

# Методы и способы измерения вибрации.

## Вибрационная диагностика.

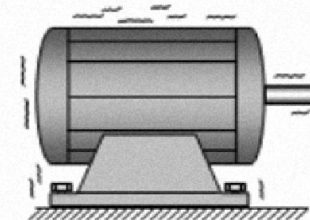


**Вибрация машин** - это  
возвратно-поступательное  
движение машин или  
узлов машин.

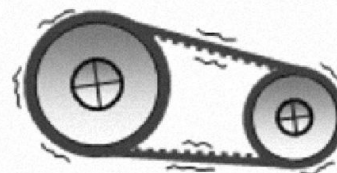
**Любой компонент**,  
который совершает  
возвратно-поступательное  
движение или колебания,  
испытывает вибрацию.



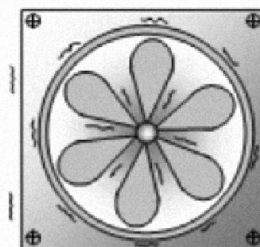
Вибрация насоса



Вибрация двигателя



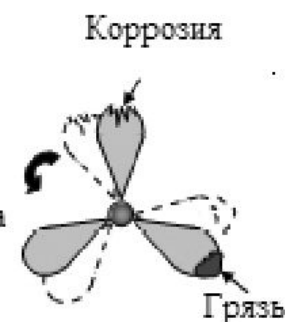
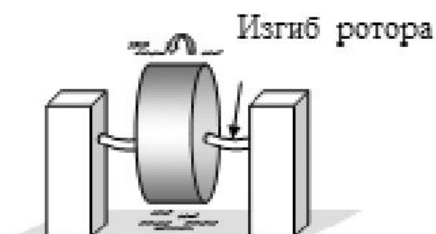
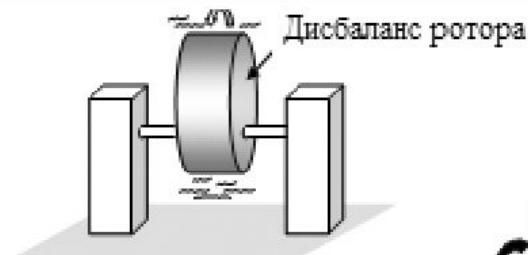
Вибрация ремня



Вибрация вентилятора

## Откуда возникают периодические силы, вызывающие вибрацию машин?

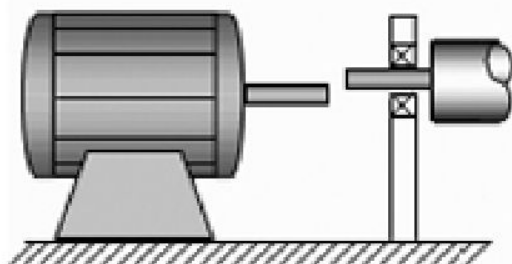
Неуравновешенные компоненты машин имеют «тяжелую точку», которая вращается и вызывает действие периодических сил в машине. Частой причиной дисбаланса являются дефекты механической обработки, неоднородная плотность материала, воздушные полости в литых деталях, отсутствие необходимой балансировочной массы, неправильная балансировка, изгиб ротора, а также поврежденные, деформированные, подвергнутые коррозии или загрязненные лопасти вентилятора.



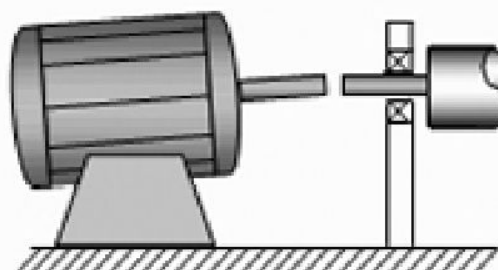
## Откуда возникают периодические силы, вызывающие вибрацию машин?

Несоосные компоненты машин создают изгибающие моменты, которые при вращении вызывают действие периодических сил на машине. Частой причиной несоосности являются неправильная сборка, неровный фундамент, тепловые расширения, деформации из-за момента затяжки, а также неправильный монтаж сцеплений.

Параллельная несоосность



Угловая несоосность



## Откуда возникают периодические силы, вызывающие вибрацию машин?

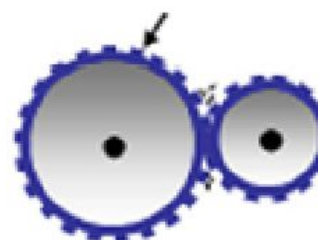
Изношенные детали машин вызывают действие периодических сил на машине за счет трения неровных изношенных поверхностей. Частой причиной износа роликовых подшипников, зубчатых колес и ремней является неправильный монтаж, недостаток смазки, производственный дефект и перегрузка.



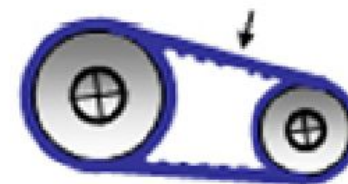
Износ тел качения



Износ зубьев



Износ ремня



## Откуда возникают периодические силы, вызывающие вибрацию машин?

Неправильная работа компонентов машин вызывает действие периодических сил на машине из-за скачкообразной подачи питания. Например, неравномерная подача воздуха в насосе, двигатель внутреннего сгорания с неровно работающим цилиндром и нестабильный контакт щеток в двигателе постоянного тока.

Неравномерная подача воздуха



Неровно работающий цилиндр

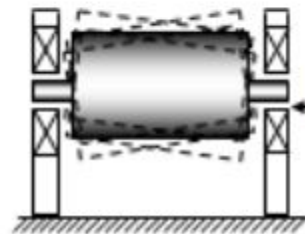


Нестабильный щёточный контакт

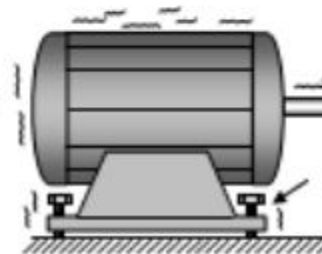


## Откуда возникают периодические силы, вызывающие вибрацию машин?

Ослабление может вести к возникновению вибрации как на вращающихся, так и невращающихся механизмах. Часто причиной ослабления являются чрезмерные зазоры в подшипниках, ослабленные крепежные болты, плохо сопрягаемые части, коррозия и структурные трещины.



Чрезмерный зазор



Ослабленные болты

**Ослабление конструкции** является одной из причин вибрации машин. Ослабленные компоненты машин могут приводить к тому, что нормальные уровни вибрации увеличиваются и превышают допустимые пределы.

## Откуда возникают периодические силы, вызывающие вибрацию машин?

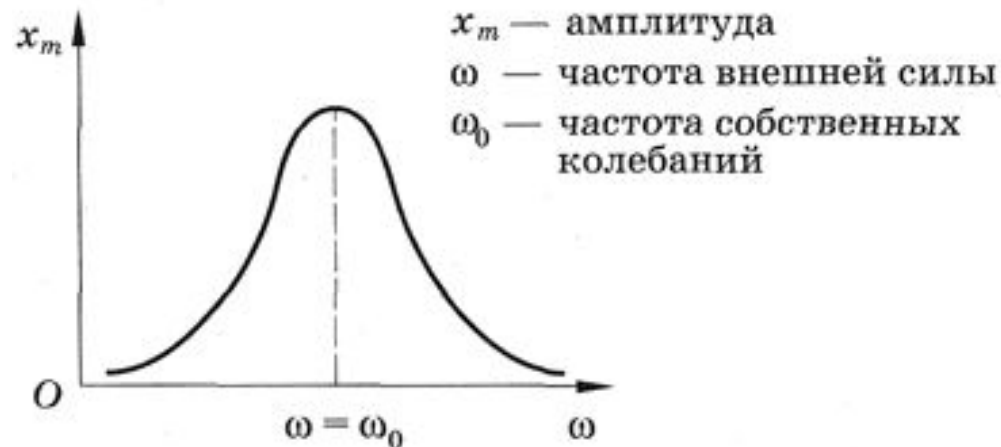
**Резонанс.** Машины также совершают колебания с определенной частотой. Скорость, с которой машина совершает колебания без воздействия на неё внешних сил, называется собственной частотой колебаний. Собственная частота колебаний машины - это наиболее характерная скорость колебаний машин или та частота, с которой эта машина «предпочитает» вибрировать.



Если на машину будет действовать внешняя периодическая сила с частотой близкой к её собственной частоте колебаний, амплитуда колебаний будет постепенно увеличиваться. В этом случае машина, испытывает резонанс.

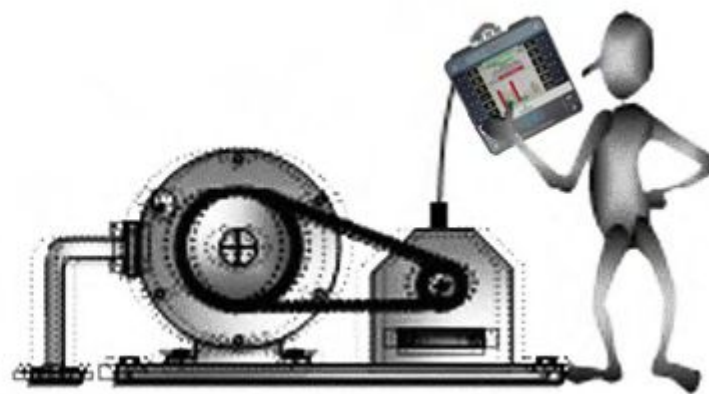


При совпадении частоты внешней силы и частоты собственных колебаний тела амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает. Такое явление называют **механическим резонансом**.



Явление резонанса может быть причиной разрушения машин, зданий, мостов, если собственные их частоты совпадают с частотой периодически действующей силы.

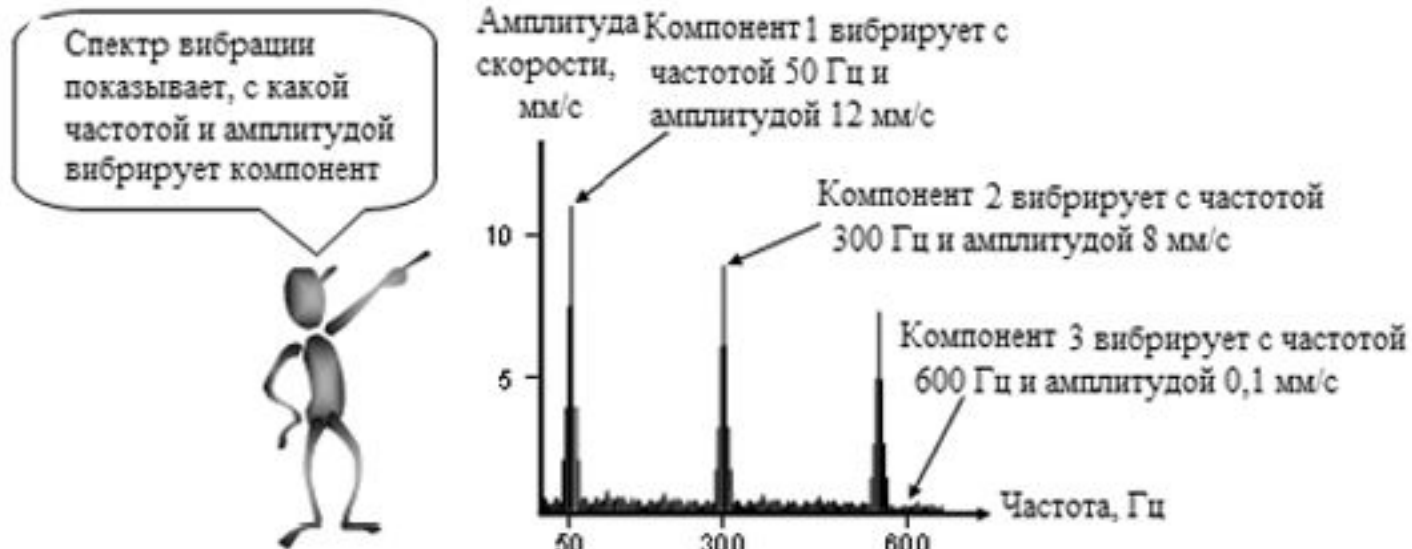
## Поставим диагноз!



- ✓ Для осуществления *качественного мониторинга вибрации* машин нужно понимать, для чего вообще необходим мониторинг вибрации. Мониторинг вибрационных характеристик машин даёт нам представление о техническом состоянии машины. Вы можете использовать эту информацию для выявления развивающихся проблем, планирования работ по ТОиР.

## # Что такое спектр вибрации?

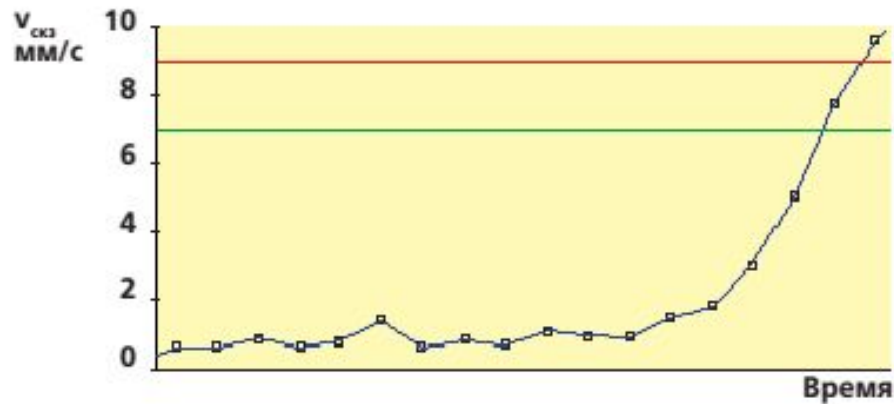
**Спектр** – это графическое представление частот, на которых компоненты машины совершают колебания с определенной амплитудой.



# # Двухуровневый контроль состояния агрегата

## Уровень 1: Мониторинг, тренды вибрации

- Всестороннее исследование
- Проводится в течение длительного времени
- Не требует специальных знаний



### Контроль состояния агрегата:

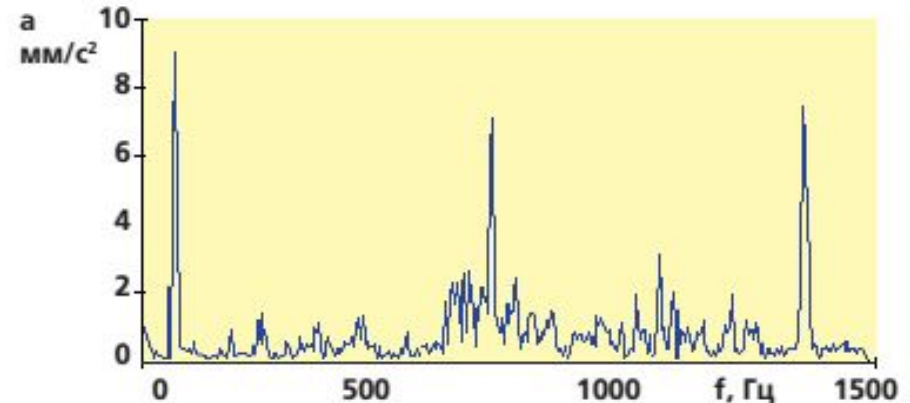
Вибрация  
Состояние подшипников

### Параметры:

Вибро- перемещение, скорость, ускорение  
Метод ударных импульсов для подшипников  
Температура  
Скорость вращения  
Кавитация в насосах

## Уровень 2: Вибродиагностика, анализ тревог

- Анализ конкретного дефекта
- Проводится в короткие сроки
- Осуществляется специалистами



### Локализация дефектов агрегата:

Разбалансировка ротора, расцентровка валов, повреждение зубчатых механизмов, диагностика подшипников и т.п.

### Анализ сигналов

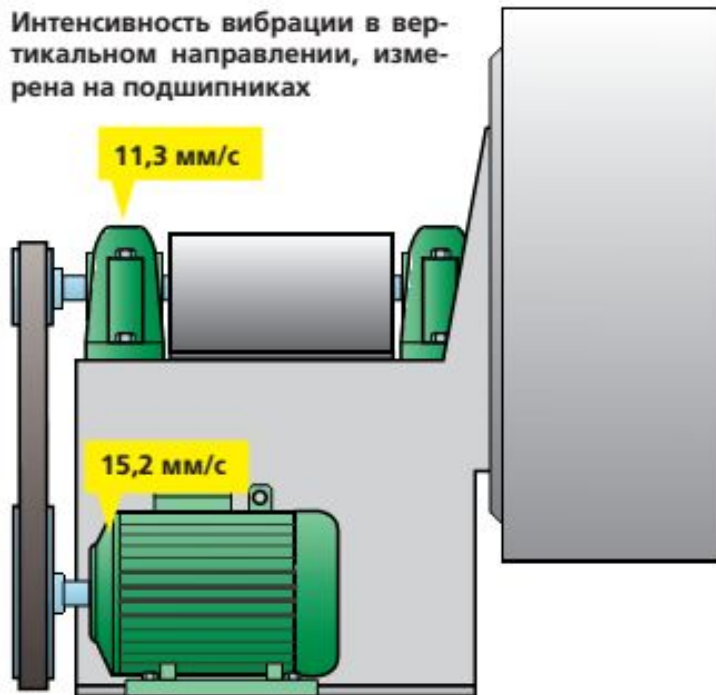
Амплитудный спектр  
Спектр огибающей  
Временной сигнал  
Гармонический анализ  
Кепстральный анализ

# Пример двухуровневого контроля состояния агрегата

Вытяжной вентилятор окрасочного цеха  
( $P = 37$  кВт)

## 1. Измерение параметров

Интенсивность вибрации в вертикальном направлении, измерена на подшипниках

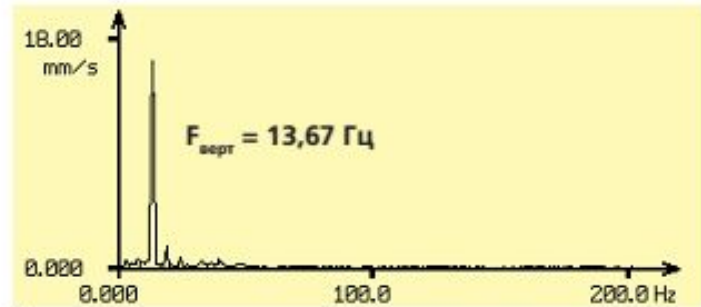


Двигатель:  
1475 об/мин = 24,58 Гц

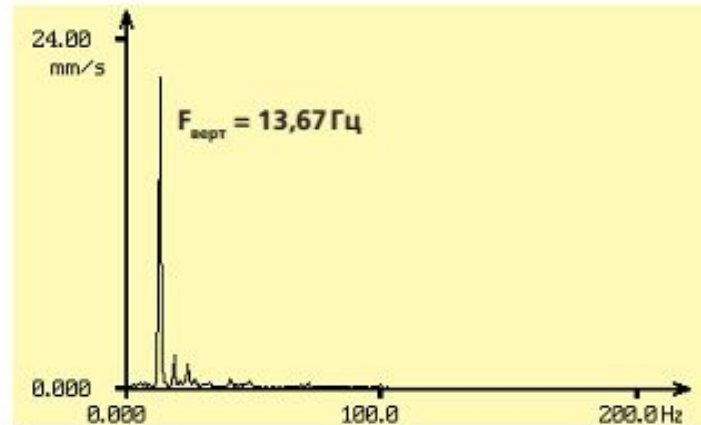
Вентилятор:  
820 об/мин = 13,67 Гц

## 2. Анализ сигналов

БПФ-спектр сигнала вибрации

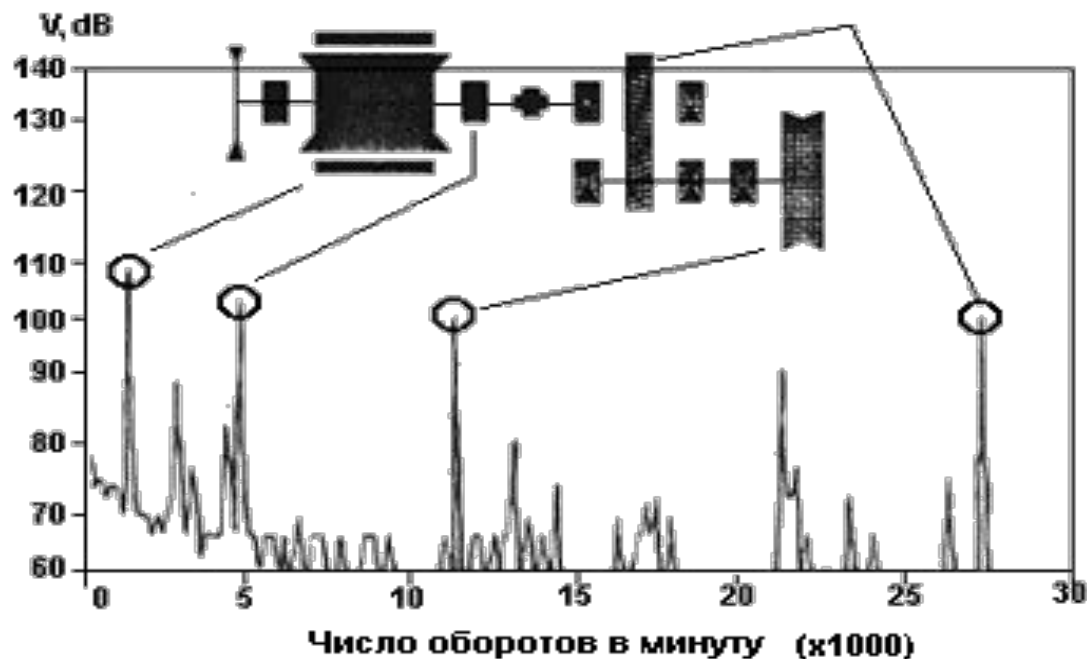


Подшипник вентилятора, радиальная и вертикальная вибрация



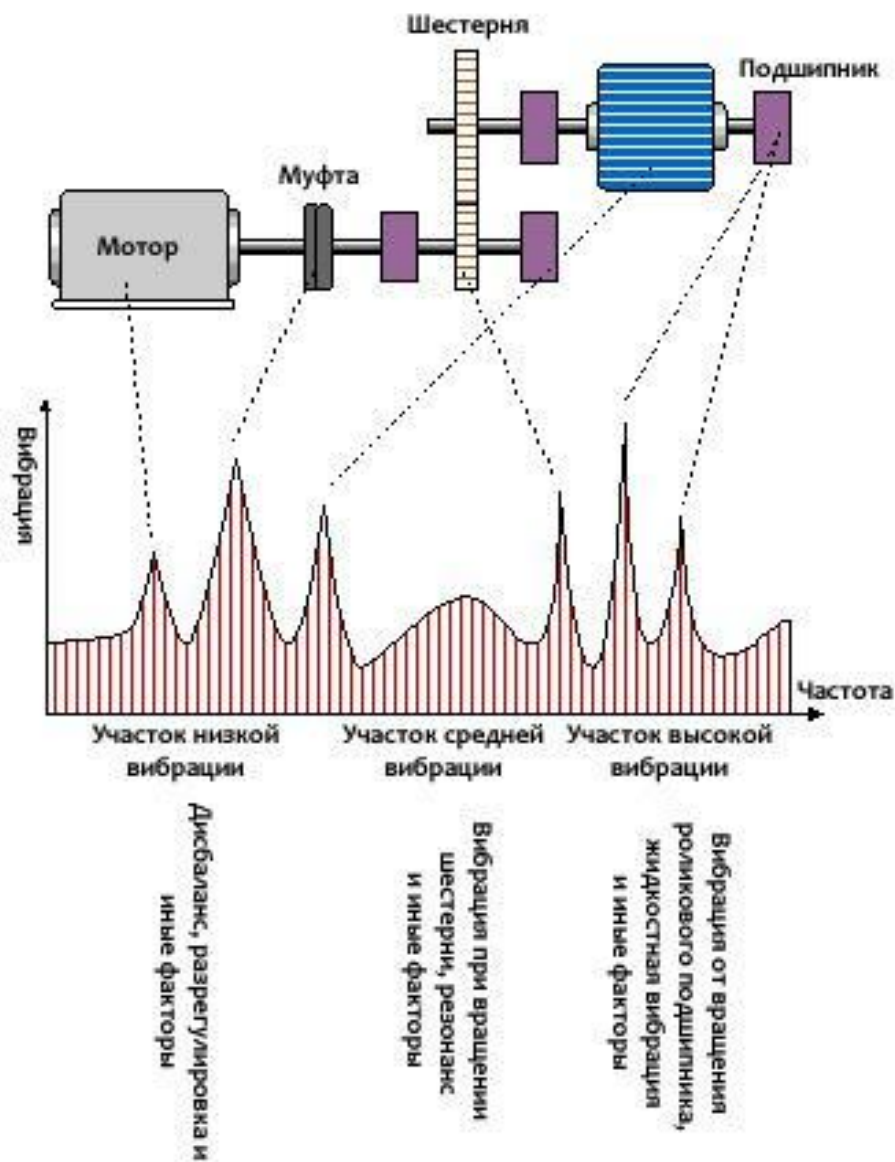
Подшипник двигателя, радиальная и вертикальная вибрация

## Диагностика оборудования



Механическая вибрация определяется процессами, которые приводят к появлению сил, действующих на определенных частотах. В результате вибрация проявляется на тех же частотах, что и действующие силы, но во многих случаях в спектре присутствуют и колебания на других частотах.

Появление этих и других частот, которые обычно являются гармониками частоты действия вынуждающей силы или ее боковыми полосами, связано с нелинейностью конструкции машины. Появление гармоник и боковых полос - первый признак ухудшения состояния машины.

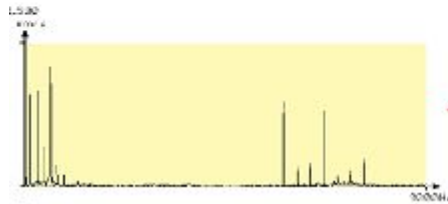




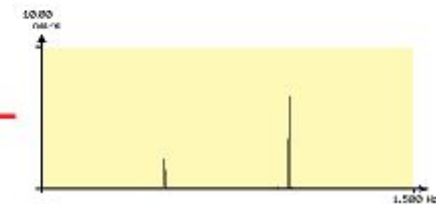
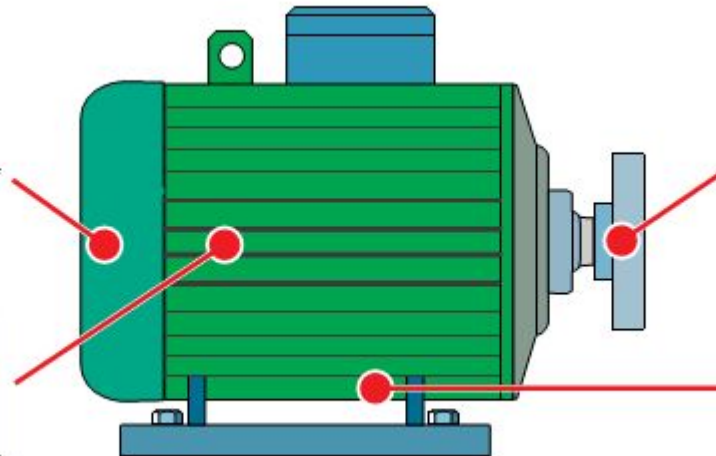
Повреждение подшипника



Повреждение муфты

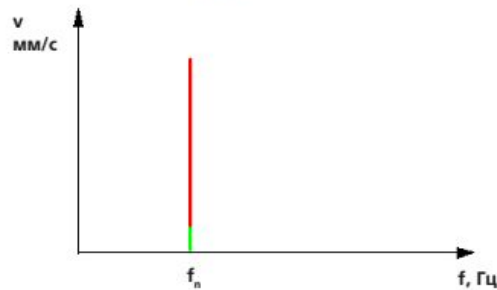


Повреждение ротора



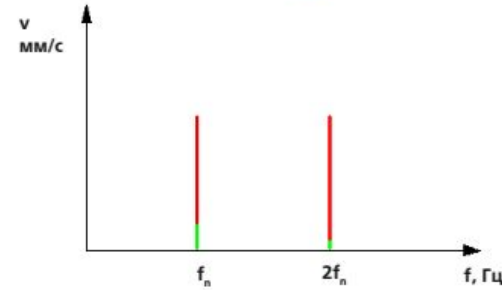
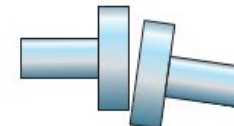
Повреждение статора

## Разбалансировка



- Недопустимо высокие значения амплитуды  $f_n$
- Частота вращения:  $f_n = (\text{об/мин})/60$
  - Стандарт для проведения оценки: ИСО 2372, ГОСТ ИСО 10816-3

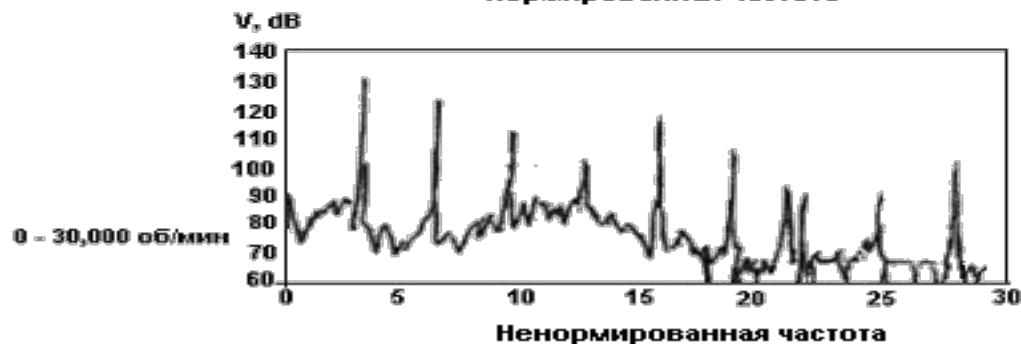
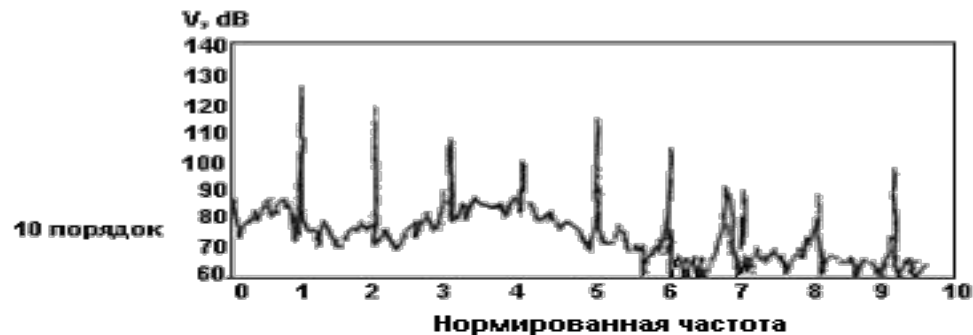
## Расцентровка



- Удвоенная частота вращения  $2f_n$
- Рад. направление: радиальная несоосность
  - Акс. направление: аксиальная несоосность



## Диагностика оборудования



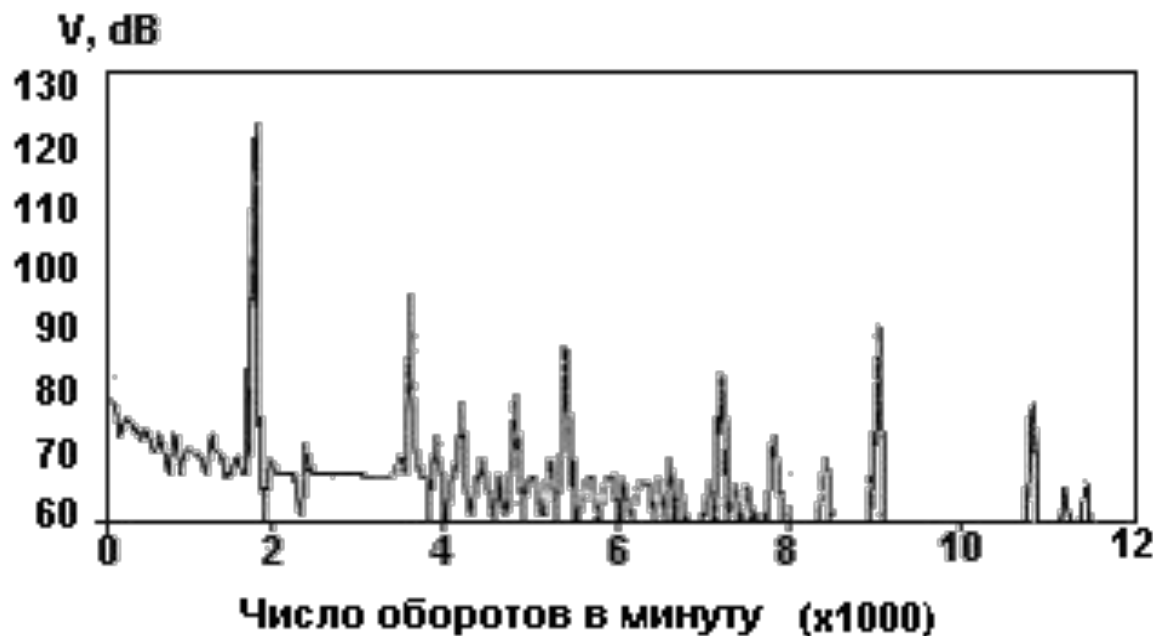
Обычно при анализе спектра различают 3 группы составляющих вибрации: гармоники, несинхронные составляющие и субгармоники.

**Гармоники** представляют собой пики на частотах, кратных частоте цикла действия (частоте вращения) машины; по ним можно делать выводы о дисбалансе, несоосности или ослаблении соединений.

**Несинхронные составляющие** наблюдаются на частотах, некратных частоте вращения; анализ этой группы составляющих позволяет обнаруживать дефекты, например, элементов подшипников качения и ремней.

**Субгармоники** - составляющие, которые лежат ниже частоты вращения. Они могут быть обусловлены такими явлениями как вихри в масляном клине подшипника, дефекты ременной передачи, чрезмерное ослабление соединений или стук в машине.

## Дисбаланс



**Преобладает первая гармоника на частоте вращения**

Показан типичный спектр вибрации машины, имеющей дисбаланс и/или расцентровку. Часто предполагается, что именно эти две причины являются основными в появлении проблем, связанных с вибрацией. Они определяются по наличию в спектре нескольких первых гармоник частоты вращения. Для того, чтобы отличить дисбаланс от несоосности, иногда прибегают к измерениям фазы.

Силы, связанные с дисбалансом, вызывают вибрацию, максимальную в направлении наименьшей жесткости конструкции. Это можно использовать при выявлении ослабления крепления машины, трещины в опоре и т.д. как для горизонтально, так и для вертикально расположенных машин

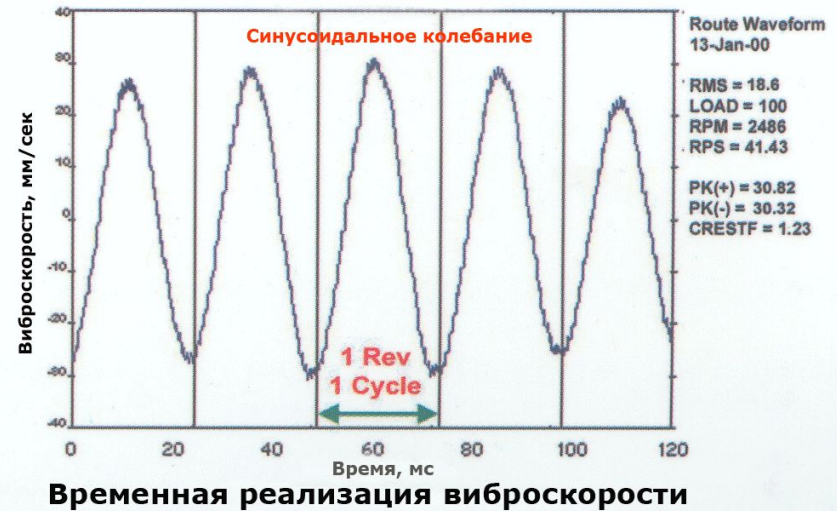
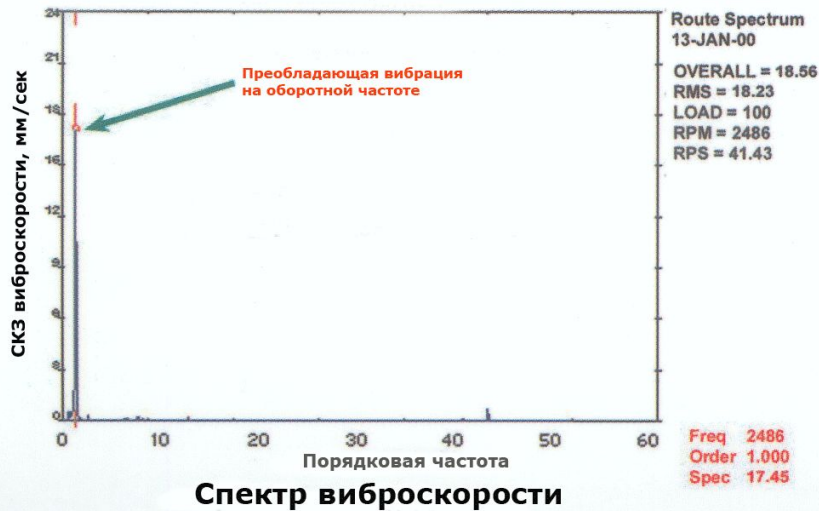
# Дисбаланс

CSI 2140




## IMBALANCE

Вентилятор № 2



## Пример обнаружения дисбаланса

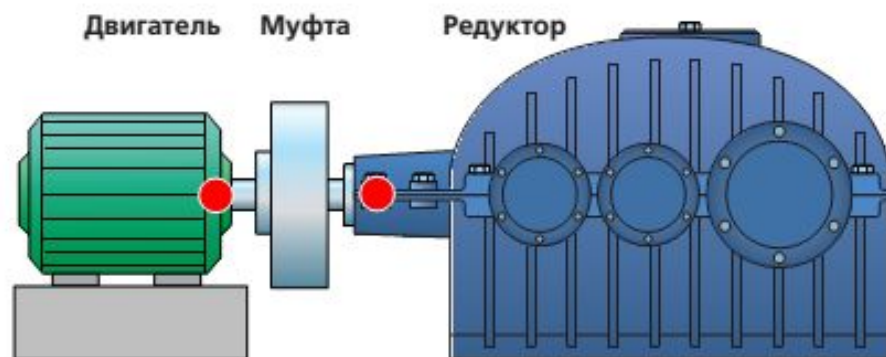
### Редуктор ленточного конвейера

P = 600 кВт

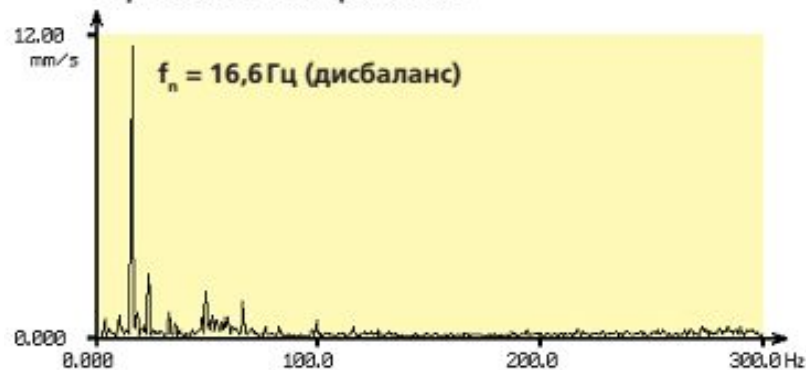
n = 996 об/мин ( $f_n = 16,6$  Гц)

Интенсивность	Двигатель	Редуктор
A, RH, мм/с	3,1	-
A, RV	7,8	9,2
A, AX	5,3	6,2
B, RH	4,4	-
B, RV	6,8	-

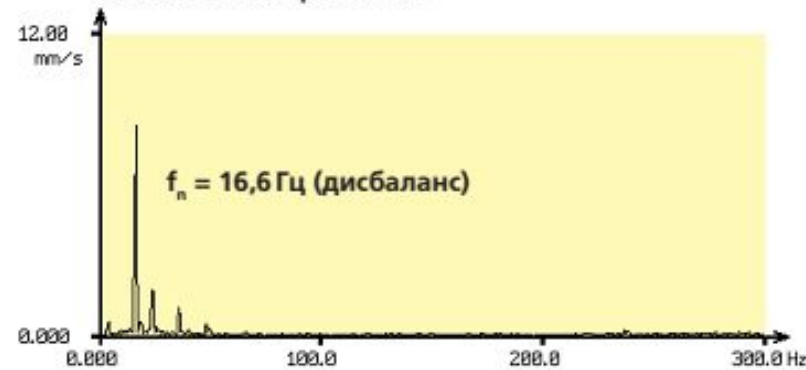
Причина: Разбалансировка муфты



Редуктор, приводной подшипник, вертикальное направление



Редуктор, приводной подшипник, аксиальное направление



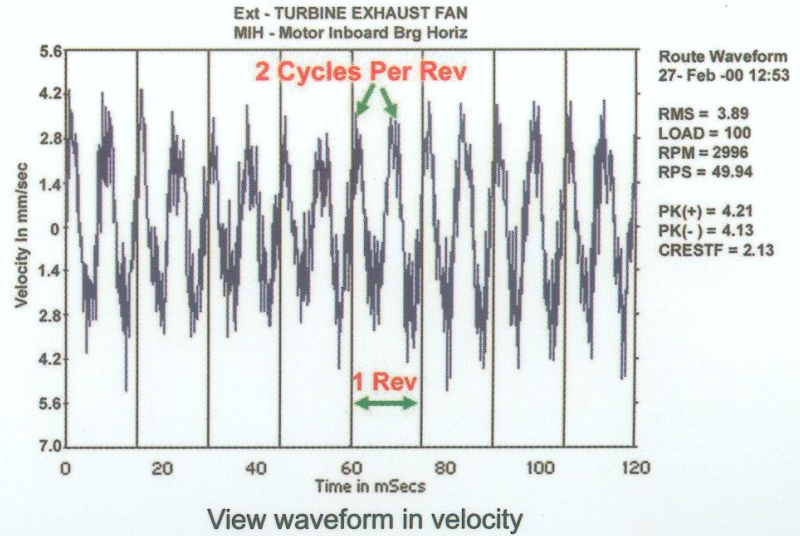
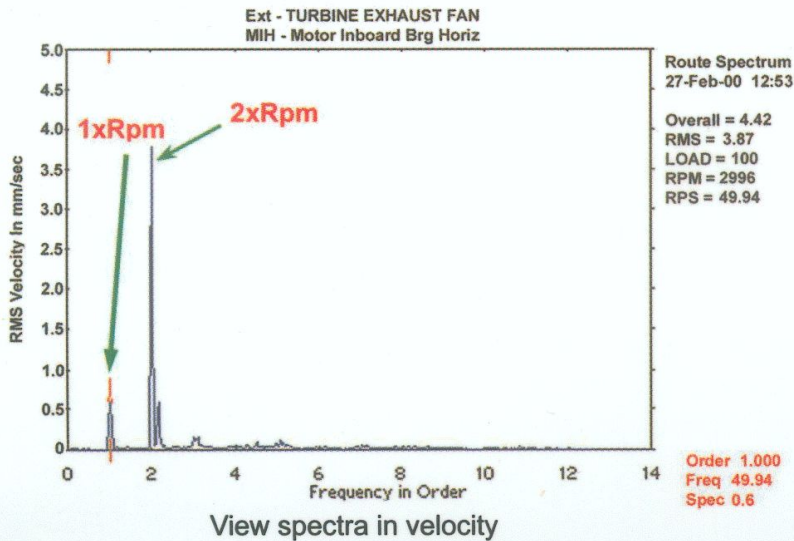
# Несоосность

CSI 2140



BALTECH

## MISALIGNMENT



## Пример обнаружения расцентровки

### Гидротурбинный генератор

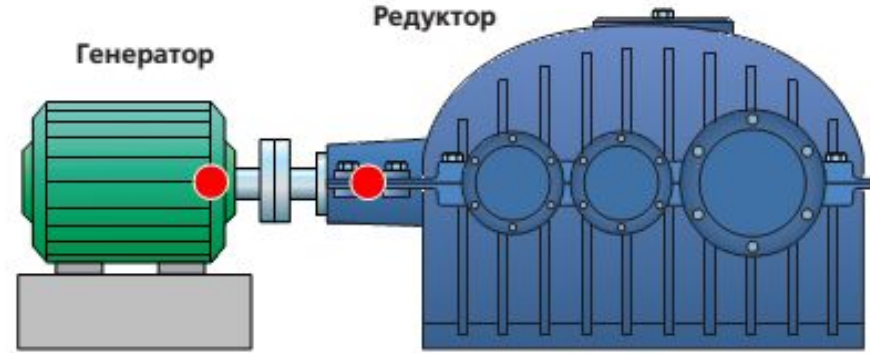
$P = 55 \text{ кВт}$

$n = 1000 \text{ об/мин}$  ( $f_n = 16,67 \text{ Гц}$ )

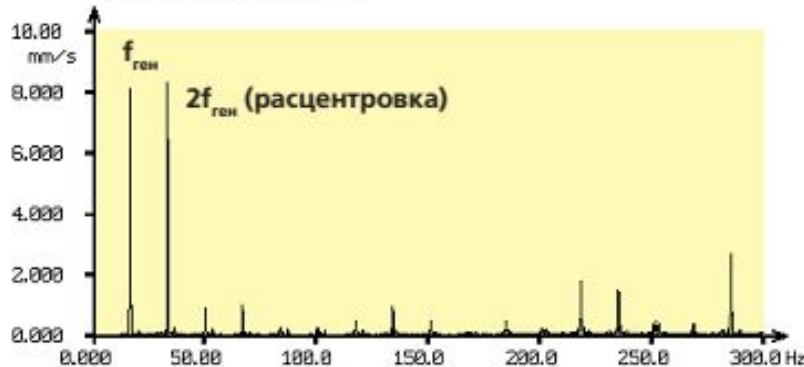
Интенсивность	Генератор	Редуктор
Прив. подш., RH	9,5	1,5 мм/с
Прив. подш., RV	4,1	-
Прив. подш., AX	4,4	-

Коррекция в верт. направлении	До	После
Угл. несоосность ( $\varnothing = 170 \text{ мм}$ )	0,42 мм	- 0,02 мм
Смещение	0,44 мм	0,05 мм

Причина: расцентровка вала



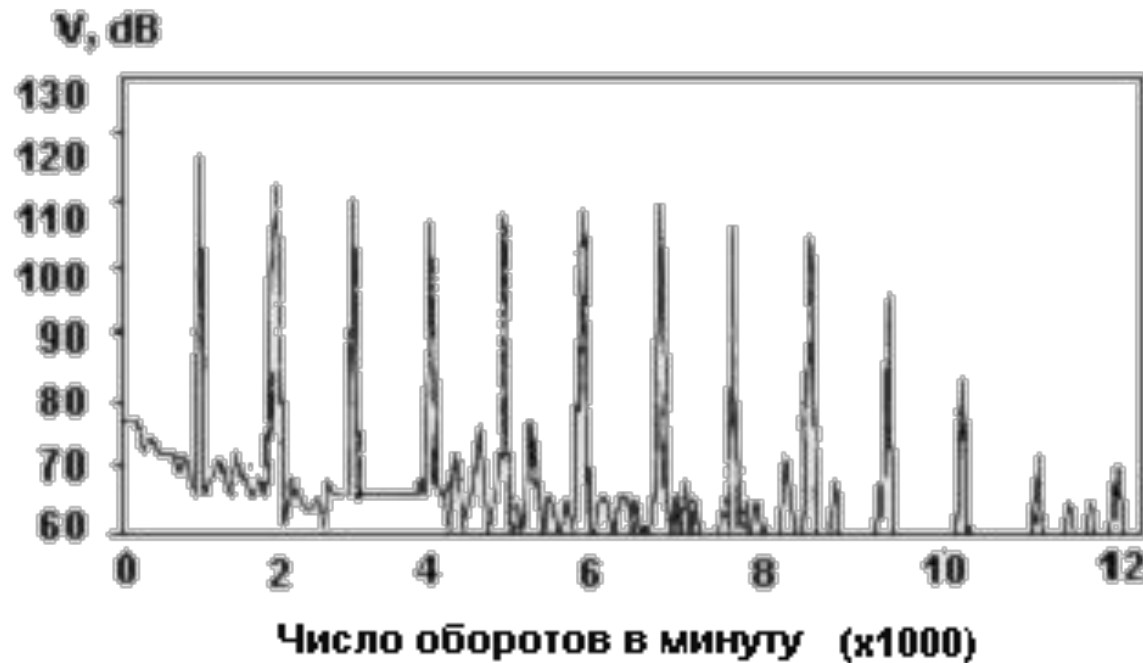
Генератор, приводной подшипник, исходное состояние



После центровки вала



## Ослабление механических соединений



### Ослабление механических соединений

Многочисленные высшие гармоники, кратные частоте вращения, являются признаками ослаблений в соединениях, а при сильном развитии этого дефекта в спектре наблюдаются и субгармоники.

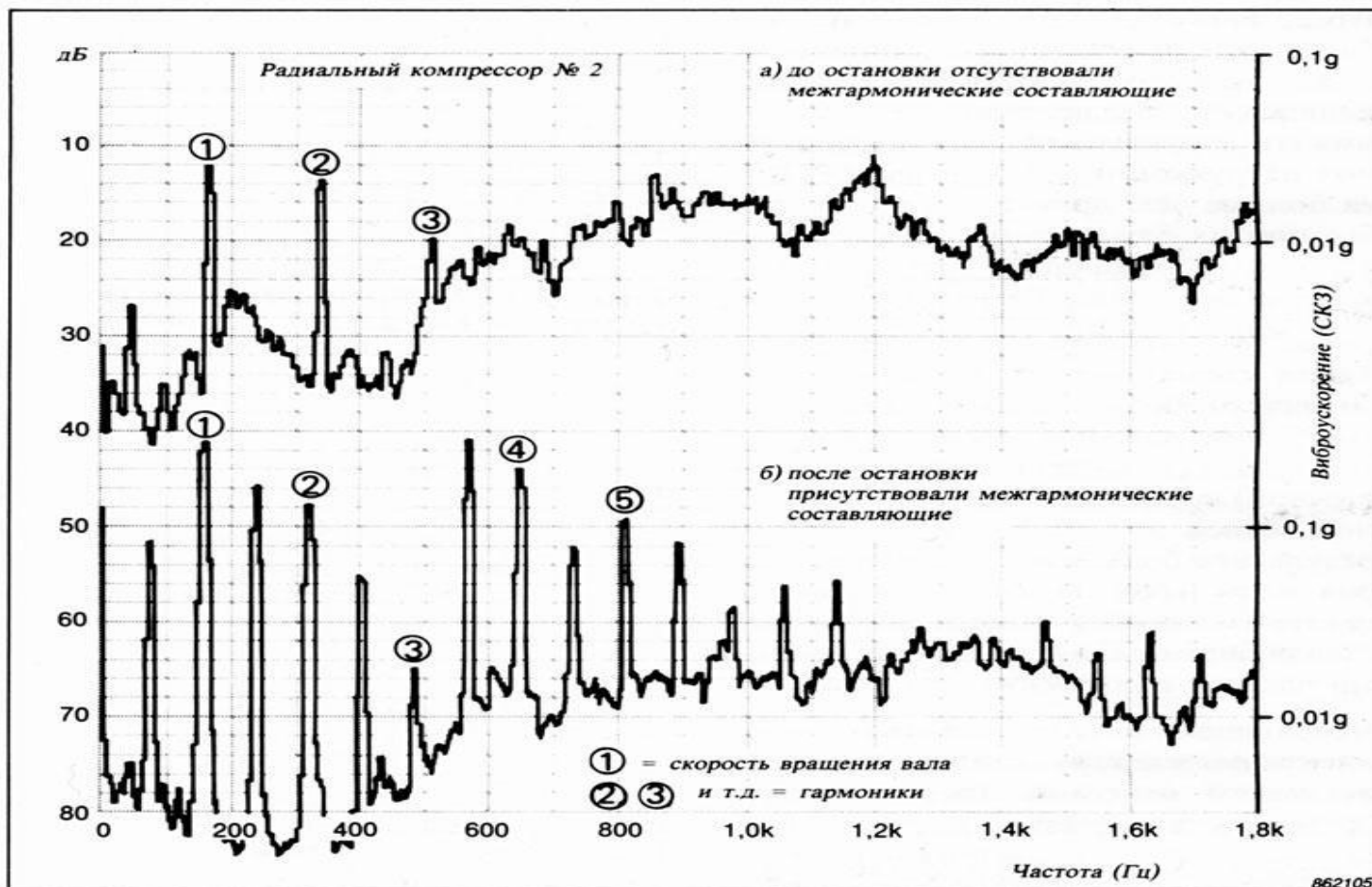


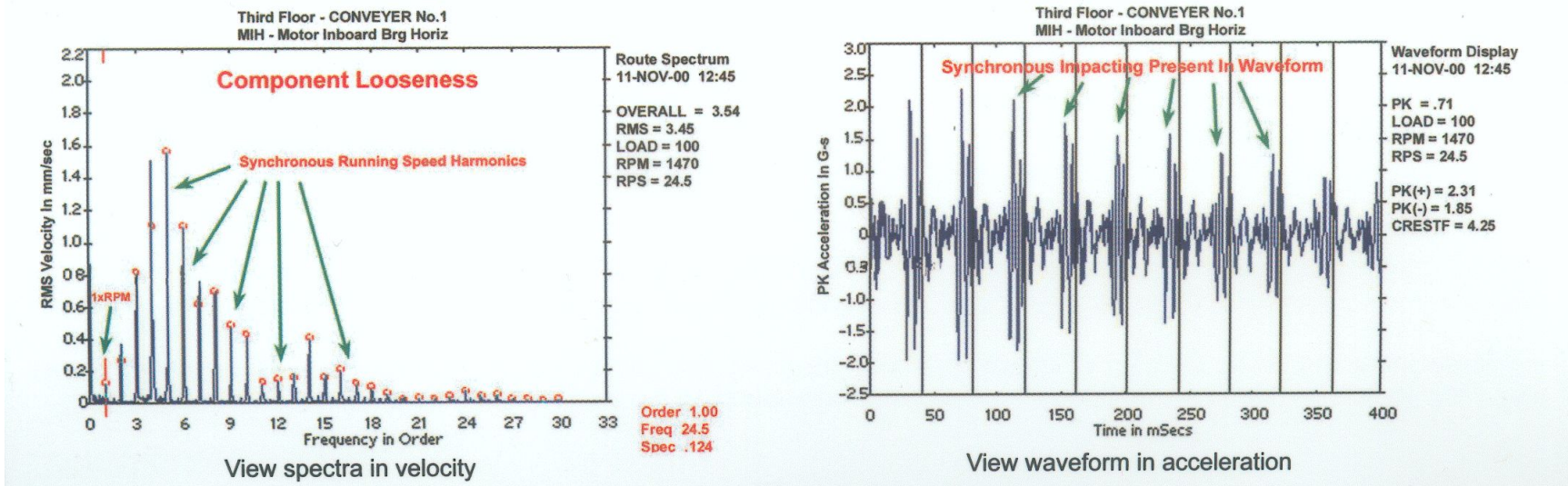
Рис. 2. Ослабление механических связей (разболтанность) проявляется в виде межгармоник скорости вращения, т.е.  $0,5 \times$ ,  $1,5 \times$ ,  $2,5 \times$  скорость вращения



# Ослабление соединений



## LOOSENESS (Structural & Component)



# Пример обнаружения ослаблений крепления шкива

## Привод пресса

P = 200 кВт

Двигатель: 1486 об/мин = 24,77 Гц

### Интенсивность

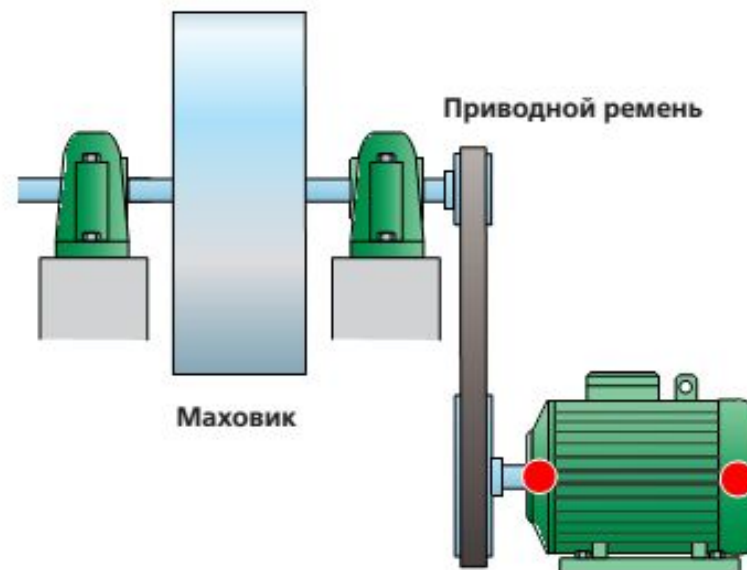
Прив. подш. двигателя

6,9 мм/с

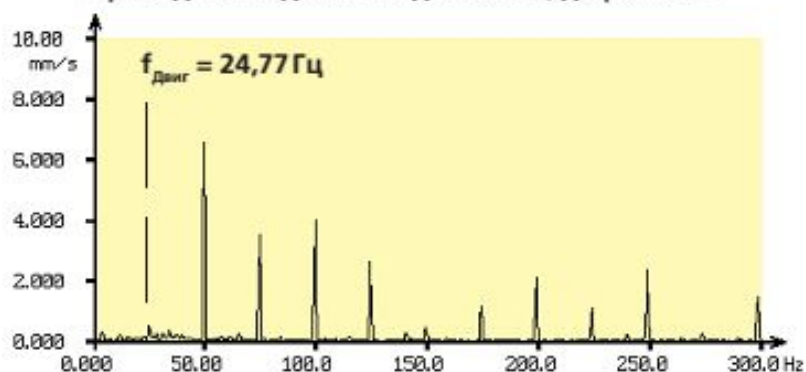
Неприв. подш. двигателя

7,1 мм/с

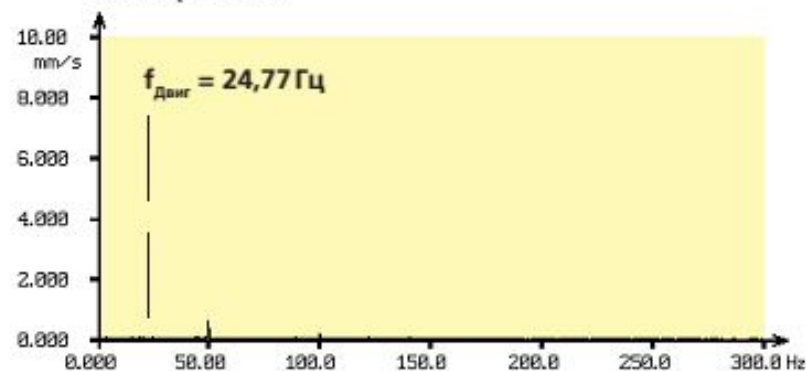
Причина: чрезмерный люфт в креплении шкива привода ремня на валу двигателя



Приводной подшипник двигателя, до ремонта



После ремонта



## Лопастные частоты



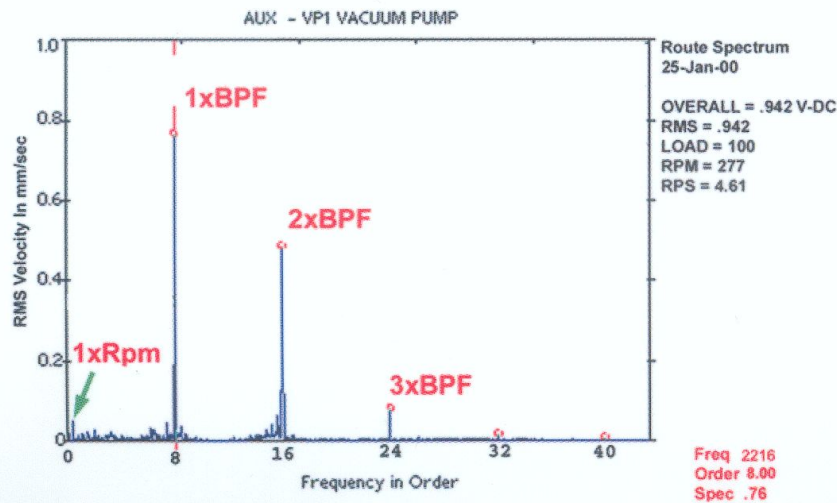
В центробежных насосах всегда отчетливо видна лопаточная составляющая, и она возрастает в случае появления дефектов лопастей, таких как деформации, трещины или поломки. На рисунке показан такой спектр, где PV- обозначает лопаточную частоту, т.е. частоту вращения, умноженную на число лопаток колеса насоса.

- Кавитация представляет собой сугубо случайный процесс, который в спектре вибрации проявляется не в виде дискретных частотных составляющих, а в виде непрерывного шума. Колебания шестеренчатых насосов часто содержат значительные составляющие зубцовой частоты, уровень которых сильно зависит от нагрузки.

# Лопаточные частоты



## BLADE / VANE PASS



Blade Pass Frequency ( BPF )

$BPF = \text{No. of Blades (Vaness)} \times \text{RPM}$



Example:

8 Blades x 277rpm  
= 2216 CPM (8 Blades)

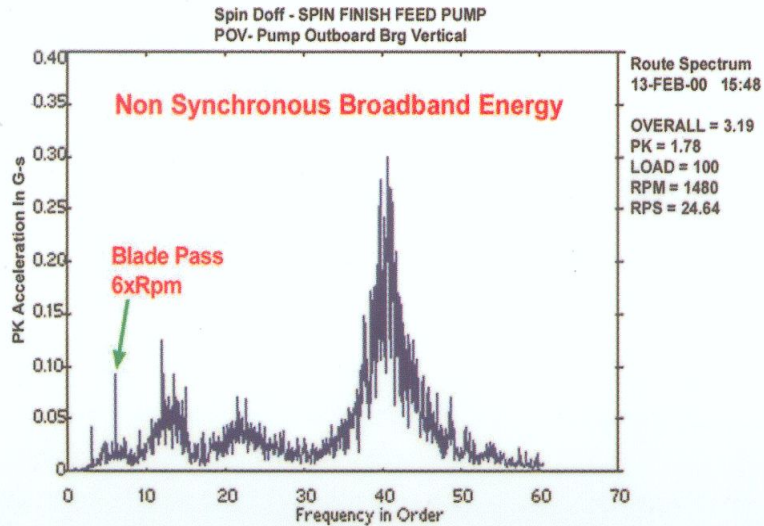
# Кавитация и рециркуляция

CSI 2140

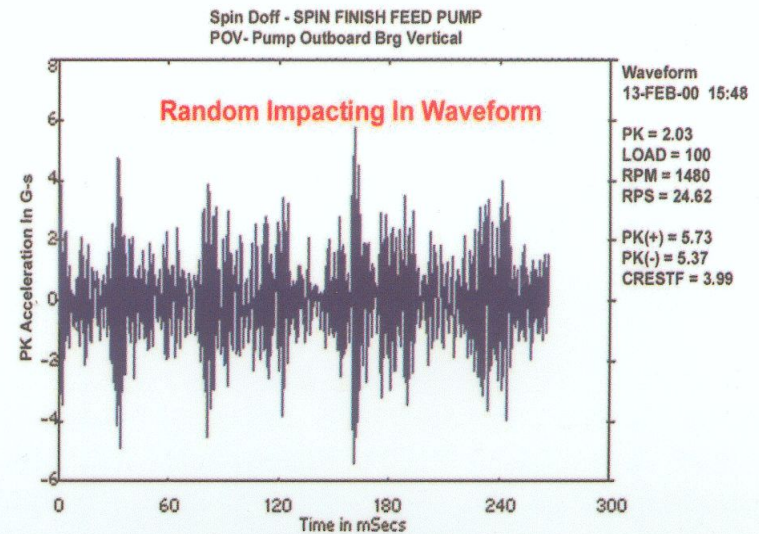


BALTECH

## CAVITATION / RECIRCULATION



View spectra in acceleration & velocity

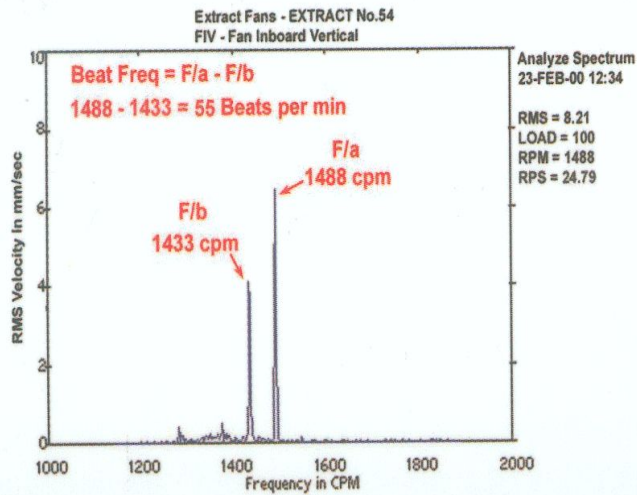


View waveform in acceleration

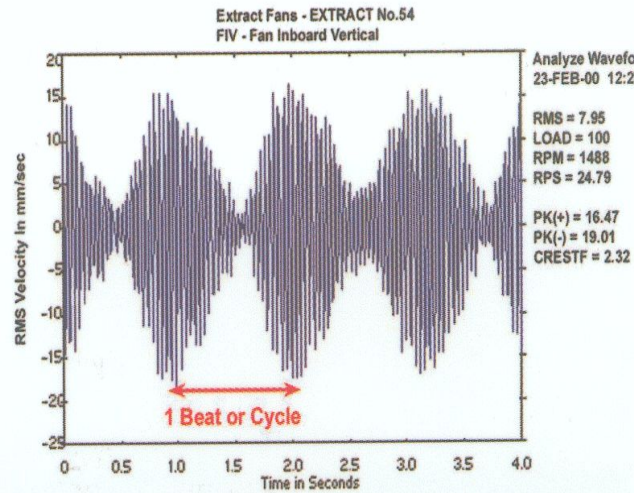
# Биения



## BEAT VIBRATION

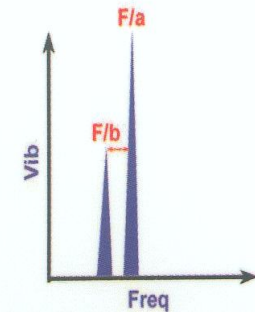


View spectra in velocity



View waveform in velocity

**BEAT FREQ =  $F/a - F/b$**



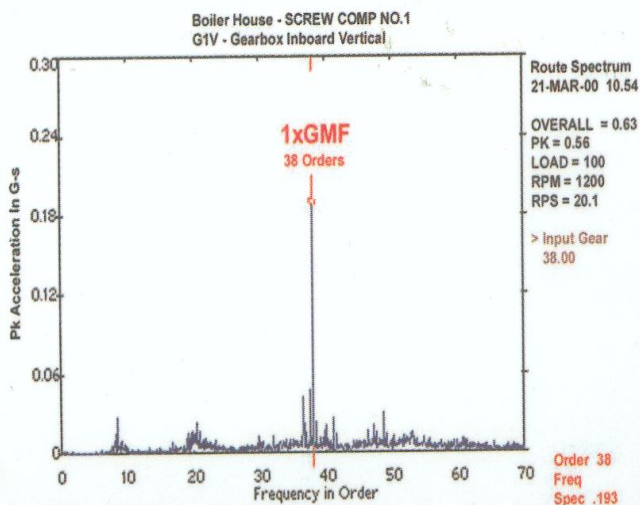
# Зубчатая передача нормальное состояние

CSI 2140

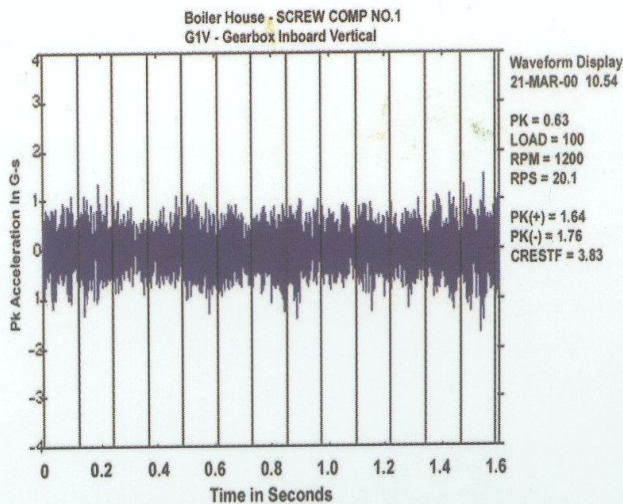


BALTECH

## NORMAL GEAR MESH



View spectra in acceleration & velocity



View waveform in acceleration



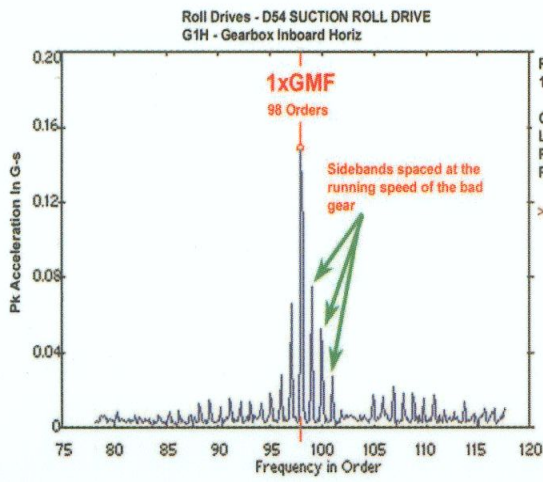
# Зубчатая передача равномерный износ

CSI 2140

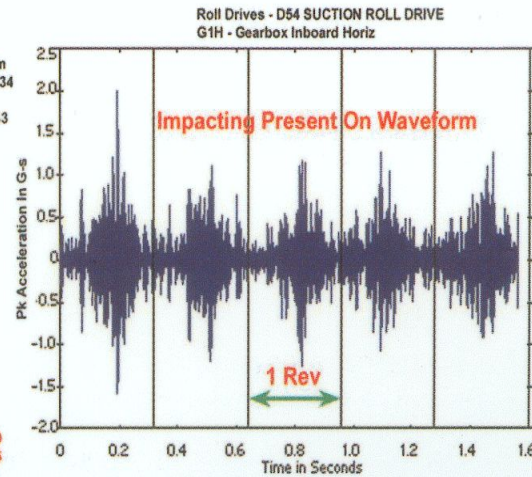


BALTECH  
RELIABILITY TECHNOLOGIES

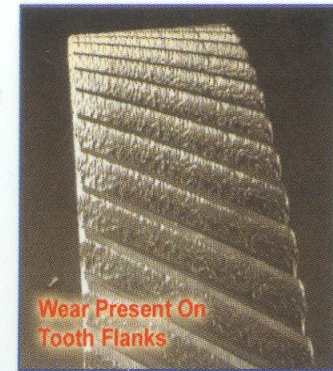
## WORN GEARS



View spectra in acceleration & velocity



View waveform in acceleration

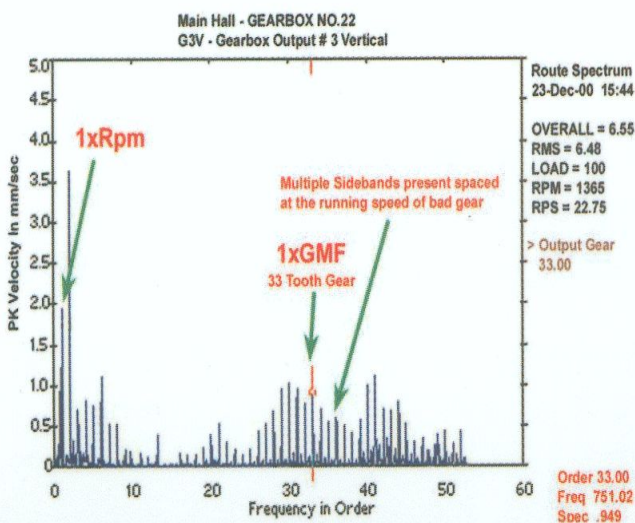




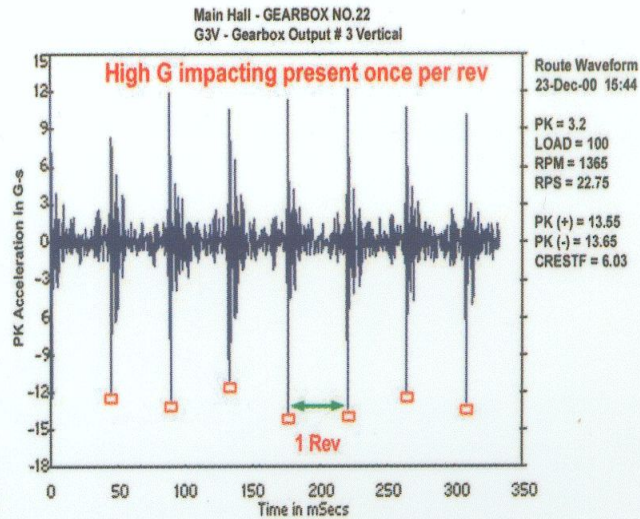
# Зубчатая передача дефект зубьев



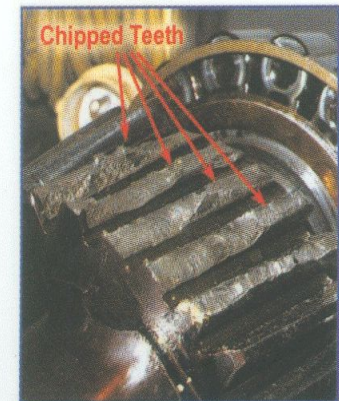
## CHIPPED / BROKEN GEAR TEETH



View spectra in acceleration & velocity



View waveform in acceleration



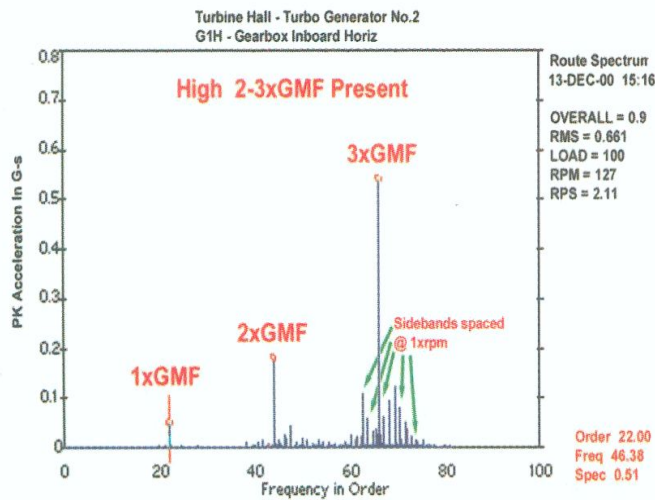
# Зубчатая передача несоосность

CSI 2140

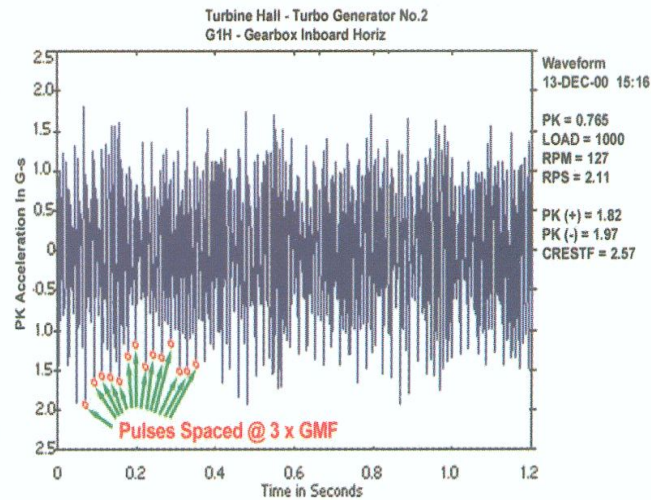


BALTECH  
RELIABILITY TECHNOLOGIES

## MISALIGNED GEARS



View spectra in acceleration & velocity



View waveform in acceleration

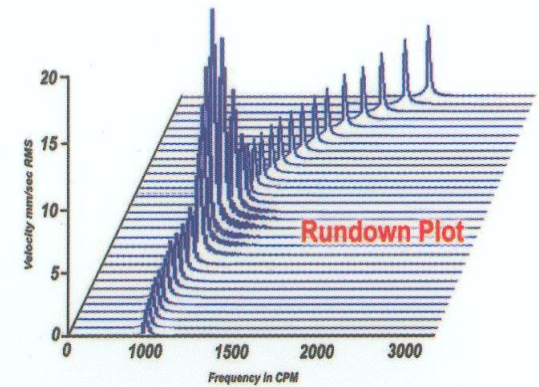
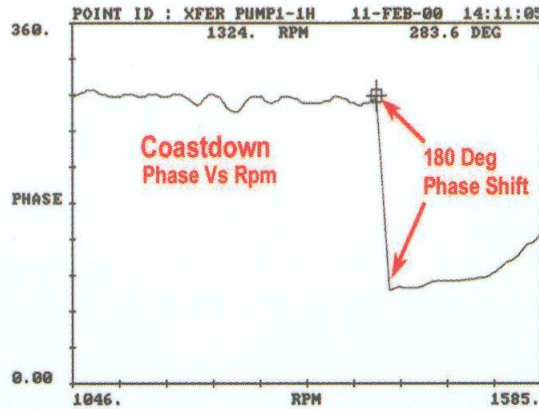
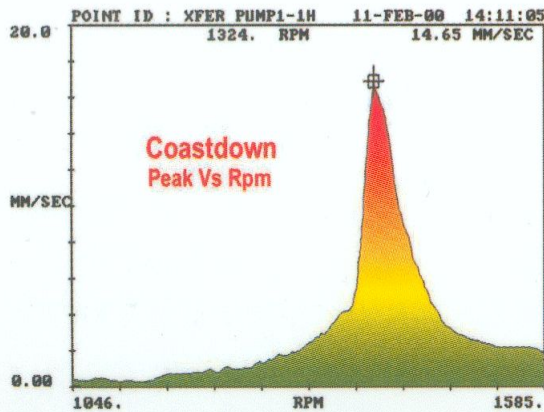


Gears mesh at an angle

# Резонанс

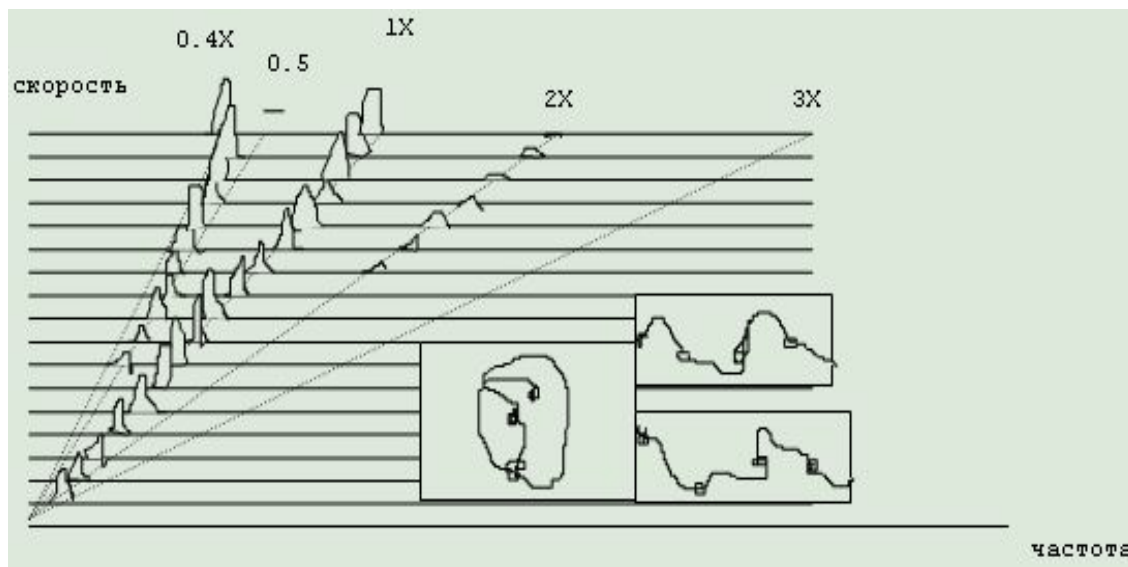


## RESONANCE



Generally capture spectra in velocity

## Каскад спектров



Каскад спектров на разгоне мотор-компрессора с подшипниками скольжения. Присутствует масляный вихрь на частоте  $0.4X$ . Масляные вихри в слое смазки сопровождаются появлением составляющей, лежащей несколько ниже половины частоты вращения и несинхронной с ней. Обычно она присутствует в слабонагруженных подшипниках скольжения с увеличенным зазором.

Другой режим неустойчивости смазки возникает, когда вследствие завихрений возбуждается собственная (критическая) частота механических колебаний. Это очень опасный, разрушительный тип вибрации, который наблюдается во время разгона машины. Он всегда в той или иной степени присутствует в спектре, даже когда частота вращения много выше собственной частоты.

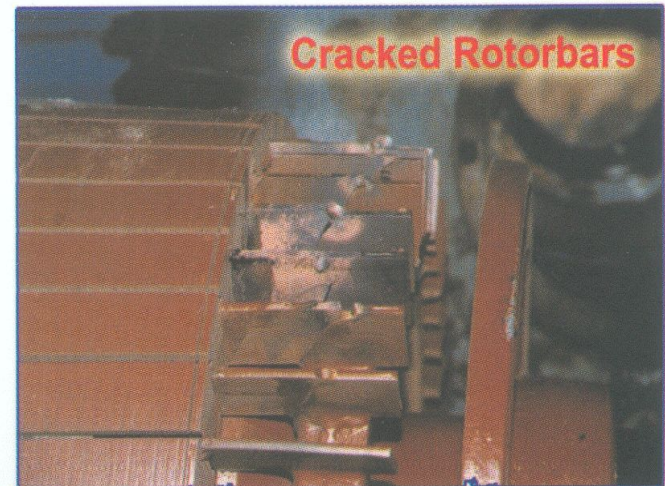
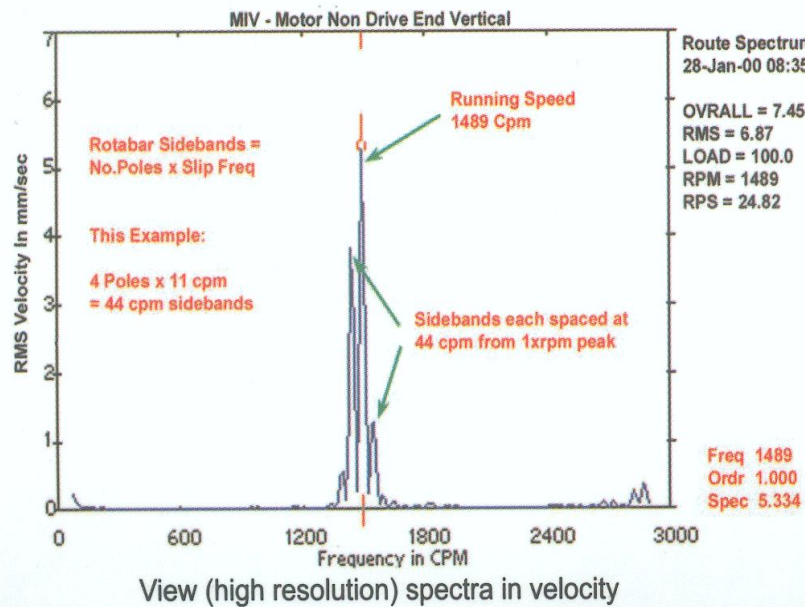
# Электрические дефекты

CSI 2140

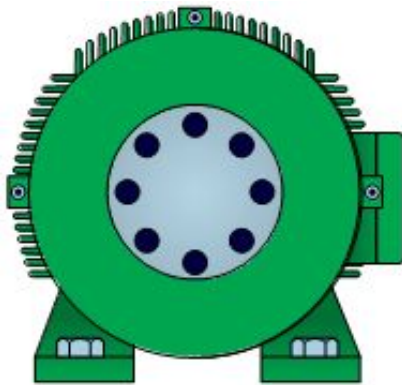


BALTECH  
RELIABILITY TECHNOLOGIES

## ELECTRICAL FAULTS

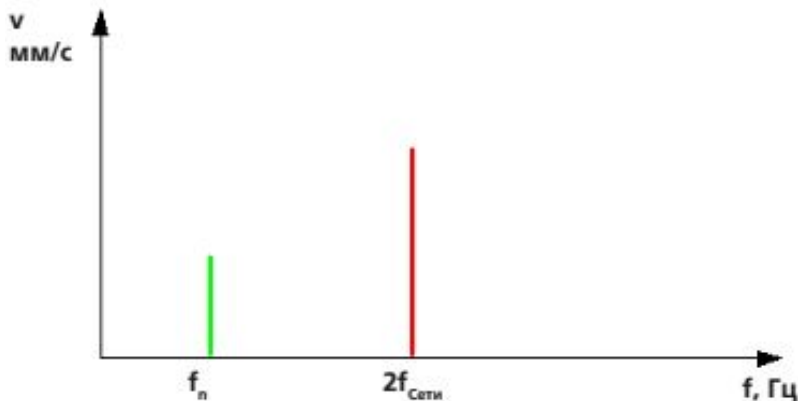


# Диагностика электрических машин



## Несимметричность поля статора:

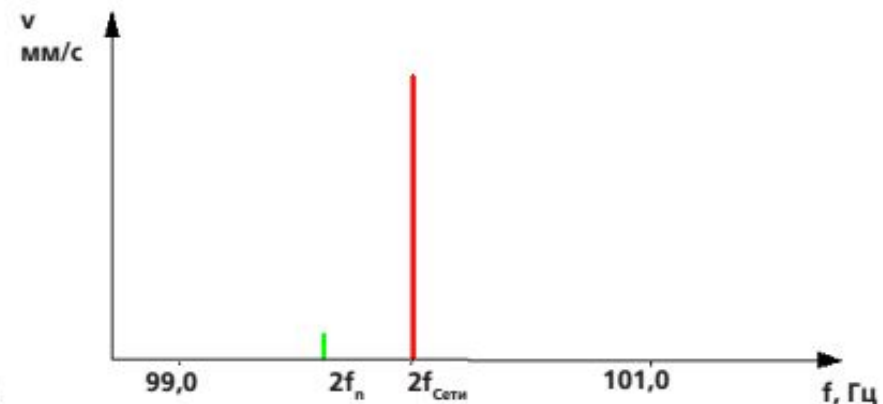
- Выгорание сердечника, короткое замыкание
- Эксцентриситет положения ротора
- Несимметричность электропитания
- Несимметричность обмотки



Присутствует удвоенная частота сети  $2f_{\text{Сети}}$

Частота сети  $f_{\text{Сети}}$  равна 50 или 60 Гц

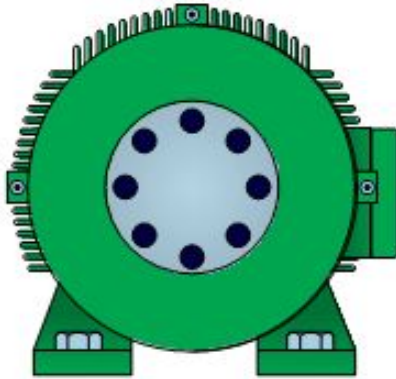
Исключение: приводы выпрямителей



Отсутствуют боковые полосы частот вокруг  $2f_{\text{Сети}}$

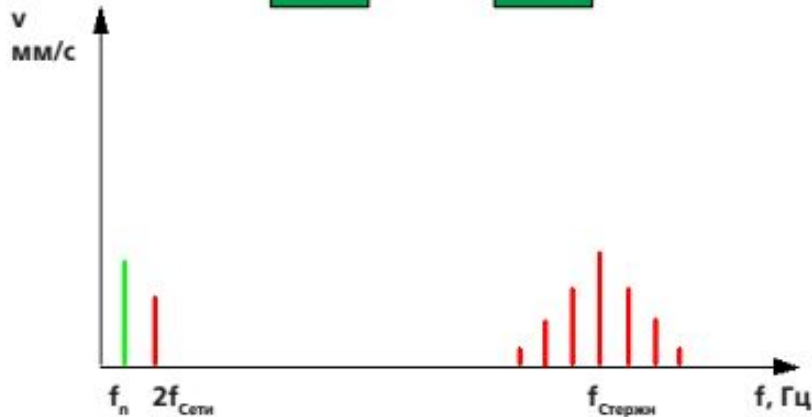
Для двухполюсных агрегатов удвоенная частота вращения находится чуть ниже значения  $2f_{\text{Сети}}$

# Диагностика электрических машин



## Причины нарушения поля ротора:

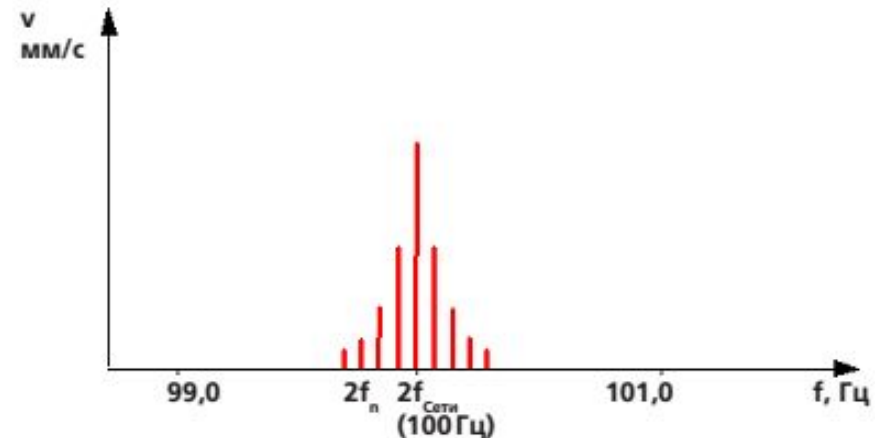
- Поломка стержней
- Разрушение стержней
- Ослабление стержней



Частота прохождения стержней  $f_{\text{Стержн}}$  с боковыми полосами на удвоенной частоте сети

Частота прохождения стержней  $f_{\text{Стержн}} = f_n \times n_{\text{Стержн}}$   
 где  $f_n$  – частота вращения  
 $n_{\text{Стержн}}$  – количество стержней ротора

Частота сети  $f_{\text{Сети}}$  равна 50 или 60 Гц



Присутствуют боковые полосы в районе  $2f_{\text{Сети}}$  с интервалом, равным  $f_{\text{скольж}}$ , при частоте скольжения  $f_{\text{скольж}} = 2f_{\text{Сети}} / p - f_n$ , где  $p$  – количество полюсов статора

# Пример обнаружения дефекта электрической машины

Вытяжное воздуходувное устройство для сталелитейного производства

$P = 250 \text{ кВт}$

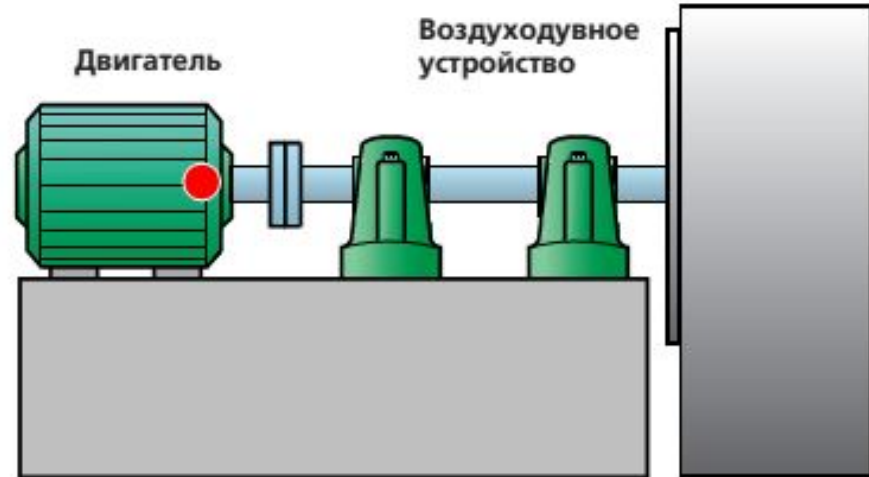
$n = 2999 \text{ об/мин}$  ( $f_n = 50 \text{ Гц}$ )

Интенсивность

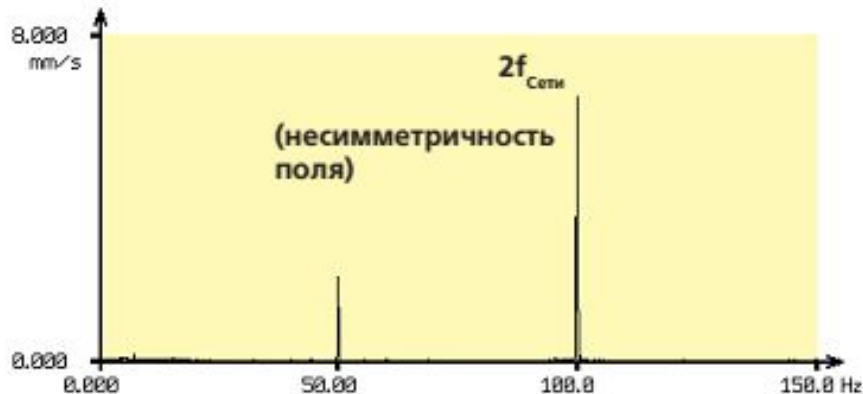
Прив. подш. двигателя, RH

4,8 мм/с

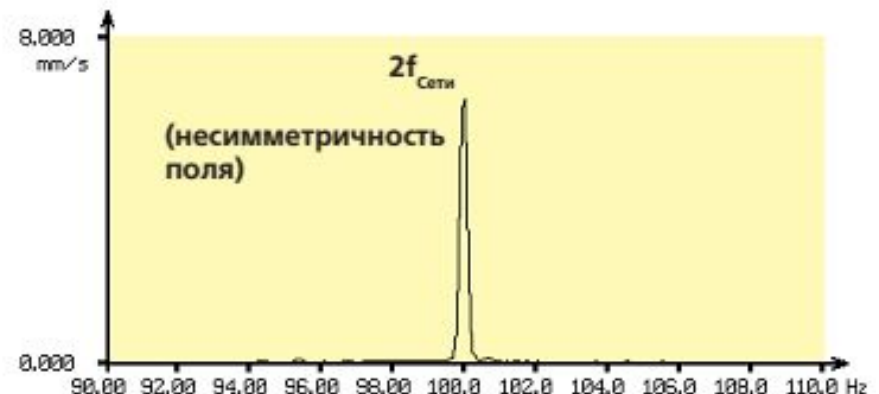
Причина: Выгорание сердечника статора



Двигатель, приводной подшипник, радиальное горизонтальное направление



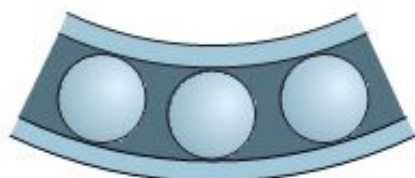
Вид в приближении, пик на 100 Гц





# Пример диагностики подшипника качения

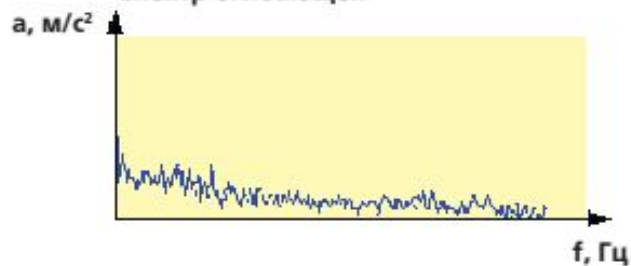
Отсутствие повреждений



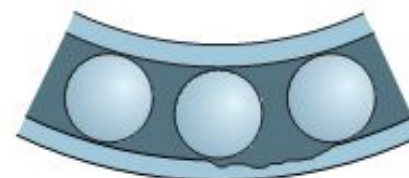
Временной сигнал



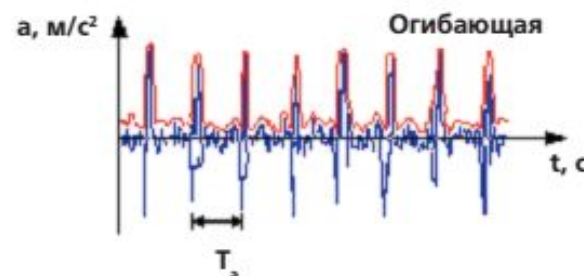
Спектр огибающей



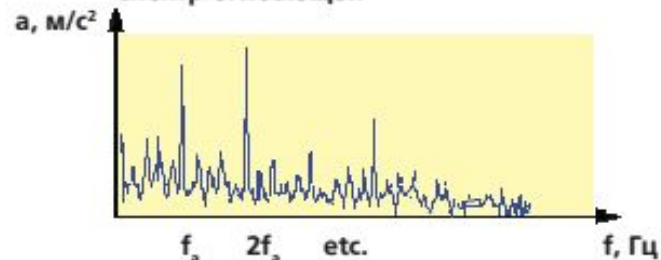
Наличие повреждений



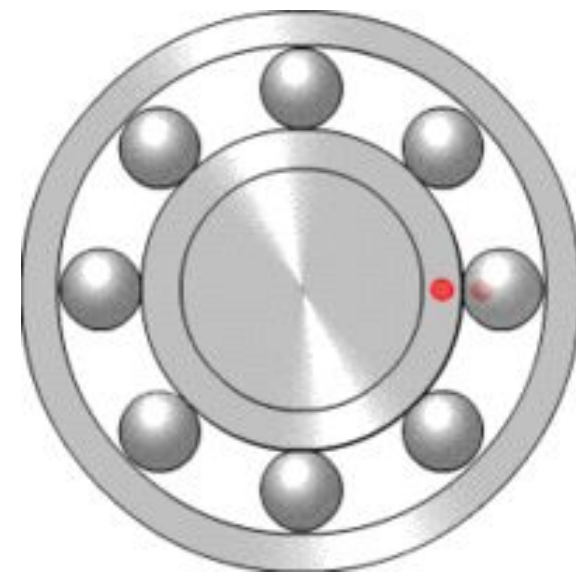
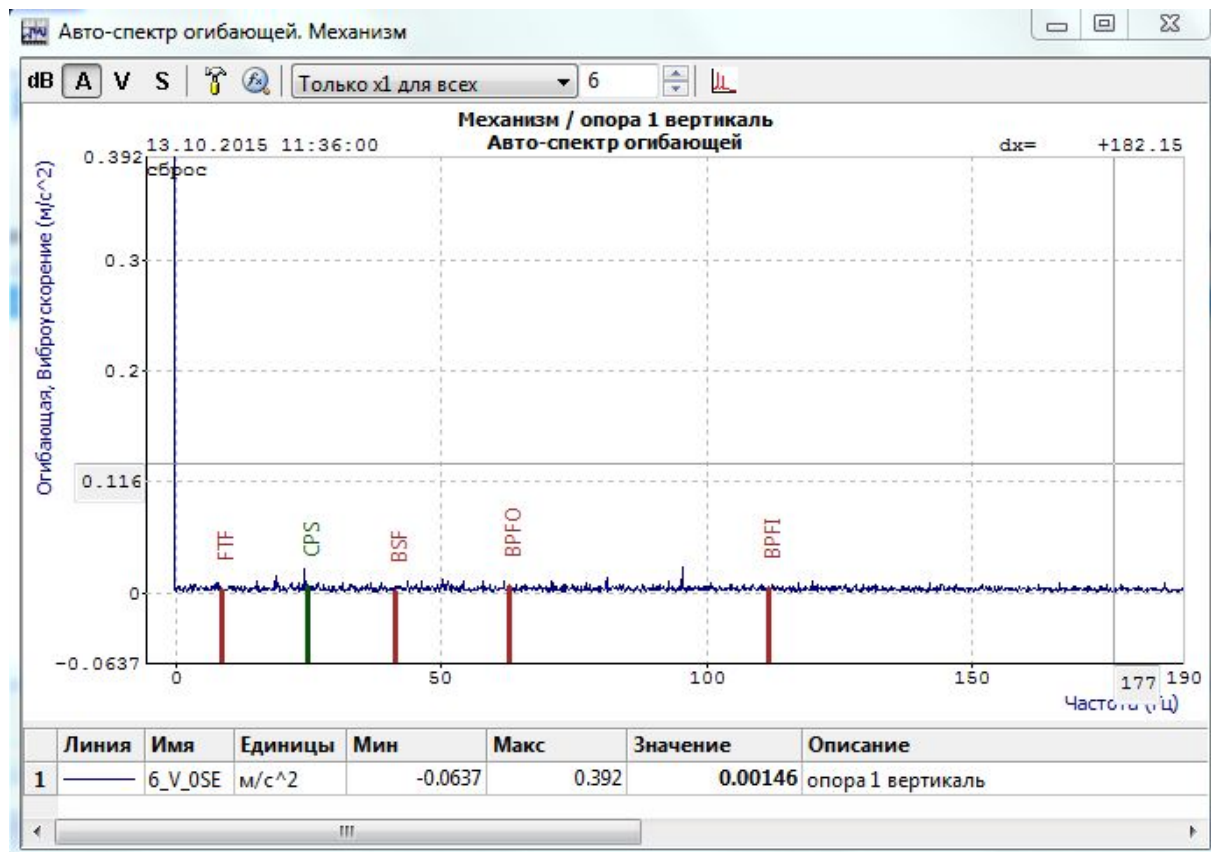
Временной сигнал



Спектр огибающей



Частота повреждения  $f_2 = 1/T_2$



**FTF:** Fundamental Train Freq. - Сепараторная частота

**CPS:** Cycles Per Second – Циклов в секунду, Частота в Гц

**BSF:** Ball Spin Freq. – Частота тел качения

**BPFI:** Ball Pass Frequency Inner (Inner ring) – Частота внутреннего кольца

**BPFO:** Ball Pass Frequency Outer (Outer ring) – Частота наружного кольца

# Расчет характерных частот подшипника качения

## FREQUENCIES

### Bearing Frequencies

$$FTF = \left(\frac{\Omega}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{B}{P}\right) \cos CA\right]$$

$$BPFI = \left(\frac{N}{2}\right) \Omega \left[1 + \left(\frac{B}{P}\right) \cos CA\right]$$

$$BPFO = \frac{N}{2} \Omega \left[1 - \left(\frac{B}{P}\right) \cos CA\right]$$

$$BSF = \left(\frac{P}{2B}\right) \Omega \left[1 - \left(\frac{B}{P}\right)^2 \cos^2 CA\right]$$

FTF = fundamental train frequency  
 BPFI = ball pass frequency, inner race  
 BPFO = ball pass frequency, outer race  
 BSF = ball spin frequency  
 RPM = shaft speed

### General Guideline Bearing Frequencies (for use in FMax selection ONLY)

BPFO = 0.41 x RPM x N  
 BPFI = 0.59 x RPM x N  
 FTF = 0.41 x RPM  
 BSF = 0.22 x RPM x N

CA = contact angle  
 $\Omega$  = machine speed  
 N = number of rolling elements  
 P = pitch diameter  
 B = ball or roller diameter

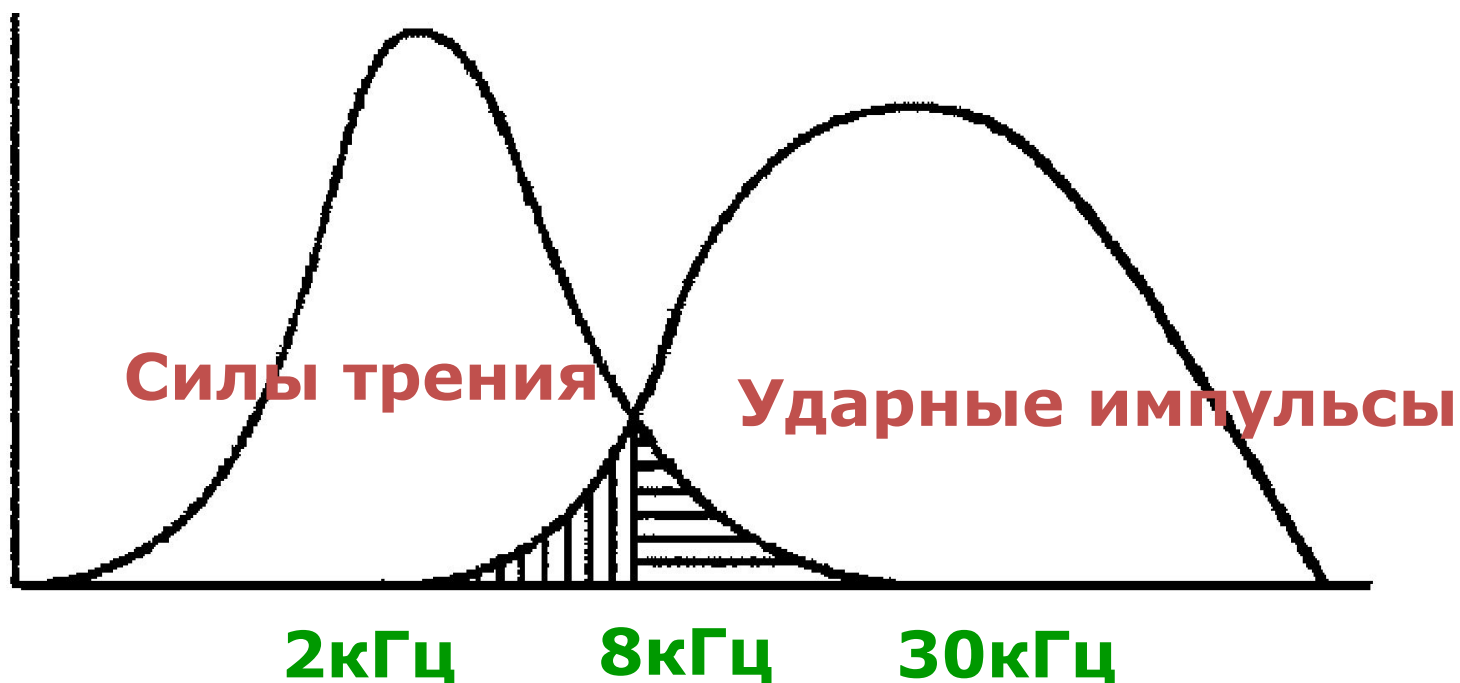
## Методы диагностики подшипников качения

- 1. По низкочастотной вибрации машины в целом.**  
(обнаружение плавных неровностей поверхностей качения, разрушения сепаратора)
- 2. По среднечастотной вибрации подшипниковых узлов.**  
(обнаружение перегрузок при монтаже, развитых раковин поверхностей качения при эксплуатации)
- 3. По высокочастотной вибрации подшипниковых узлов.**  
(обнаружение зарождающихся дефектов поверхностей трения качения и скольжения по силам трения).
- 4. По ультразвуковой вибрации неподвижных элементов подшипника.**  
(обнаружение дефектов смазки и зарождающихся дефектов поверхности качения неподвижного кольца)
- 5. По сверх ультразвуковой вибрации неподвижных элементов подшипника**  
(обнаружение дефектов смазки и старения металла неподвижного кольца)

## Диагностика подшипников по силам трения

### Метод огибающей высокочастотной вибрации

Метод рассчитан на совместный анализ как сил трения, так и ударных импульсов в подшипниках качения

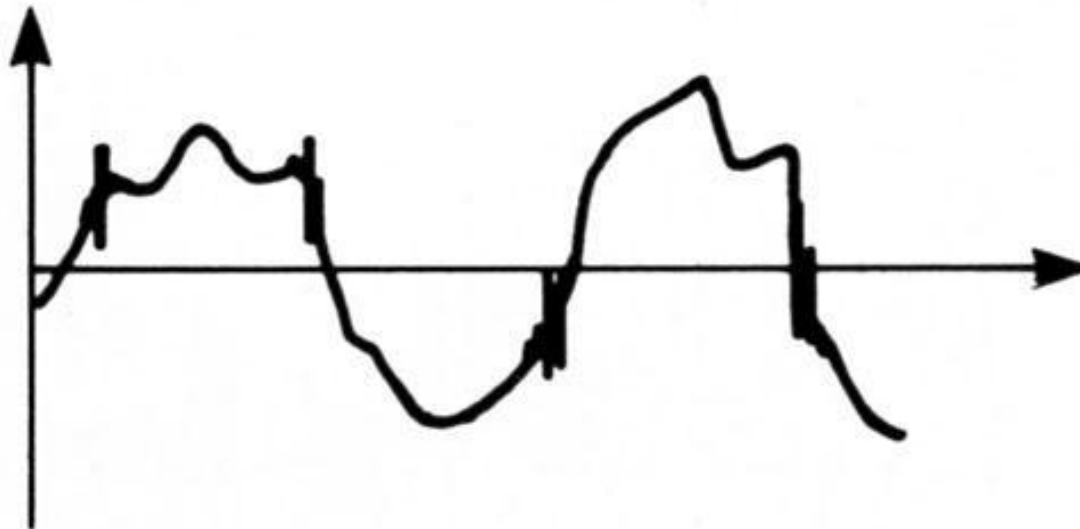


## Преимущества высокой частоты

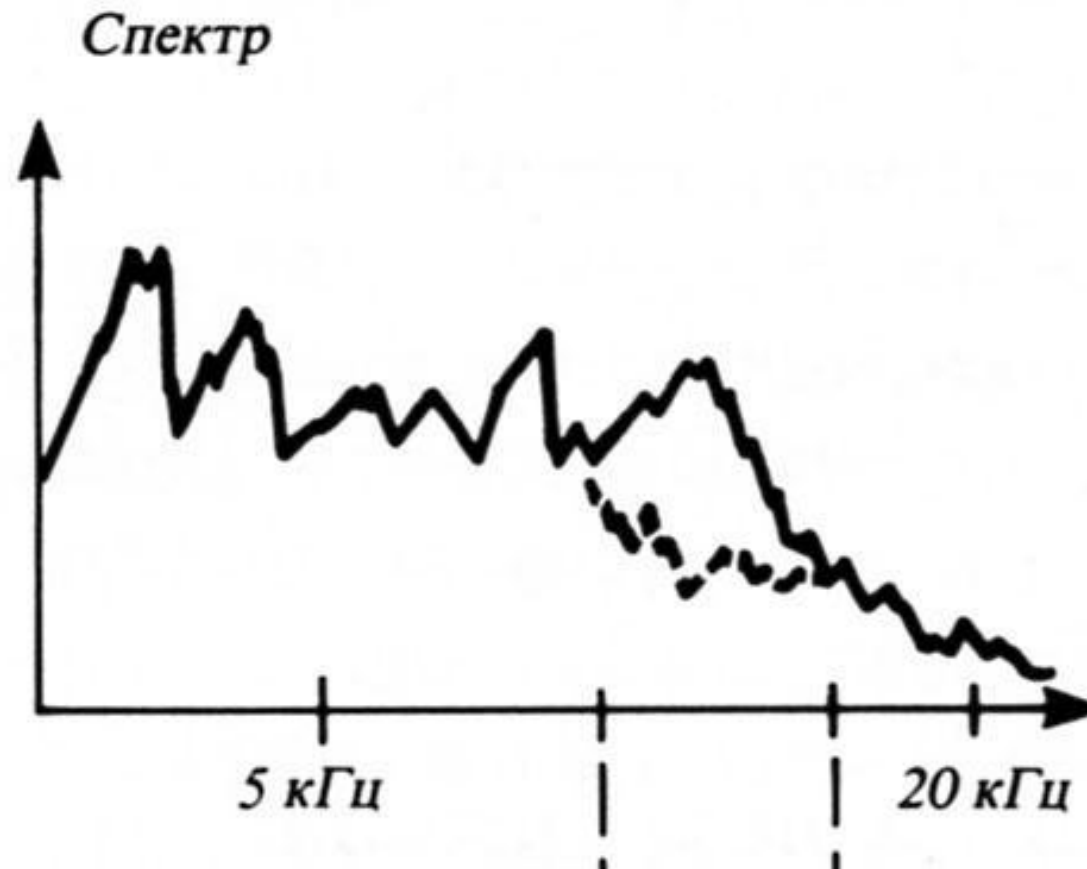
1. Измеряем локальную вибрацию, отстраиваемся от помех от других узлов и машин
2. Высокочастотная вибрация рассматривается, как несущая, что позволяет надежно измерять очень низкочастотные явления и частоты, которые нет возможности измерить традиционными методами
3. Проводятся относительные измерения, что позволяет по одному измерению судить о величине дефекта, даже без сравнения с историей или однотипными машинами.

## Метод огибающей ВЧ вибрации: исходный сигнал

*Исходный сигнал  
(без фильтрации)*

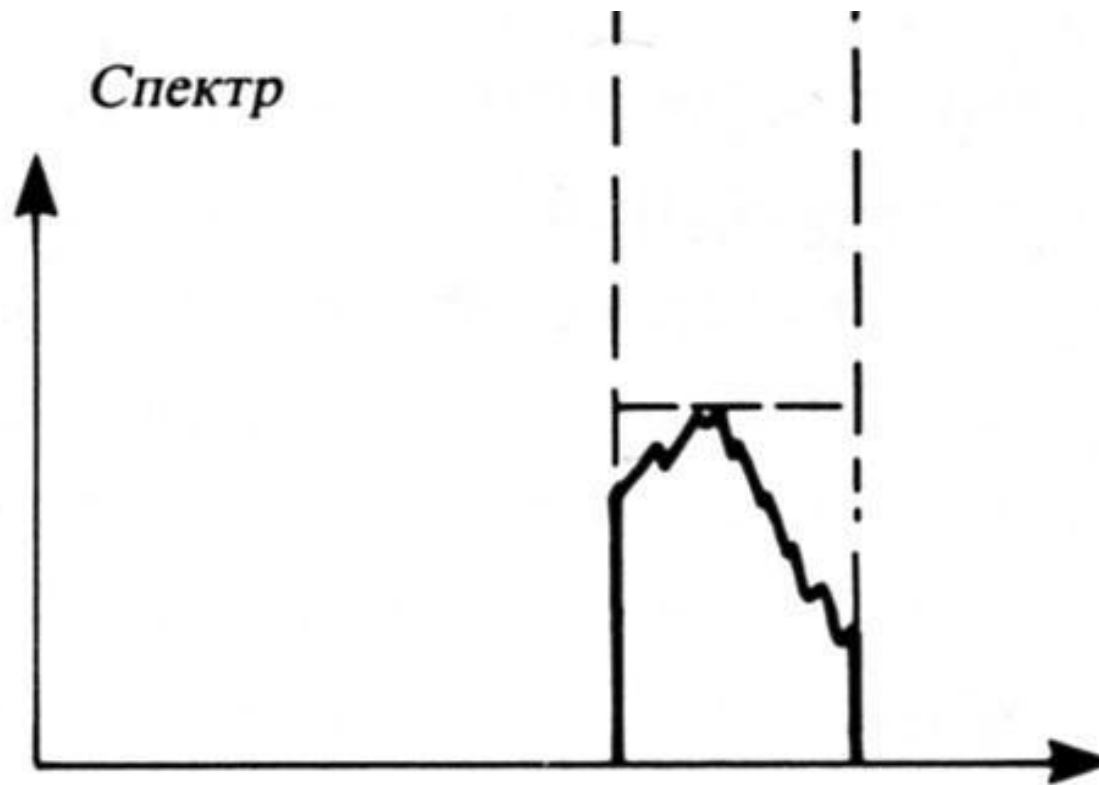


## Метод огибающей: исходный спектр





## Метод огибающей: область фильтрации



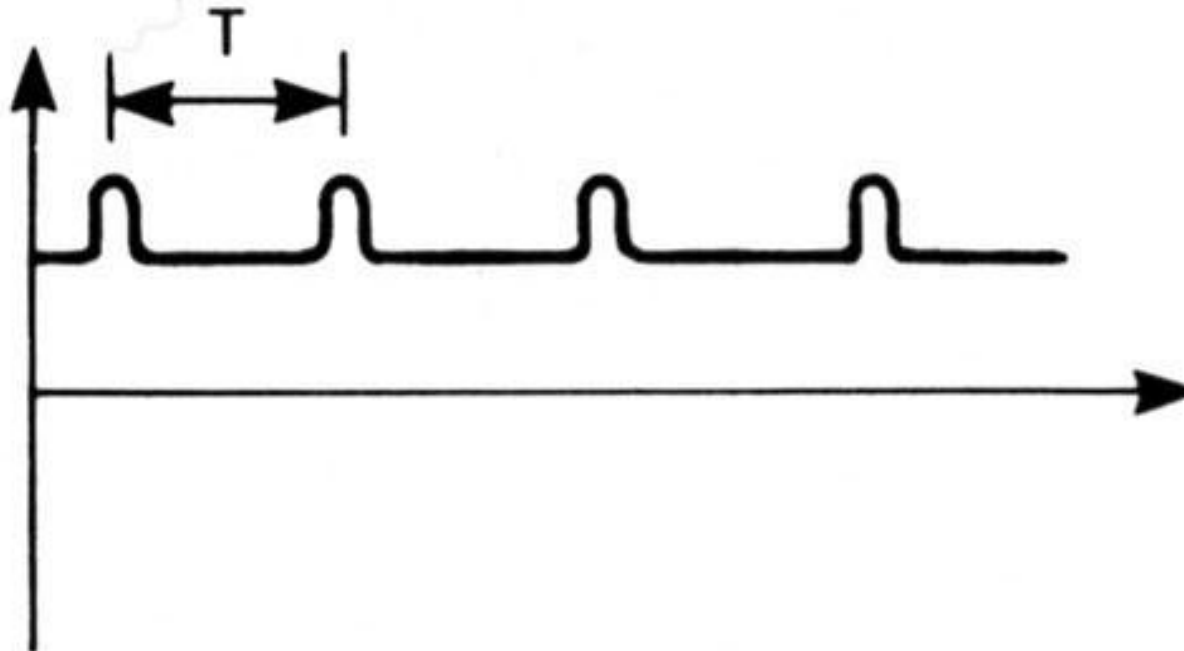
## Метод огибающей: профильтрованный сигнал

*Профильтрованный  
сигнал*

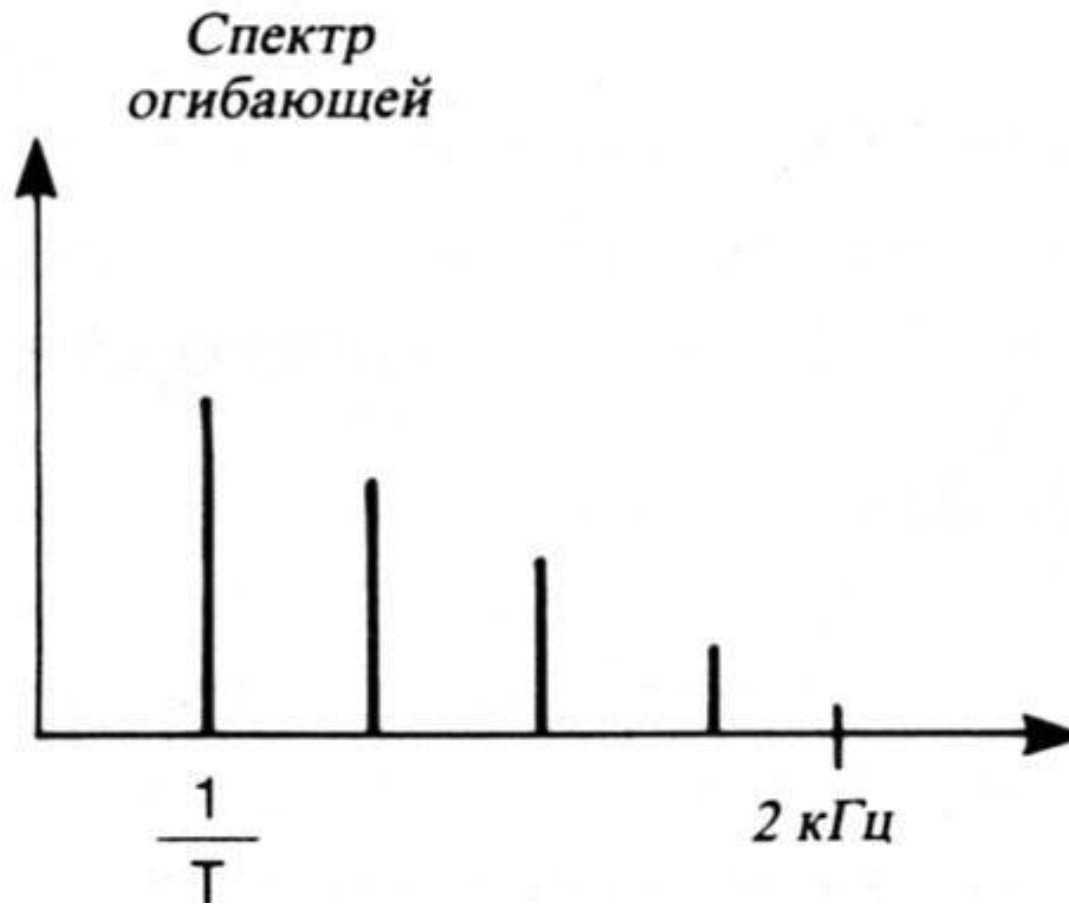


## Метод огибающей: выделение огибающей

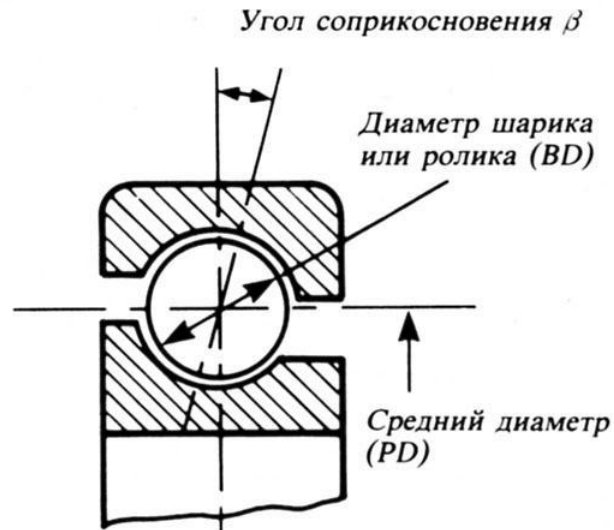
Огибающая



## Метод огибающей: спектр огибающей



# Метод огибающей: определение гармоник спектра огибающей



$n$  = число шариков или роликов  
 $f_r$  = относительная скорость вращения  
 внутренней и внешней обойм (об/с)

Частоты повторения импульсов в Гц при предположении чистого качения

$$\text{Дефект на внешней обойме: } f(\text{Гц}) = \frac{n}{2} f_r \left( 1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$$

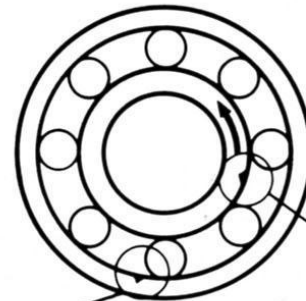
$$\text{Дефект на внутренней обойме: } f(\text{Гц}) = \frac{n}{2} f_r \left( 1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$$

$$\text{Дефект шарика или ролика : } f(\text{Гц}) = \frac{PD}{BD} f_r \left[ 1 - \left( \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right]$$

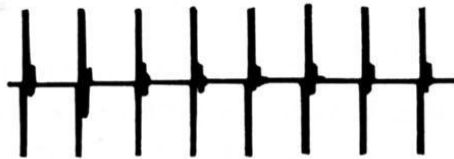
## Метод огибающей: модуляция огибающей

Изолированные дефекты на внутренней или внешней обойме подшипника обуславливают создание серии импульсов, частота повторения которых соответствует частоте прокатывания роликовых элементов

Внутренняя обойма при перемещении в и из зоны нагрузки создает амплитудную модуляцию

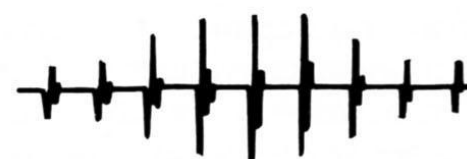


Высокочастотные механические колебания



Огибающая

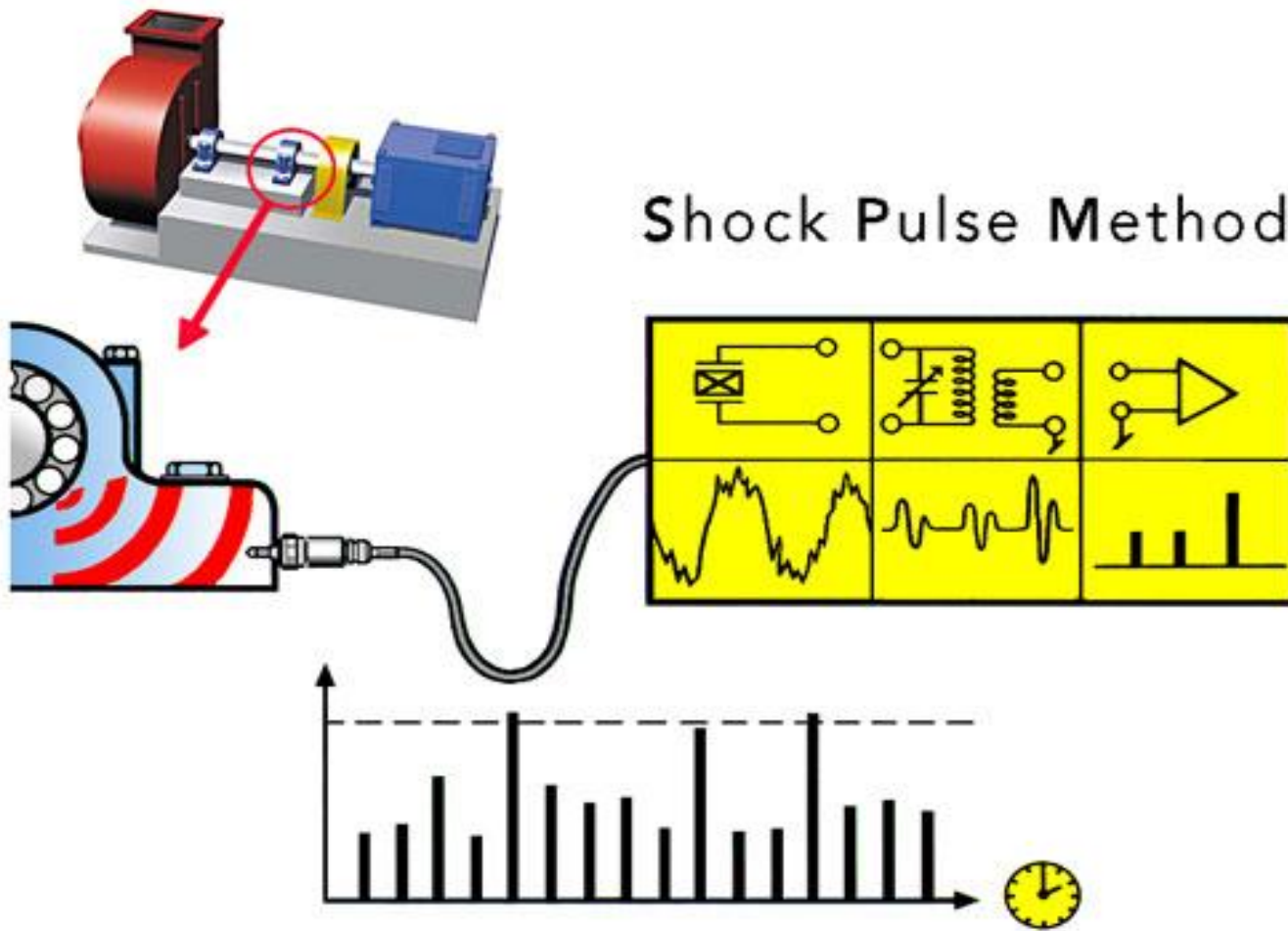
Высокочастотные механические колебания



Огибающая

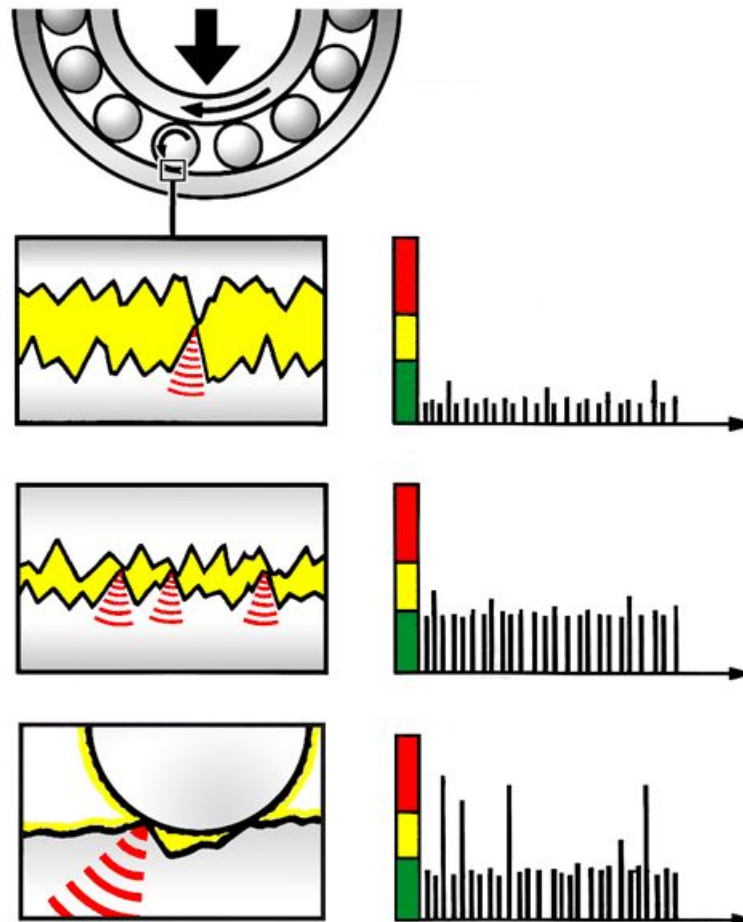
# Метод ударных импульсов SPM

## Физическая реализация



# Метод ударных импульсов SPM

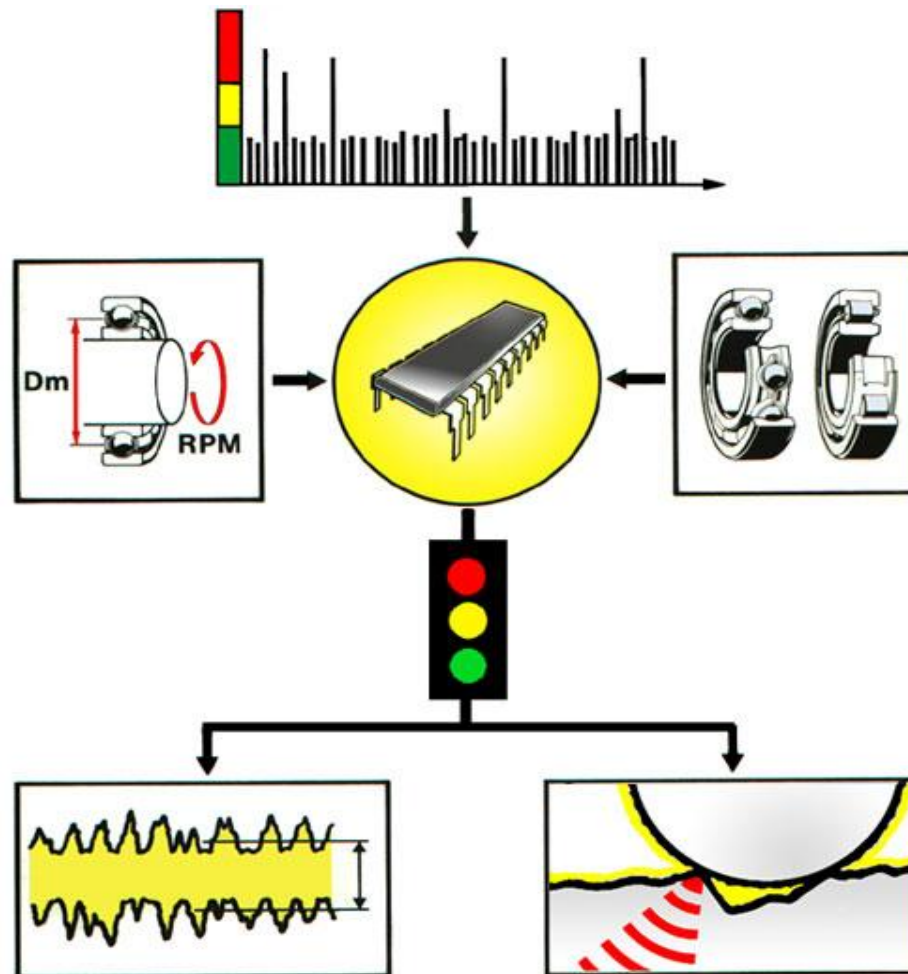
## Источники возникновения импульсов



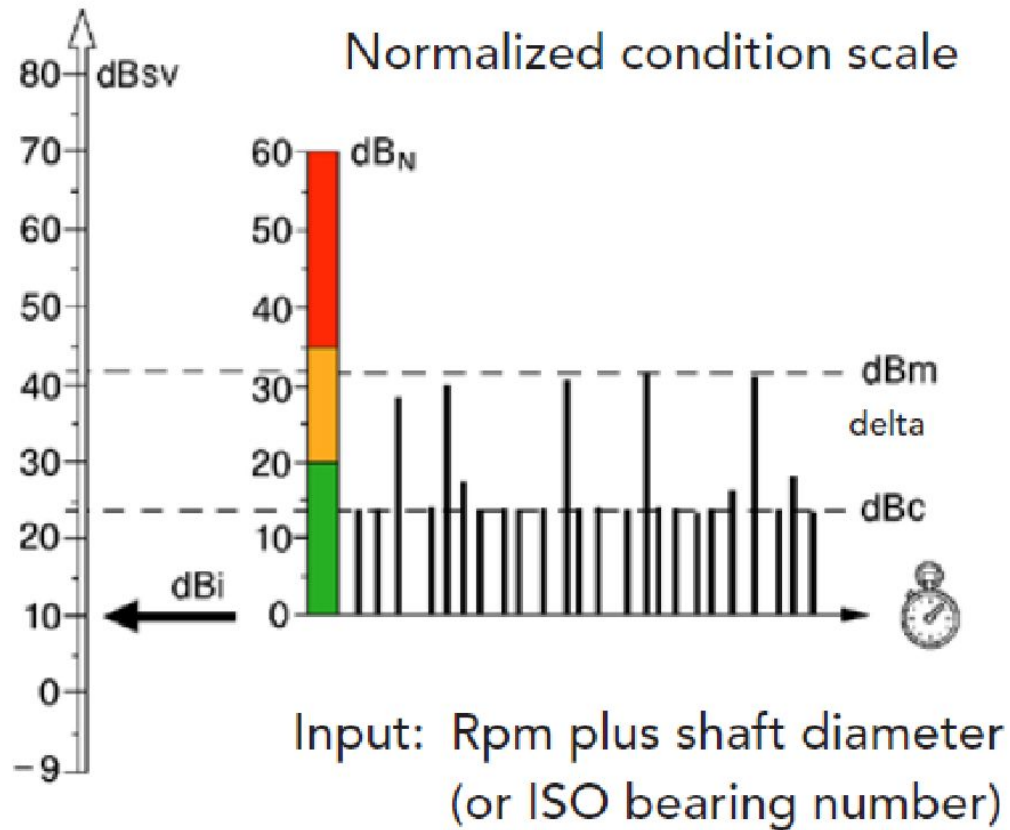


# Метод ударных импульсов SPM

## Реализация алгоритма



# Контролируемые величины при методе SPM



## Параметры вибрации – измерение и анализ

- Виброметры и виброметры-балансировщики серии VALTECH VP и «Протон-Баланс-II»
- Стационарные виброметры
- Тахометры
- Переносной вибродиагностический комплекс CSI 2140
- Стационарные системы виброконтроля «Протон-1000»

# ООО «Балтех»

Россия,  
Санкт-Петербург, 194044,  
ул. Чугунная, 40

Тел/Факс: (812) 335-00-85

E-mail: [info@baltech.ru](mailto:info@baltech.ru)  
Internet: [www.baltech.ru](http://www.baltech.ru)