керамика.

Подвергаемый действию силы (при растяжении, сжатии или сдвиге) пьезоэлектрический материал генерирует на своих поверхностях, к которым прикреплены электроды, электрический заряд, пропорциональный воздействию силы.



КОНСТРУКЦИЯ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Пьезоэлемент практических пьезоэлектрических акселерометров сконструирован так, что при возбуждении механическими колебаниями предусмотренная в корпусе акселерометра масса воздействует на него с силой, пропорциональной ускорению механических колебаний. Это соответствует закону, согласно которому сила равна произведению массы и ускорения.

На частотах значительно меньших резонансной частоты общей системы масса – пружина ускорение массы акселерометра идентично ускорению его основания и, следовательно, отдаваемый акселерометром электрический сигнал пропорционален ускорению воздействующих на него механических колебаний.

Основные варианты конструкции практических пьезоэлектрических акселерометров следующие:

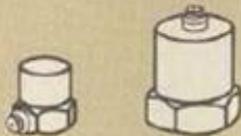
- Вариант сжатия, в котором масса воздействует силой сжатия на пьезоэлектрический элемент и
- Вариант сдвига, характерным для которого является работа пьезоэлемента под действием срезывающего усилия, обусловливаемого внутренней массой акселерометра.



ТИПЫ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Большинство изготовителей вибродатчиков изготавливает и выпускает богатый ассортимент акселерометров - на первый взгляд слишком много моделей, так что подбор соответствующего условиям измерения акселерометра является затруднительным. Небольшая группа акселерометров "общего назначения" удовлетворяет требованиям большинства нормальных областей измерения и анализа механических колебаний. Разъемы для подключения соединительных кабелей этих акселерометров расположены или сверху, или сбоку корпуса и их чувствительности находятся в диапазоне 1-10 мВ или пКл на м/с². Другие акселерометры разработаны с учетом достижения оптимальных характеристик в определенных областях применения. Примером могут служить малогабаритные и легкие акселерометры, предназначенные для измерения механических колебаний с большими амплитудами и высокими частотами и применяемые при исследовании легких конструкций, каркасов, панелей и т.д. Собственная масса этих акселерометров находится в пределах от 1/2 до 2 г. Специальные акселерометры являются оптимальными, например, для одновременно измерения в трех взаимно перпендикулярных направлениях, работы при высоких температурах, измерения больших ускорений или сильных механических ударов, калибровки вибродатчиков методом сравнения и для непрерывного контроля механических колебаний в промышленности и т.д.

Акселерометры общего назначения



Чувствительность: 1—10 пКл/мс⁻²
Вес: 1—50 г
Частотный диапазон: 0—12 000 Гц

Миниатюрные акселерометры



Чувствительность: 0,05—0,3 пКл/мс⁻²
Вес: 0,4—2 г
Частотный диапазон: 1—25 000 Гц

Специальные акселерометры



- для измерения в трех взаимно перпендикулярных направлениях
- для стационарных виброконтрольных установок
- для измерения колебаний конструкций, зданий, мостов и др.
- для эксплуатации при высоких температурах
- для калибровки и проверки вибродатчиков
- для измерения и анализа механических ударов с амплитудами до 100 км/с² (100 000 g)



ХАРАКТЕРИСТИКИ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ (ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, МАССА И ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН)

Основным параметром акселерометра нормально считается чувствительность. Идеальным являлся бы акселерометр, отдающий электрический сигнал с возможно большей амплитудой. Однако, уже на данном месте необходимо идти на компромисс, так как с большой чувствительностью нормально связана необходимость в относительно размерном пьезоэлементе и, следовательно, в увеличении размеров и собственной массы акселерометра.

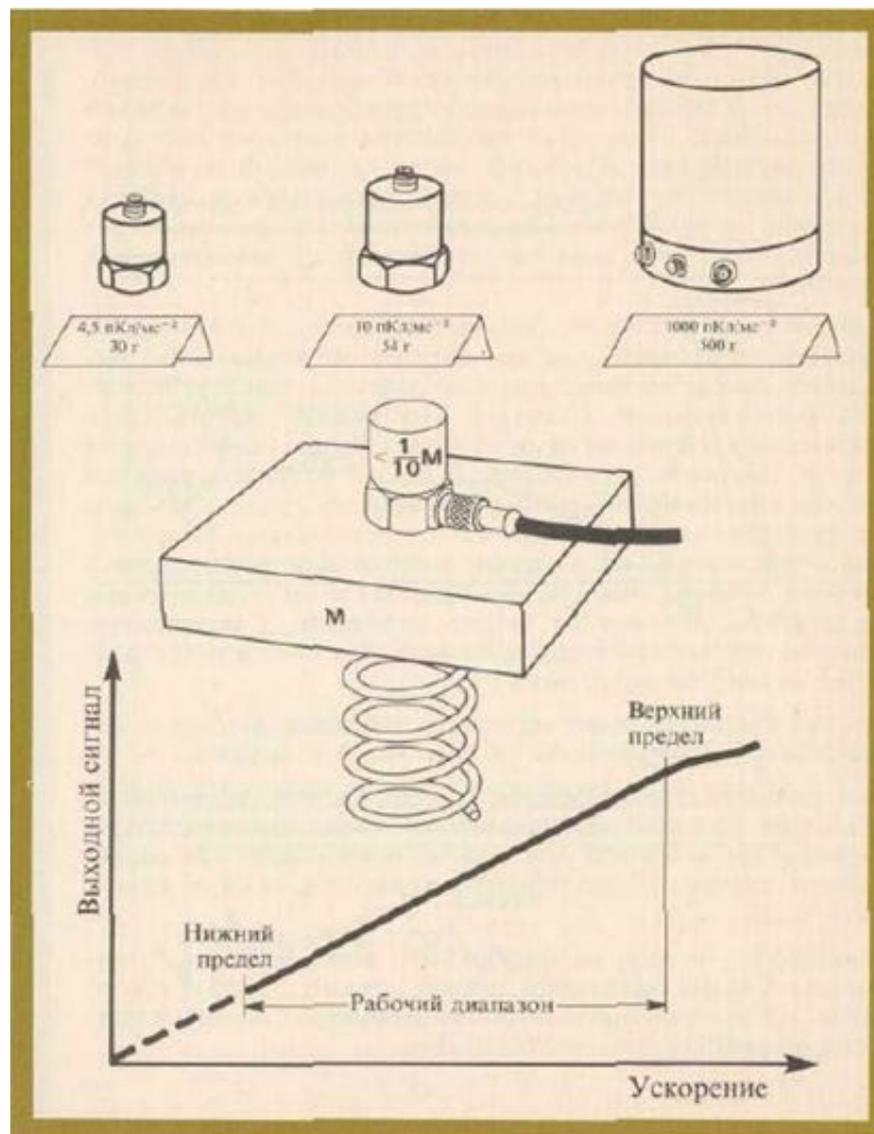
В нормальных областях применения чувствительность акселерометра не является критическим параметром, так как современные предусилители рассчитаны на усиление сигналов с малыми амплитудами.

Собственная масса акселерометра становится важным параметром при измерении и анализе механических колебаний легких объектов.

Образуемая акселерометром дополнительная масса может значительно влиять на амплитуду и частоту измеряемых и анализируемых колебаний. За общее правило можно взять, что собственная масса акселерометра не должна превышать одну десятую динамической массы объекта, на котором он закреплен.

Рабочий динамический диапазон акселерометра необходимо учитывать при измерении и анализе механических колебаний с очень малыми или очень большими амплитудами ускорения. Показанный на рисунке нижний предел рабочего динамического диапазона нормально не определяется непосредственно акселерометром, а скорее воспринимаемым и генерируемым соединительными кабелями и усилительными каскадами электрическим шумом. При применении виброизмерительной аппаратуры общего назначения этот нижний предел нормально порядка $1/100 \text{ м/с}^2$.

Верхний предел рабочего динамического диапазона акселерометра определяется прочностью его конструкции. Характеристика типичного акселерометра общего назначения линейна до $50000 - 100000 \text{ м/с}^2$, т.е. до области амплитуд механических ударов. Специальные акселерометры, предназначенные для измерения и анализа механических ударов, линейны до 1000 км/с^2 (100000 g).



РАБОЧИЙ ЧАСТОТНЫЙ ДИАПАЗОН АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

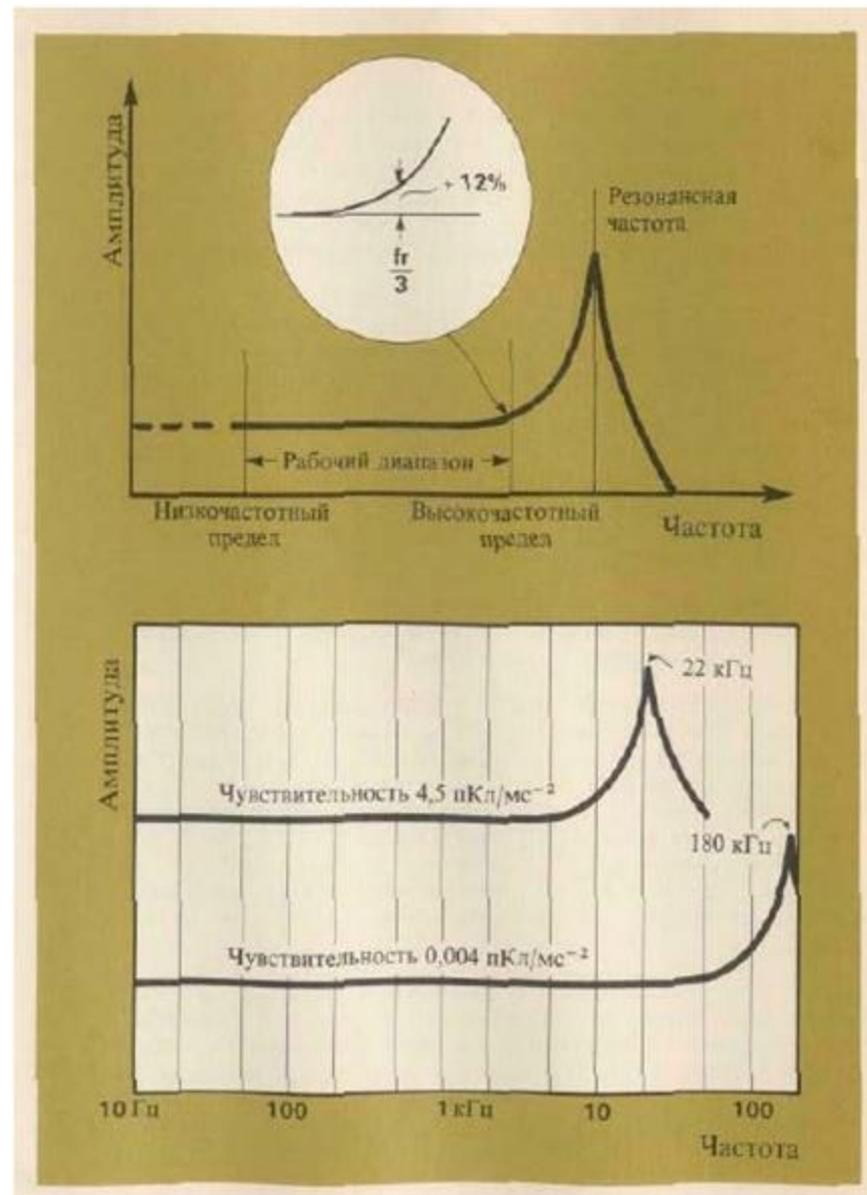
Энергия механических колебаний, генерируемых механическими системами, обычно сосредоточена в относительно узком диапазоне частот, простирающемся от 10 до 1000 Гц. Однако, измерению и анализу нормально подлежит диапазон с верхним пределом около 10 кГц, так как частоты некоторых составляющих механических колебаний могут находиться в области более высоких частот. Следовательно, рабочий частотный диапазон используемого акселерометра должен перекрывать частотный диапазон измеряемых и анализируемых колебаний.

Нижний предел рабочего частотного диапазона акселерометра на практике определяется двумя факторами. Первым из них является нижняя частота среза используемого вместе с акселерометром усилителя. Отметим, что нижняя частота среза современных усилителей намного меньше 1 Гц и она не является основной причиной затруднений. Вторым фактором является влияние изменений температуры окружающей среды, к которым все акселерометры более или менее чувствительны. Современные акселерометры, пьезоэлемент которых работает под срезающим усилием, минимально чувствительны к изменениям температуры, так что их можно применять в нормальных условиях окружающей среды при измерениях в частотном диапазоне с нижним пределом ниже 1 Гц.

Верхний предел рабочего частотного диапазона акселерометра определяется резонансом его системы масса-пружина.

Эмпирическим правилом можно принять, что погрешность измерения составляющих механических колебаний с частотами вблизи верхнего предела рабочего частотного диапазона акселерометра равного $1/3$ его резонансной частоты, не будет превышать + 12%.

Резонансная частота малогабаритных акселерометров, отличающихся малой собственной массой, доходит до 180 кГц, в то время как резонансная частота акселерометров общего назначения находится в области 20 – 30 кГц.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА КРЕПЛЕНИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ АКСЕЛЕРОМЕТРА

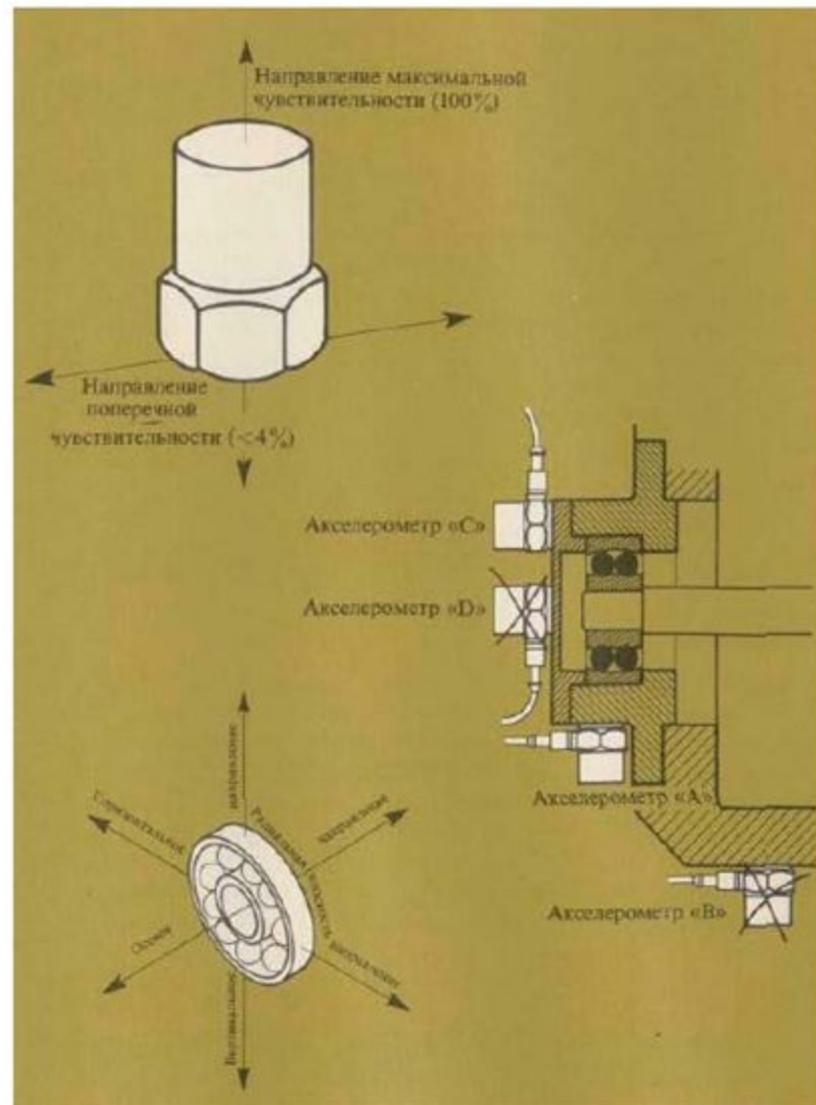
Акселерометр следует закреплять так, чтобы его ось максимальной чувствительности совпадала с нужным при измерении направлением.

Цель измерения и анализа механических колебаний обычно диктует расположение мест крепления акселерометра на исследуемом объекте. Рассмотрим, например, показанный на рисунке вправо корпус подшипника. Целью измерения механических колебаний является контроль условий работы вала и подшипника. Акселерометр следует установить так, чтобы на его основание непосредственно действовали механические колебания подшипника.

Следовательно, акселерометр =А= воспринимает механические колебания подшипника без заметного влияния колебаний, создаваемых другими узлами и деталями машины, в то время как акселерометр =В= наверно воспринимает модифицированные механическими параметрами места соединения колебания подшипника и механические колебания, генерируемые другими узлами машины. Аналогично, акселерометр =С= расположен более целесообразно с точки зрения распространения механических колебаний чем акселерометр =D=.

При подготовке измерения и анализа механических колебаний всегда поднимается вопрос о направлении, оптимальном с точки зрения исследования определенного элемента или узла машины. Общего ответа на этот вопрос или соответствующего правила нет, но в рассматриваемом выше примере можно считать эффективным, в частности для контроля условий работы, измерение колебаний в осевом и одном из радиальных направлений. Предпочтение отдается радиальному направлению, соответствующему направлению минимальной жесткости.

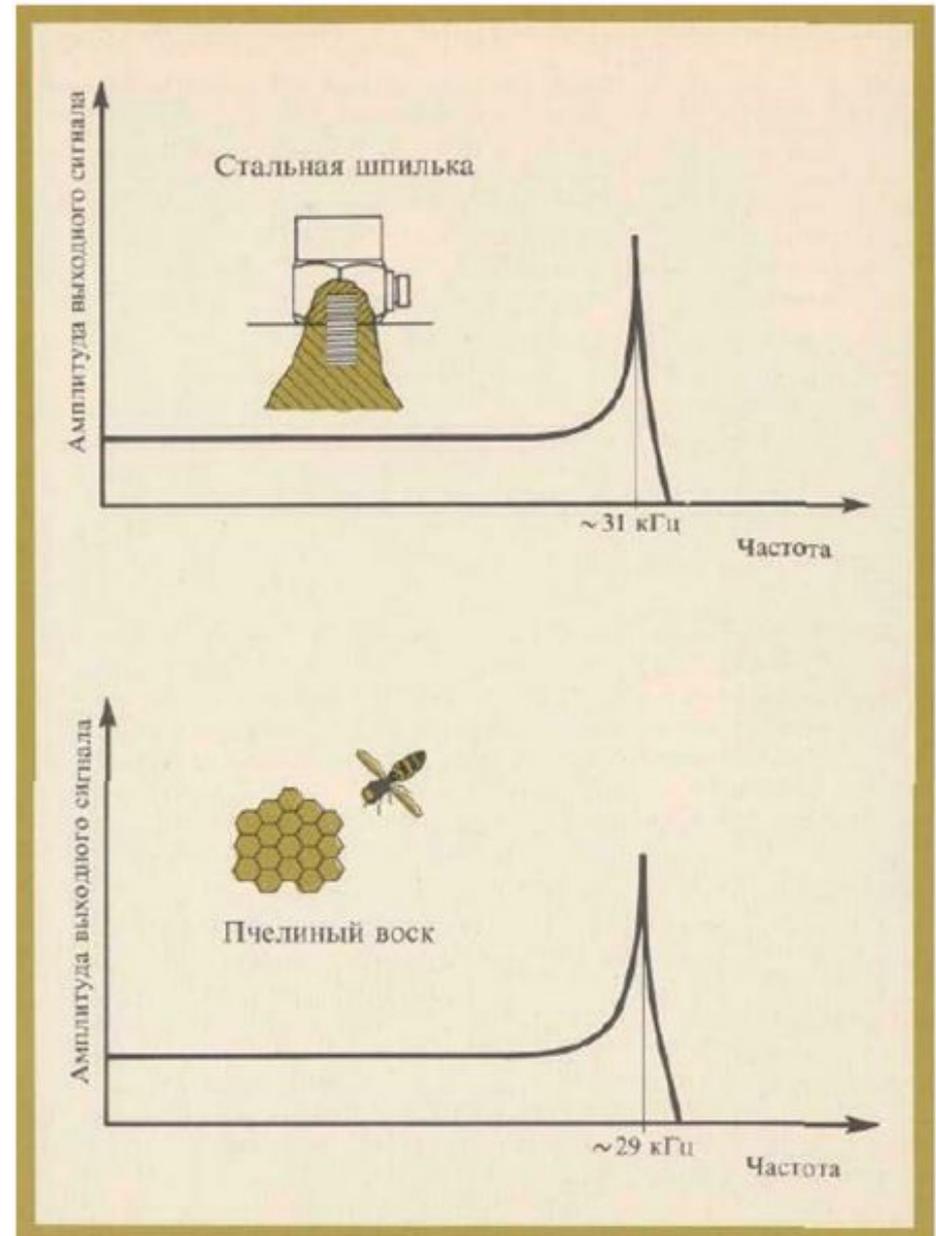
Реакция механических систем на возбуждение механическими колебаниями является сложным физическим процессом, так что при измерении даже на одном элементе машины и близких друг другу точках могут наблюдаться большие различия в амплитуде и частотном спектре исследуемых колебаний. Вышесказанное относится именно к области более высоких и высоких частот.



КРЕПЛЕНИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Крепление акселерометра, в частности его надежность, на поверхности исследуемого или испытываемого объекта является одним из самых важных условий достижения точных и надежных результатов в виброизмерительной практике. Ненадежное крепление акселерометра влечет за собой уменьшение его резонансной частоты после крепления и, следовательно, значительно уменьшает его рабочий частотный диапазон. Идеальным является крепление акселерометра на гладкой плоской поверхности прочной стальной резьбовой шпилькой (см. рисунок). Тонкий слой консистентной смазки на поверхности в месте крепления обычно увеличивает общую жесткость механического соединения акселерометра и объекта. Глубина резьбового отверстия должна быть достаточной с тем, чтобы шпилька не упиралась до дна отверстия в основании акселерометра. График в верхней части рисунка показывает частотную характеристику акселерометра общего назначения, закрепленного стальной шпилькой на гладкой поверхности объекта. Резонансная частота закрепленного акселерометра почти равна резонансной частоте при заводской калибровке (прибл. 32 кГц), в ходе которой акселерометр закреплен на особо гладкой и плоской поверхности.

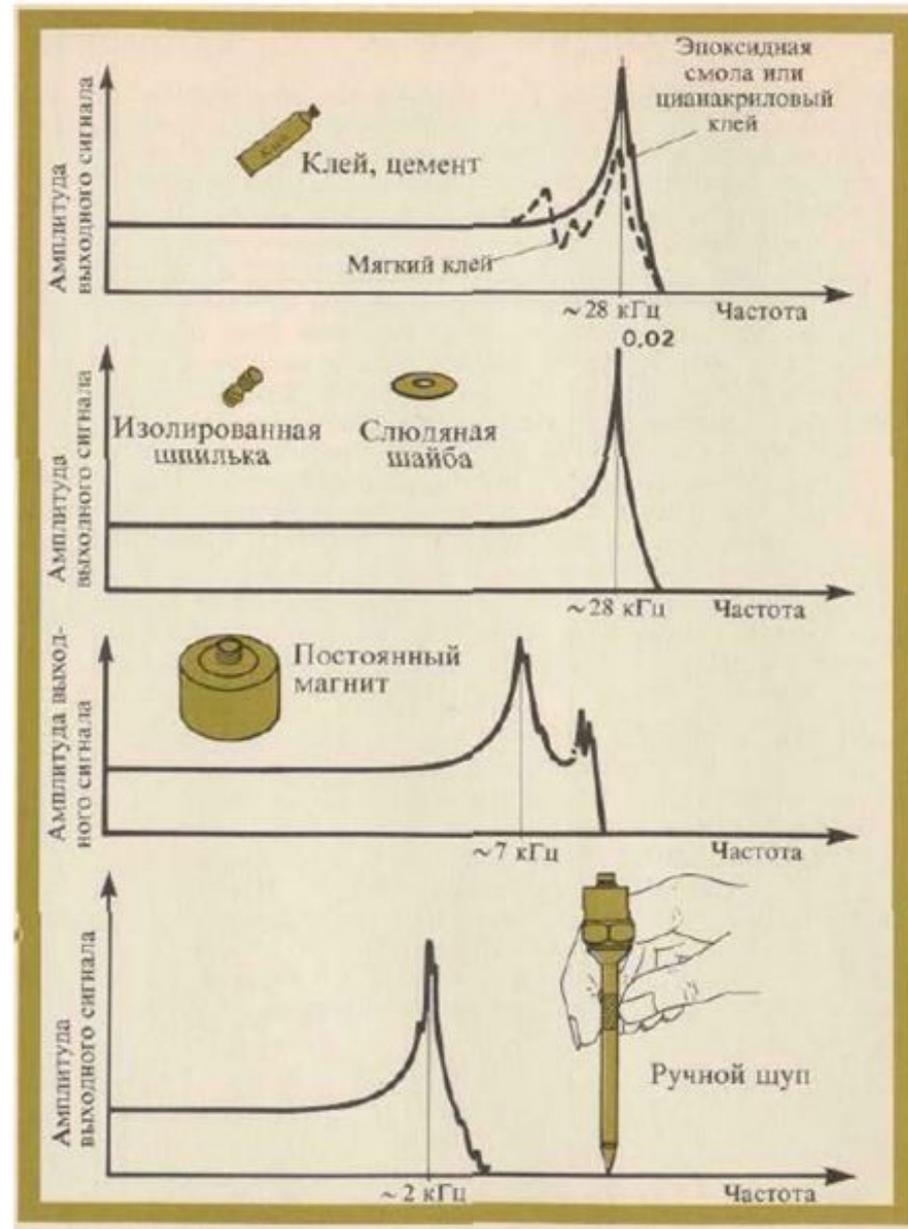
Часто используемым альтернативным методом крепления акселерометров является крепление на тонком слое пчелиного воска. Приведенная в нижней части рисунка частотная характеристика показывает высокое качество этого метода крепления, гарантирующего только незначительное уменьшение резонансной частоты акселерометра (прибл. 29 кГц). Отметим, что пчелиный воск размягчается с ростом температуры, так что его можно применять в температурном диапазоне до 40 град.С. Крепление акселерометра пчелиным воском на гладкой чистой поверхности можно считать надежным до ускорений с амплитудами около 100 м/с².



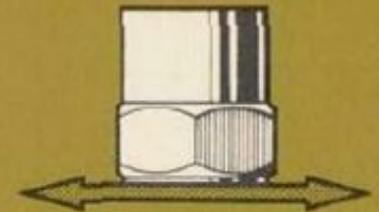
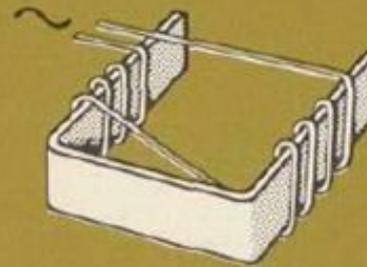
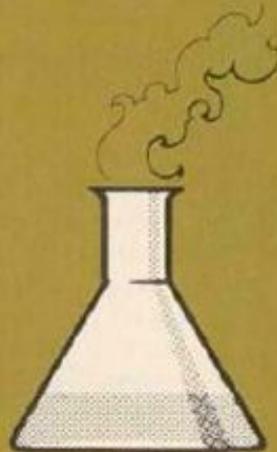
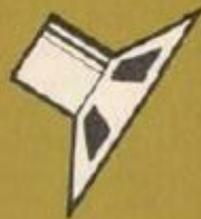
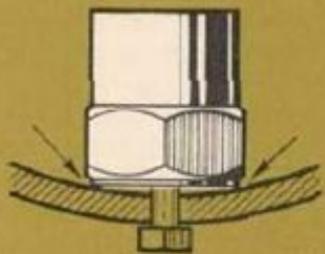
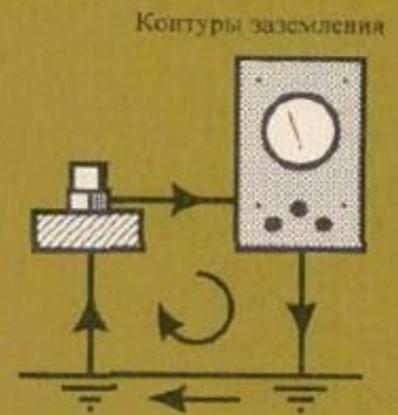
КРЕПЛЕНИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

В тех случаях, когда нужно прочное крепление одного или нескольких акселерометров и нарушение поверхности объекта резьбовыми отверстиями невозможно или нежелательно, эффективными являются специальные шпильки, прикрепляемые к объекту твердым клеем или цементом. В качестве склеивающих материалов рекомендуются эпоксидные смолы цианакриловые клеи. Применение мягких клеев может привести к значительному уменьшению рабочего частотного диапазона акселерометра. Изолированная шпилька и слюдяная шайба используются там, где нужна электрическая изоляция акселерометра относительно объекта. Электрическая изоляция предотвращает образование контуров заземления, рассматриваемых более подробно в разделе “Влияние условий внешней среды”. Отметим, что слюдяная шайба должна иметь малую толщину. Изолированная шпилька и слюдяная шайба обеспечивают надежное крепление акселерометра, уменьшающее резонансную частоту всего до 28 кГц.

Простым методом крепления акселерометра на ровной поверхности объекта из магнитного материала является применение постоянного магнита. Так как резонансная частота закрепленного на магните акселерометра значительно уменьшается (прибл. до 7 кГц), этим методом можно пользоваться только при измерении и анализе в области низких частот, т.е. до 2 кГц. Сила постоянного магнита обеспечивает надежную работу акселерометра при ускорениях до 1000 – 2000 м/с² (в зависимости от собственной массы акселерометра). Поддерживаемый и перемещаемый рукой щуп, на верхнем конце которого закреплен акселерометр, удобно применять при быстром ориентировочном измерении и проверке механических колебаний. Однако, ввиду малой общей жесткости, получаемые при применении этого метода результаты не совсем точны и воспроизводимы. Виброизмерительная система, используемая вместе с закрепленным на щупе акселерометром, должна содержать фильтр нижних частот, ограничивающий общий рабочий частотный диапазон на частоте прибл. 1000 Гц.



ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ – ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ



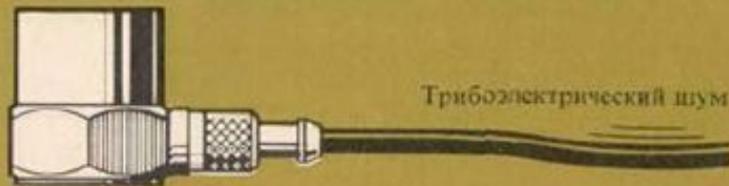
Деформация основания

Акустический шум

Коррозионные вещества

Электромагнитные помехи

Поперечные колебания



Современные акселерометры и соединительные кабели разработаны и сконструированы с учетом обеспечения их минимальной чувствительности к влияниям внешней среды, иллюстрируемым на рисунке. Однако, для работы в неблагоприятных условиях внешней среды часто нужны специальные акселерометры. В последующих разделах рассматриваются поочередно отдельные условия внешней среды и их влияние на пьезоэлектрические акселерометры.

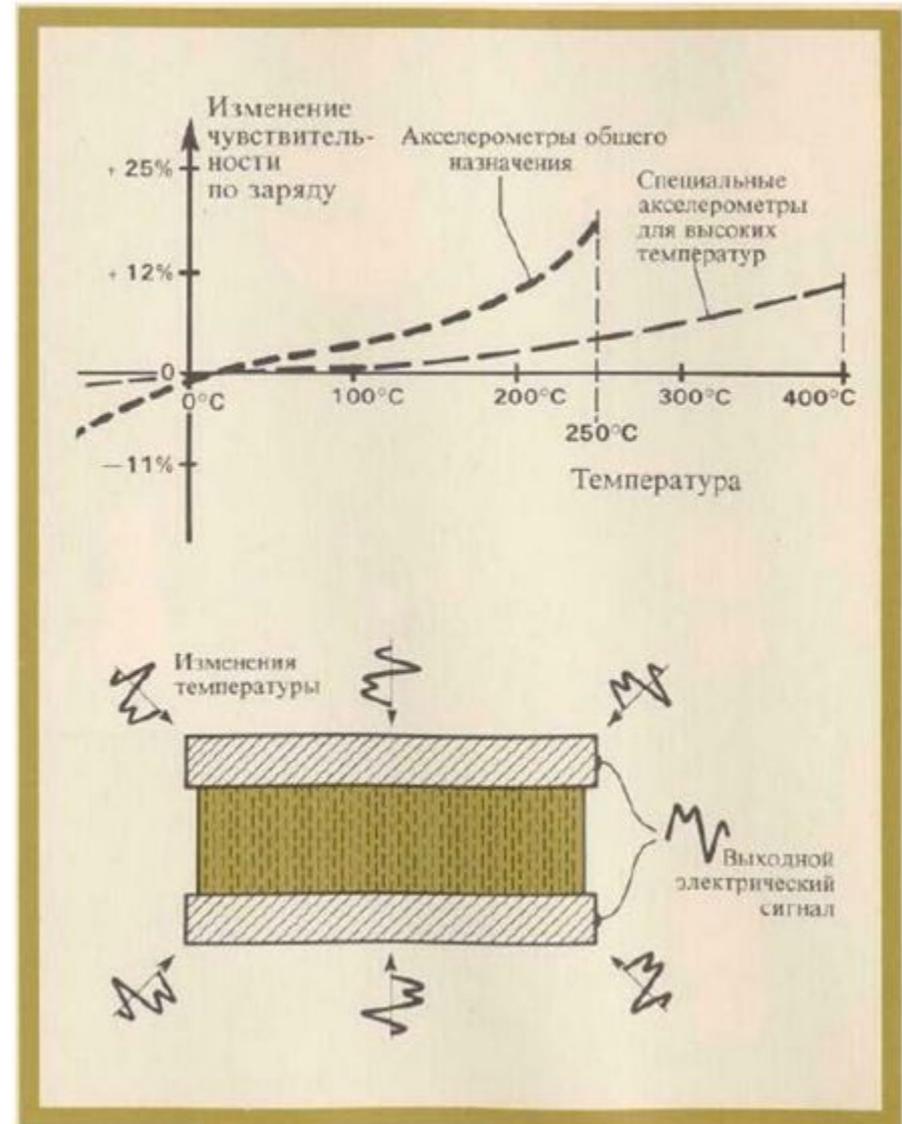
ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ – ТЕМПЕРАТУРА

Нормальные акселерометры общего назначения могут работать в температурном диапазоне с верхним пределом 250 гр.С. При превышении этого предела начинается процесс деполяризации пьезокерамики и, следовательно, необратимого изменения чувствительности акселерометра. Отметим, что акселерометр с частично деполяризованным пьезоэлементом не теряет работоспособности, но его необходимо повторно калибровать. Для эксплуатации в температурном диапазоне до 400 гр С предусмотрены акселерометры, чувствительный элемент которых изготовлен из специальной пьезокерамики.

Так как свойства всех пьезоэлектрических материалов зависят от температуры, результатом изменений температуры внешней среды являются изменения чувствительности работающего в таких условиях акселерометра. Чтобы дать возможность внесения соответствующей поправки, все акселерометры фирмы Брюль и Кьер снабжаются индивидуальной калибровочной картой- паспортом, в которой также приводится зависимость чувствительности от температуры. Внесение поправки на температуру внешней среды нужно именно при эксплуатации акселерометров при температурах намного больше или меньше 20 гр.С.

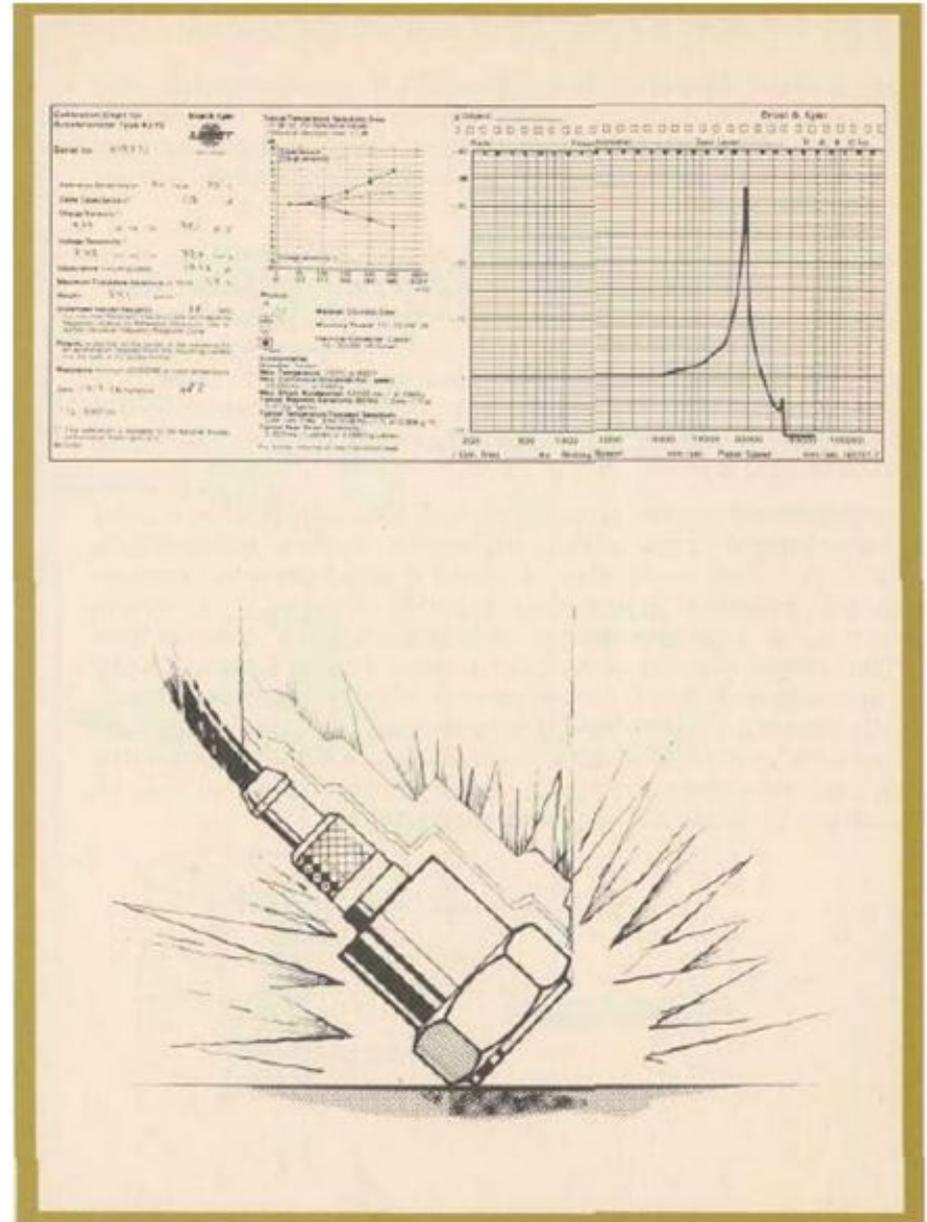
Подвергаемые небольшим быстрым изменениям температуры акселерометры отдают паразитный электрический сигнал, ничем не связанный с измеряемыми механическими колебаниями. Так как амплитуда этого сигнала слишком мала, он является серьезным только при измерении и анализе механических колебаний с малыми ускорениями и/или низкими частотами. Современные акселерометры, в частности акселерометры с подвергаемым срезающему усилию пьезоэлементом, отличаются малой чувствительностью к быстрым изменениям температуры внешней среды.

При креплении акселерометра на поверхностях, температура которых превышает 250 гр.С, рекомендуется применение теплоотвода и слюдяной прокладки, устанавливаемых между основанием акселерометра и поверхностью исследуемого или испытываемого объекта. При таком креплении температура основания акселерометра не превысит 250 гр.С даже при температурах поверхности объекта в диапазоне 350 – 400 гр.С. Еще более эффективным является форсированное воздушное охлаждение основания акселерометра.

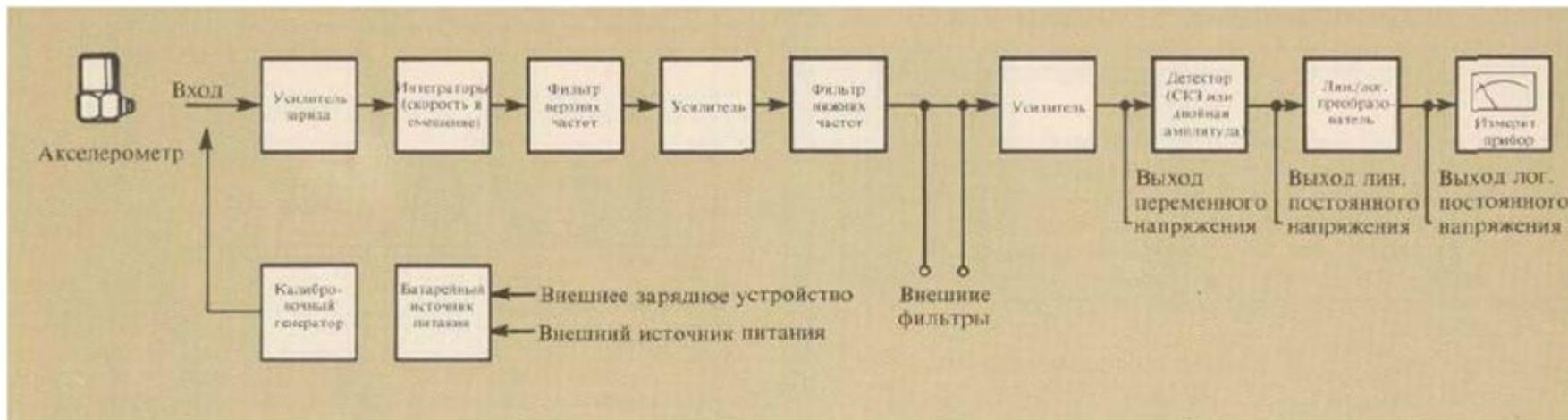


КАЛИБРОВКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Все акселерометры подвергаются в процессе производства тщательной заводской калибровке и поставляются вместе с соответствующими индивидуальными калибровочными картами – паспортами. Параметры акселерометров, при эксплуатации и хранении которых соблюдаются определяемые технической спецификацией пределы температуры, излучения, механических ударов и т.д. стабильны в течении длительного времени. На основе опыта установлено, что параметры акселерометров не изменяются более чем на 2% даже в течении нескольких лет. Однако, небрежное обращение с акселерометрами даже при их нормальной эксплуатации может привести к значительным изменениям их параметров и в крайних случаях даже к их повреждению. Отметим, что результатом свободного падения акселерометра из на пол из бетона является механический удар с ускорением, достигающим до нескольких тысяч g. Следовательно, акселерометры рекомендуется проверять и повторно калибровать с регулярными интервалами времени. Калибровка чувствительности акселерометра также дает гарантию его работоспособности.



ВИБРОМЕТР



Приведенная на рисунке блок-схема иллюстрирует конструкцию и принцип действия аналогового виброметра. Акселерометр соединяется с усилителем заряда, образующим входной каскад прибора и отличающимся входным сопротивлением порядка нескольких ГОм. Усилитель заряда во входном каскаде исключает необходимость применения внешнего предусилителя и дает возможность соединения акселерометра и виброметра длинным кабелем (допускаются кабели длиной до нескольких сот метров) без заметной потери чувствительности системы.

Каскад электронных интеграторов обеспечивает измерение как ускорения, так и скорости и смещения механических колебаний.

Предусмотренные фильтры верхних и нижних частот можно настраивать согласно требованиям к ширине анализируемой полосы частот и/или рабочему частотному диапазону используемого акселерометра. Эти фильтры также эффективно подавляют помехи, обусловленные низко- и высокочастотными шумами. С выходом усилительного каскада, обеспечивающего нужное усиление сигнала, соединен детектор, отдающий пропорциональное измеряемой величине постоянное напряжение. Это напряжение затем подается на измерительный или регистрирующий прибор. Детектор определяет среднее или среднеквадратичное значение или двойную амплитуду подлежащего измерению сигнала и в его каскаде может быть также предусмотрено запоминающее устройство, хранящее максимальное значение сигнала. Запоминающее устройство особенно эффективно при измерении механических ударов и кратковременных (переходных) процессов.

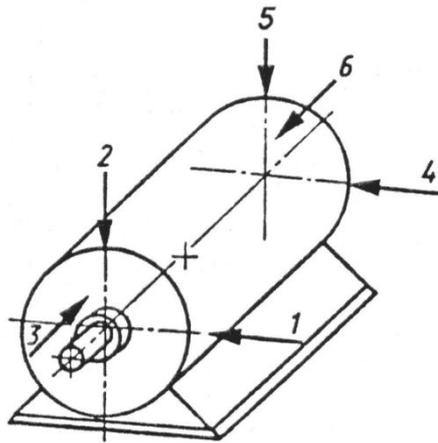
После преобразования в каскаде линейно – логарифмического преобразователя измеряемый сигнал поступает на измерительный прибор с логарифмической шкалой.

Вместе с виброметром можно применять внешние фильтры, обеспечивающие частотный анализ исследуемых механических колебаний. Виброметр также снабжен выходами переменного и постоянного напряжений, предусмотренными для подключения осциллографов, измерительных магнитофонов и регистрирующих приборов, например самописца уровня.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ И АНАЛИЗА МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Широкополосные виброметрические измерения дают ценные предварительные результаты, хорошо применяемые при быстрой оценке исследуемого процесса, например оценке состояния машин или эффективности машин виброизоляции и т. д. Результаты виброметрических измерений обычно сравниваются друг с другом и оцениваются согласно стандартизованным критериям опасности и строгости механических колебаний.

Промышленные механизмы ГОСТ 10816



Типичный пример расположения точек измерения

Зона А - Новые машины, только что введенные в эксплуатацию.

Зона В - Машины пригодные для дальнейшей эксплуатации без ограничения сроков.

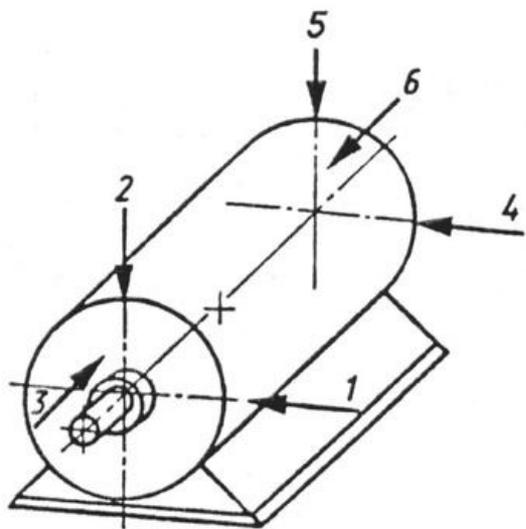
Зона С - Машины, попадающие в эту зону, обычно рассматриваются как непригодные для длительной непрерывной эксплуатации. Обычно данные машины могут функционировать ограниченный период времени, пока не появится подходящая возможность для проведения ремонтных работ.

Зона D - Уровни вибрации в данной зоне обычно рассматривают как достаточно серьезные, для того чтобы вызвать повреждение машины.

V_{rms} , мм/с	Класс 1	Класс 2
0.28	A	A
0.45		
0.71		
1.12	B	
1.8		B
2.8	C	
4.5		C
7.1	D	
11.2		D
18		
28		
45		

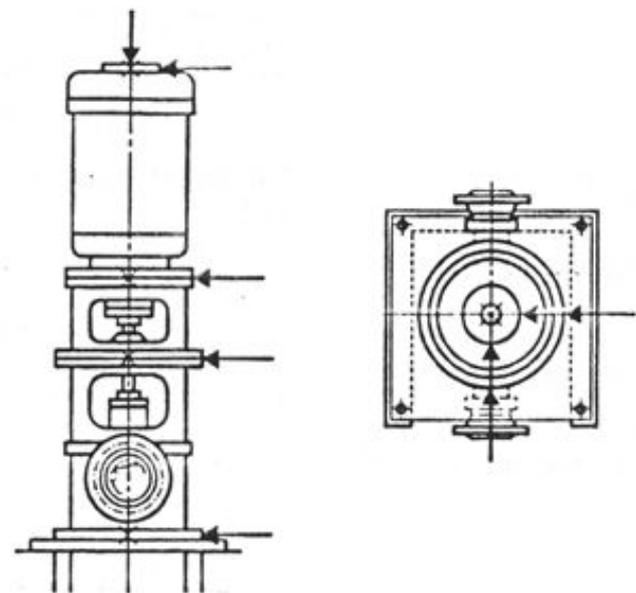
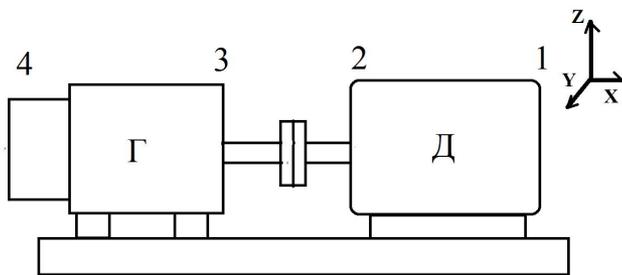
Таблица примерных границ зон для машин различных классов

ТРЕБОВАНИЯ К ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЗАМЕРАМ ВИБРАЦИИ ГОСТ ISO 10816-1-97 КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ МАШИН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ВИБРАЦИИ



Типичный пример расположения точек измерения

Измерения вибрации проводят в различных точках в двух или трех взаимно перпендикулярных направлениях (для целей мониторинга достаточно замера в одном направлении), при определенных условиях и установившемся режиме работы.

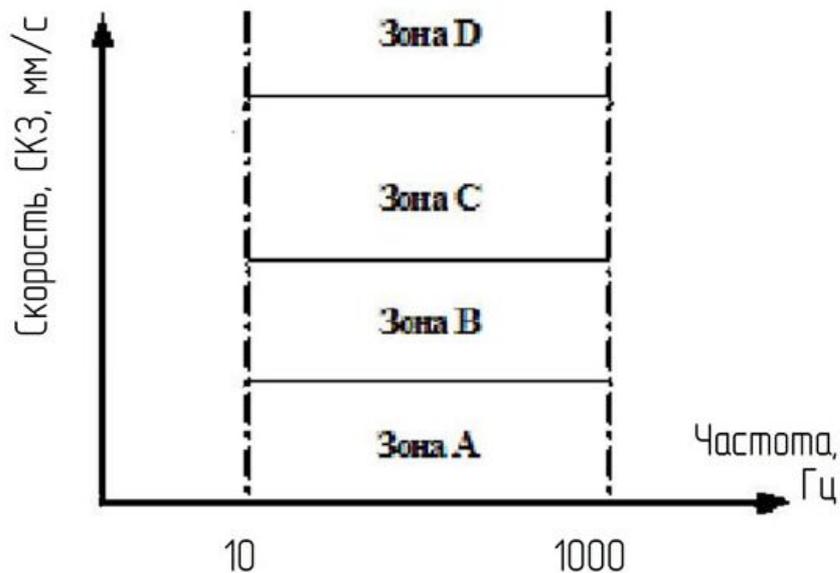


Зона А - Новые машины, только что введенные в эксплуатацию.

Зона В - Машины пригодные для дальнейшей эксплуатации без ограничения сроков.

Зона С - Машины, попадающие в эту зону, обычно рассматриваются как непригодные для длительной непрерывной эксплуатации. Обычно данные машины могут функционировать ограниченный период времени, пока не появится подходящая возможность для проведения ремонтных работ.

Зона D - Уровни вибрации в данной зоне обычно рассматривают как достаточно серьезные, для того чтобы вызвать повреждение машины.



Общий вид кривых для критерия на основе среднего квадратического значения виброскорости

V_{rms} , мм/с	Класс 1	Класс 2
0.28	A	A
0.45		
0.71		
1.12	B	
1.8		B
2.8	C	
4.5		C
7.1	D	
11.2		D
18		
28		
45		

Таблица примерных границ зон для машин различных классов

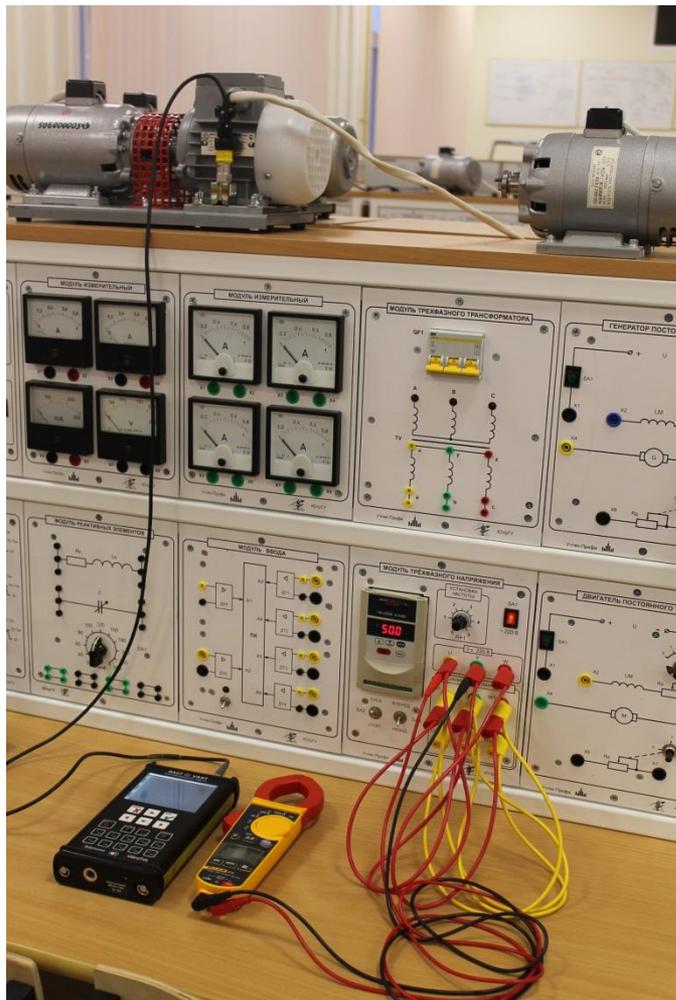
Класс 1 - Отдельные части двигателей и машин, соединенные с агрегатом и работающие в обычном для них режиме (серийные электрические моторы мощностью до 15 кВт являются типичными машинами этой категории).

Класс 2 - Машины средней величины (типовые электромоторы мощностью от 15 до 875 кВт) без специальных фундаментов, жестко установленные двигатели или машины (до 300 кВт) на специальных фундаментах.

Общий уровень СКЗ вибрации и действующее значение электрического параметра



Стенд: модель электропривода асинхронный электродвигатель и частотный преобразователь



Стенд: модель электропривода асинхронный электродвигатель при питании от сети переменного тока

