

Национальный исследовательский  
Томский Политехнический Университет

# «Техническое обеспечение качества и надежности технологических систем»

ЛЕКЦИИ доц. к.т.н. Гаврилин А.Н.

- ЛЕКЦИЯ №2

The background of the slide features a large, semi-transparent image of interlocking gears. A white wireframe grid is overlaid on the gears, creating a technical or engineering aesthetic. The gears are rendered in shades of light green and blue, and the overall background is a gradient of blue.

# Примеры снижения качества и надежности технологических систем при повышенной вибрации



# АКТУАЛЬНОСТЬ

- **Актуальность тематики:**
- Снижение уровня вибраций и повышения виброустойчивости технологической системы (ТС, т.е. системы станок-приспособление-инструмент-деталь) при механообработке конструкционных материалов является актуальной для современного производства, особенно при высокоскоростном резании материалов склонных к упрочнению: титановых сплавов, нержавеющей и жаропрочных сталей и других труднообрабатываемых материалов.
- **Обзор и анализ существующих методов.**
- Проведен обзор существующих методов снижения уровня вибраций и повышения производительности и качества обработки по литературным источникам с 1953 по 2013 г.

# ПРИЧИНЫ ВИБРАЦИЙ В ТС

- Основные виды колебаний, встречающиеся в системе станок-инструмент-деталь, их причины
- 1. Колебания, передаваемые извне (от соседства кузнечного оборудования, зубонасечных или зубодолбежных станков, мощных двигателей и т. п.). В этих случаях частота возникающих при резании колебаний та же или в целое число раз больше частоты возбуждающих колебаний. С указанным явлением особенно часто приходится встречаться при установке станков на слабых перекрытиях, галереях и т. п.
- 2. Колебания, вызываемые дисбалансом быстровращающихся частей станка или обрабатываемой детали. В этих случаях центробежная сила меняет направление, что и вызывает колебания. Частота колебаний равна числу оборотов неуравновешенной детали в секунду.
- 3. Колебания, вызываемые дефектами передач станка. Неправильно нарезанные, плохо смонтированные или изношенные зубчатые колеса вызывают возникновение периодических сил, передающихся на подшипники, а, следовательно, на шпиндель и станину станка, что при некоторых условиях может быть причиной появления вибраций. Иногда такой же эффект вызывают грубая сшивка ремней, пульсация жидкости в трубопроводах станка и прочие дефекты передач.
- 4. Колебания, вызываемые переменным сечением среза или прерывистым характером процесса резания. Типичным примером указанных возбуждающих причин является: фрезерование, точение эксцентричных шеек у валов, обточка квадратных штанг на круглые, обработка прерывистых поверхностей и т. п.
- Для многих процессов механической обработки более или менее прерывистый характер резания является их характерной особенностью. Сюда относятся фрезерование, протягивание, долбление, работа шлифующего круга, неравномерно затупившегося по окружности, и др. Частота колебаний при этом равна или кратна частоте возмущающей силы. Обычно явление оказывается более сложным из-за взаимодействия этих вынужденных колебаний с так называемыми автоколебаниями.
- Возникновение колебаний объяснимо во всех рассмотренных случаях, это наличие периодической возмущающей силы. По этой же причине такие колебания носят общее название вынужденных колебаний.

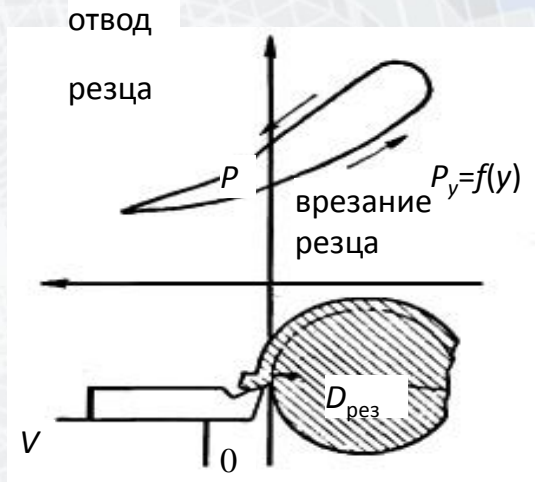


Рис.. Зависимость между  
величиной перемещения резца  $y$  и  $P_y$

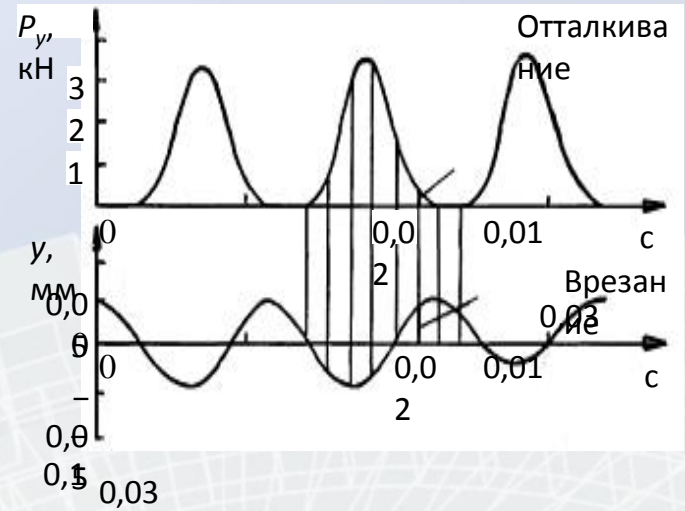
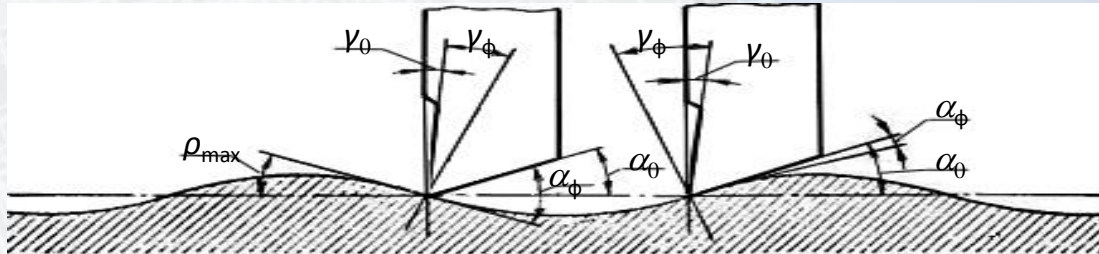
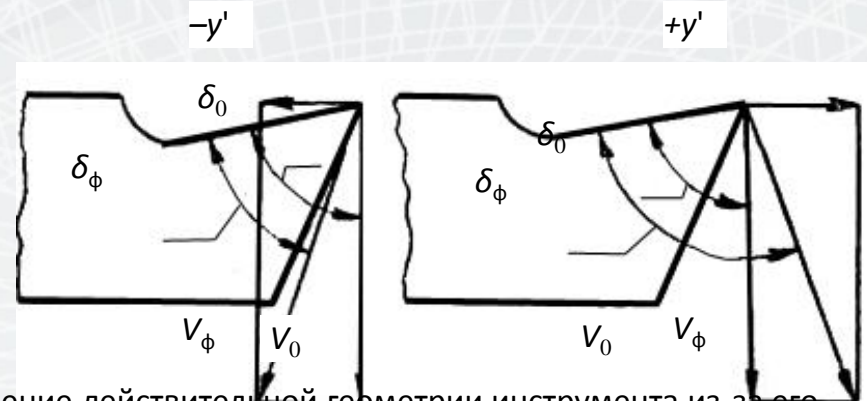


Рис. Временные диаграммы усилий и  
перемещения резца  $P_y$



. Изменение действительной геометрии инструмента из-за волнистости обрабатываемой поверхности при вибрациях:  $\gamma_0, \alpha_0$  – угол заточки;  $\alpha_\phi, \gamma_\phi$  – фактические углы при резании;  $\rho_{max}$  – угол наибольшей крутизны поверхностных волн;

$$\gamma_\phi = \gamma_0 \text{ Я } \rho; \alpha_\phi = \alpha_0 \text{ Я } \rho$$

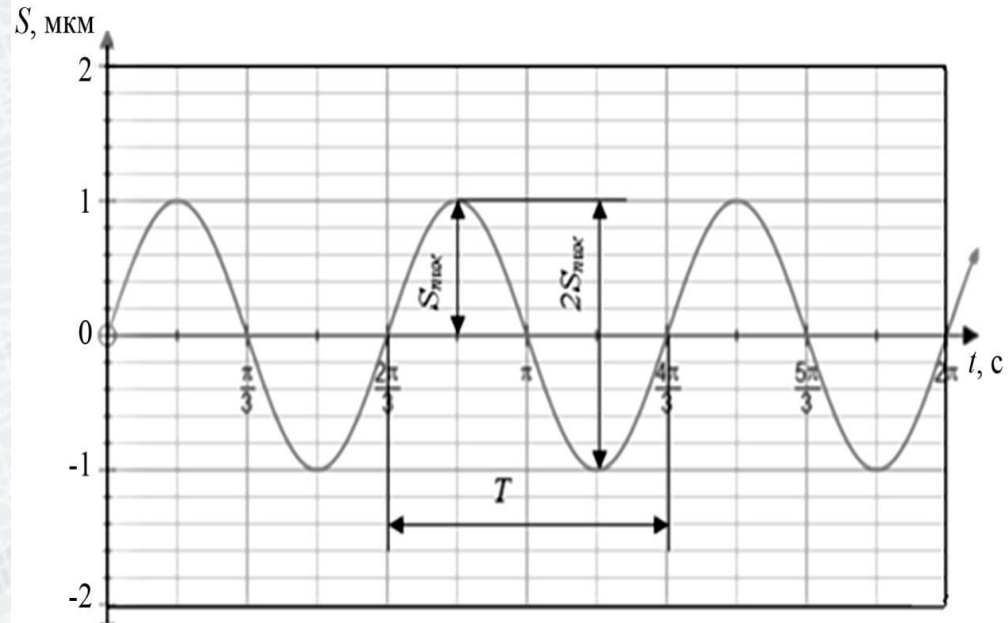


Изменение действительной геометрии инструмента из-за его радиальных колебаний при вибрациях: а –  $\delta_\phi < \delta_0$ ; б –  $\delta_\phi > \delta_0$ ;

$V_0$  – окружная скорость детали;  $V_\phi$  – действительная скорость резания;

$y'$  – скорость колебательного движения резца в радиальном направлении)

## Основные параметры колебаний



$$s = S_{\text{пик}} \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = S_{\text{пик}} \sin(2\pi f) = S_{\text{пик}} \sin(\omega t)$$

где  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота;

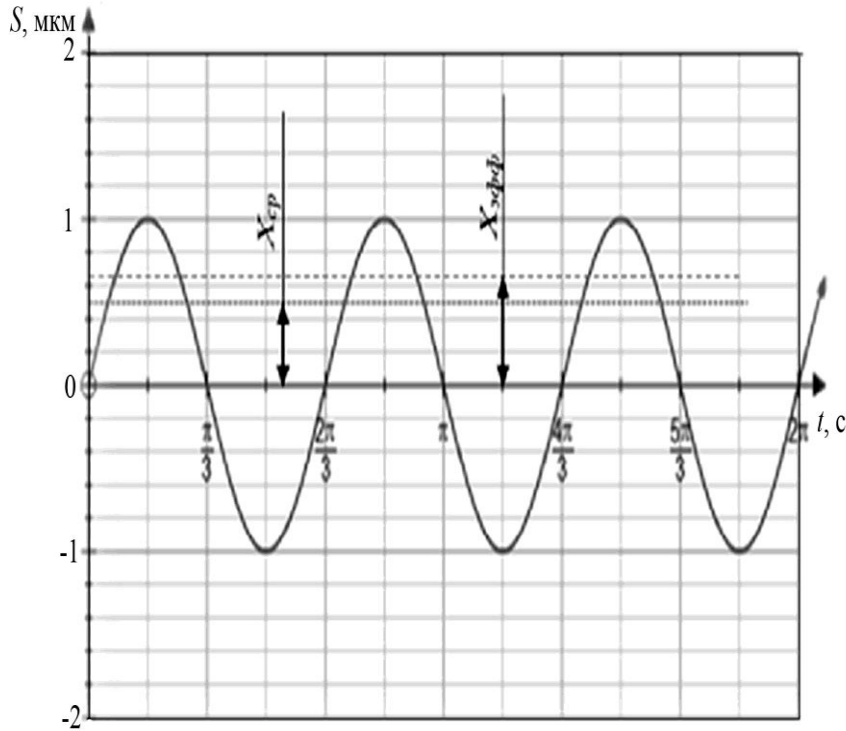
$S_{\text{пик}}$  — максимальное смещение точки (или тела) от исходного положения;

$t$  — время.

$$s = S_{\text{пик}} \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = S_{\text{пик}} \sin(2\pi f) = S_{\text{пик}} \sin(\omega t)$$



# СКЗ и ПИК их соотношения



- Другой величиной амплитуды колебаний является среднеквадратичное значение (СКЗ). СКЗ – важная характеристика амплитуды вибрации, для расчета которой требуется мгновенные значения амплитуды колебаний возвести в квадрат, а получившиеся величины усреднить по времени. Для получения правильных значений, интервал усреднения принимают не меньше одного периода колебания. После этого для получения СКЗ извлекается квадратный корень

$$X_{эфф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

$$X_{эфф} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} X_{|среднее|} = \frac{1}{\sqrt{2}} X_{пик}$$

$$F_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 (\cong 1\text{Дб}) \quad \text{и} \quad F_c = \sqrt{2} = 1,414 (\cong 3\text{Дб}).$$

$$F_f = \frac{X_{эфф}}{X_{среднее}} \quad F_c = \frac{X_{пик}}{X_{эфф}}$$

При использовании в качестве диагностического признака каждый из рассмотренных параметров обладает особенностью. Что же касается величины колебания, то при ее описании используют следующие основные параметры [2]: вибросмещение ( $s$ ); виброскорость ( $v$ ); виброускорение ( $a$ ).

Величины вибросмещения, виброскорости и виброускорения в стандартных единицах измерения связаны уравнениями:

$$v = 2\pi fs = \frac{a10^3}{2\pi}; \quad s = \frac{v}{2\pi f} = \frac{a10^3}{2\pi f}; \quad a = (2\pi f)^2 s10^3 = 2fv10^3.$$

Амплитуда вибросмещения характеризует деформацию конструкции при вибрации. Она может быть рекомендована для измерений при неисправностях, приводящих к изменению некоторых линейных или угловых размеров, например, уменьшение зазоров в соединениях, изгиб валов и др. Вибросмещение, как правило, имеет низкочастотный спектр.

Уровень вибрационных напряжений  $\sigma$  и виброскорость  $v$  взаимосвязаны зависимостью [1]

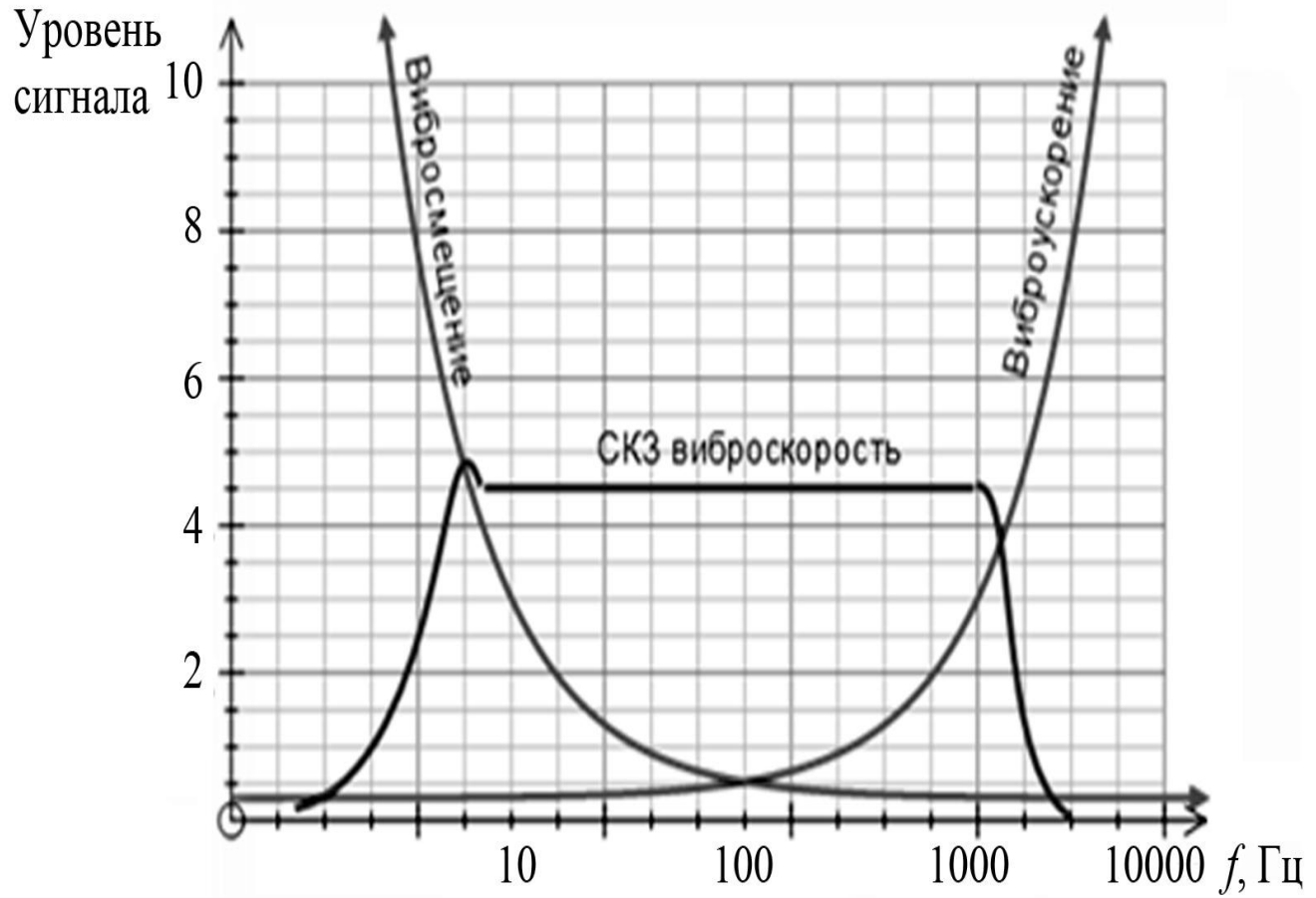
$$\sigma \cdot v \equiv \alpha \cdot v,$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от собственных свойств системы, например, геометрических размеров, материала.

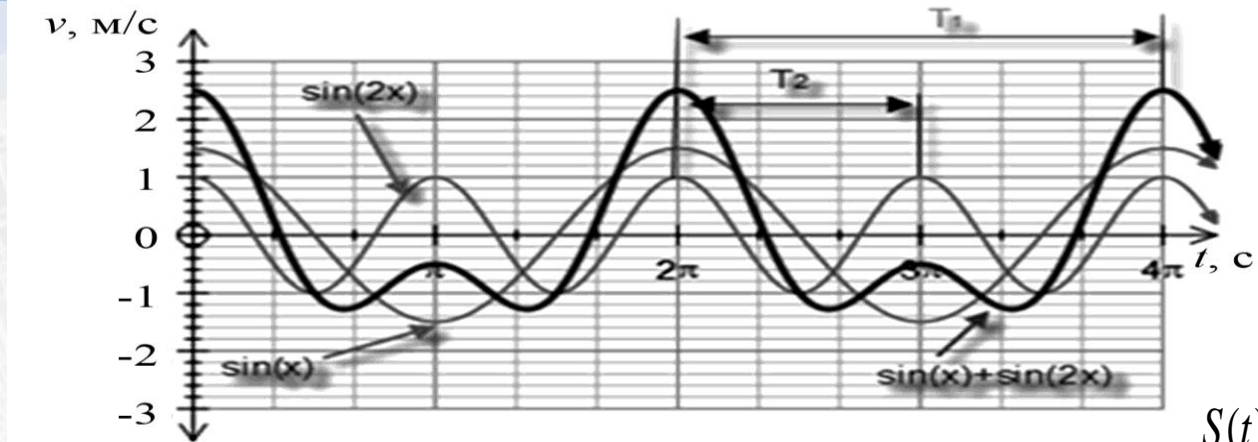
*Измеряя виброскорость, можно оценить вибронапряженность конструкции, и, тем самым, определить степень накопления усталостных повреждений и долговечность агрегата.*

*Виброускорение характеризует уровень инерционных нагрузок, которые возникают при колебаниях. Данные нагрузки в ряде случаев являются определяющими при оценке состоянии крепежных элементов: опор, стыков, фланцев, узлов навески и т.д. Виброускорение достаточно просто измерить пьезоэлектрическими вибропреобразователями*

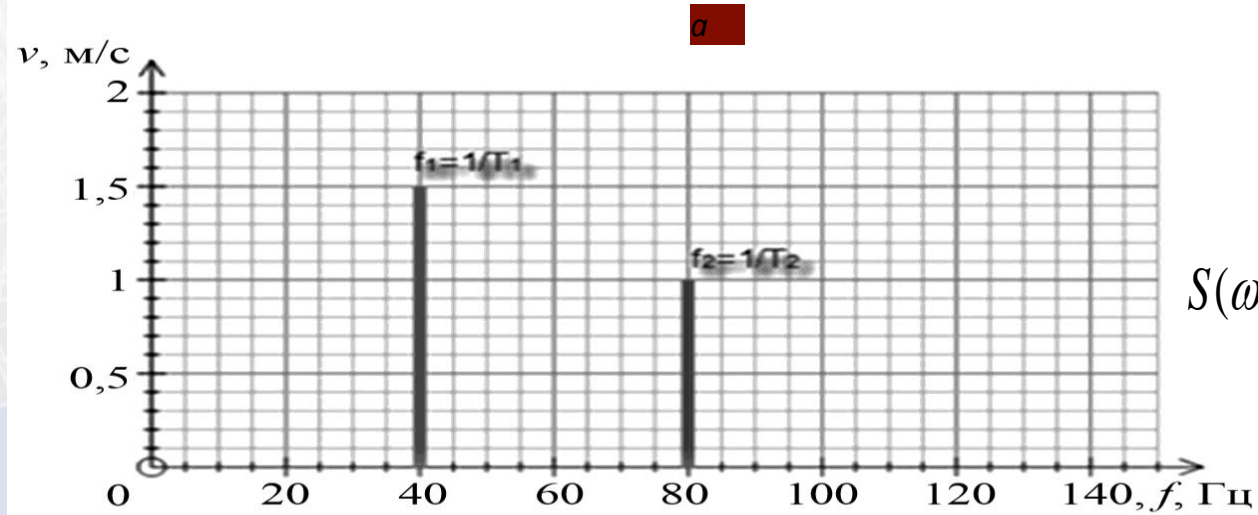
# ЧАСТОТНЫЕ ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ



# Что такое спектр



$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^T S(\omega) e^{i\omega t} dt,$$



$$S(\omega) = \int_0^T S(\omega) e^{-i\omega t} dt.$$

**б**

Описание периодического сигнала:

*a* – во временной области; *b* – частотных областях

# Пересчет


- Пересчет виброскорости, вибросмещения и виброускорения должен производиться с учетом сложения всех гармонических составляющих:
- $s_1, s_2, \dots, s_n; a_1, a_2, \dots, a_n$  – амплитуда вибросмещения и виброускорения всех составляющих вибрации по частотам.

$$v_e = \sqrt{s_1^2 \omega_1^2 + s_2^2 \omega_2^2 + \dots + s_n^2 \omega_n^2};$$

$$v_e = \sqrt{\frac{a_1^2}{\omega_1^2} + \frac{a_2^2}{\omega_2^2} + \dots + \frac{a_n^2}{\omega_n^2}};$$

$$v_e = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}.$$

# ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

The background of the slide features a 3D wireframe illustration of several interlocking gears. The gears are rendered in a light blue or cyan color, with their surfaces composed of a grid of thin lines. The perspective is from an elevated angle, showing the teeth of the gears and their central hubs. The overall aesthetic is technical and modern, set against a dark blue gradient background.

# Диагностика по соотношению пик/фон вибросигнала (Крест-фактор)

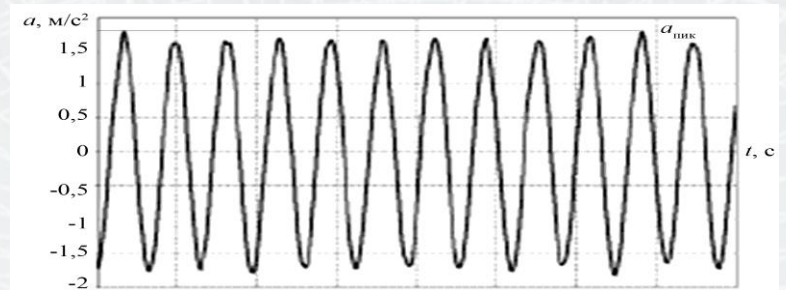
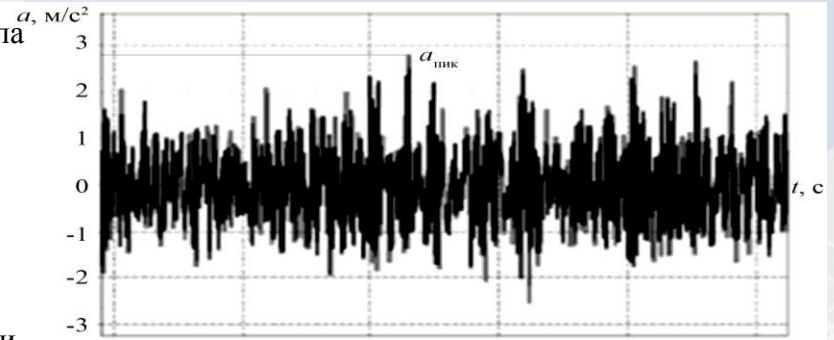
Диагностика по соотношению пик/фон вибросигнала (Крест-фактор)

Метод имеет несколько примерно одинаковых по эффективности модификаций:

- HFD (High Frequency Detection) – обнаружение высокочастотного сигнала;
- SPM (Shock Pulse Measurement) – измерение ударных импульсов;
- SE (Spike Energy) – измерение энергии импульса.

Модификации позволяют выявить дефекты агрегатов на достаточно ранних стадиях, начиная с конца первого этапа развития. Для реализации метода применяются достаточно простые и дешевые приборы.

Крест-фактор – быстро рассчитываемый и удобный параметр, который позволяет пользователю определить количество ударных импульсов во временном сигнале. Эта информация полезна, тем более, что не всегда может быть получена при анализе спектров, так как на спектрах отсутствуют различия между ударами и «белым шумом». Удары на временном сигнале могут быть вызваны износом элементов подшипника качения, износом зубьев в зацеплении или кавитацией. Чаще крест-фактор используется при периодическом мониторинге для наблюдения за увеличением или уменьшением числа ударов.

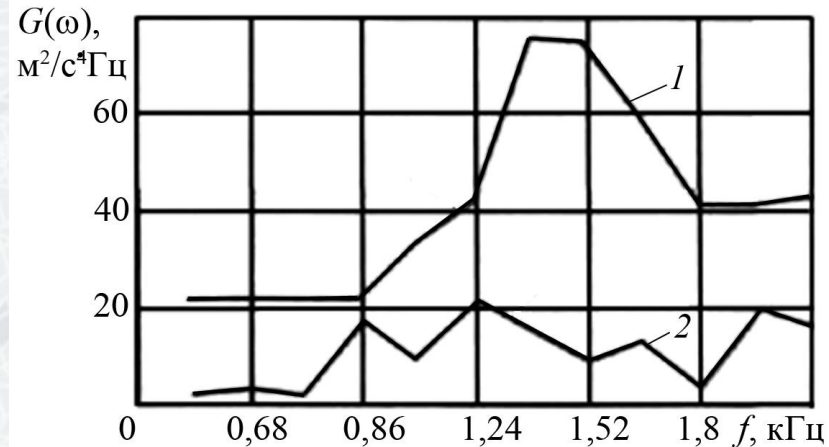




# Диагностика по энергетическому спектру

- Энергетический спектр показывает распределение энергии сигнала в частной области (рис. 8), по которому можно сделать вывод о техническом состоянии отдельных узлов агрегатов и определяется как

$$G(\omega) = \frac{|S(\omega)|^2}{2\pi}.$$



Спектр виброакустического сигнала:  
1 – при наличии дефекта в подшипнике; 2 – при  
отсутствии дефекта

Составляющие спектра называются спектральной  
плотностью мощности виброакустического сигнала

# Диагностика по автокорреляционной функции

- Автокорреляционная функция  $R_y(\tau)$  определяет зависимость мгновенного значения амплитуды колебаний в данный момент времени от его более ранних значений

$$R_y(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T S(t)S(t+\tau)dt,$$

где  $S(t)$  – амплитуда колебания в момент времени  $t$ ;  
 $S(t+\tau)$  – амплитуда колебания через промежуток времени  $\tau$ ;  
 $T$  – период колебаний.

Корреляционная функция смешанного сигнала определяется, как

$$R_y(\tau) = R_1(\tau) + R_m(\tau),$$

где  $R_1(\tau)$  – периодическая функция с частотой, соответствующей периодической составляющей  $s_1(\tau)$ ;  
 $R_m(\tau)$  – функция, соответствующая составляющей шумового фона (помеха).

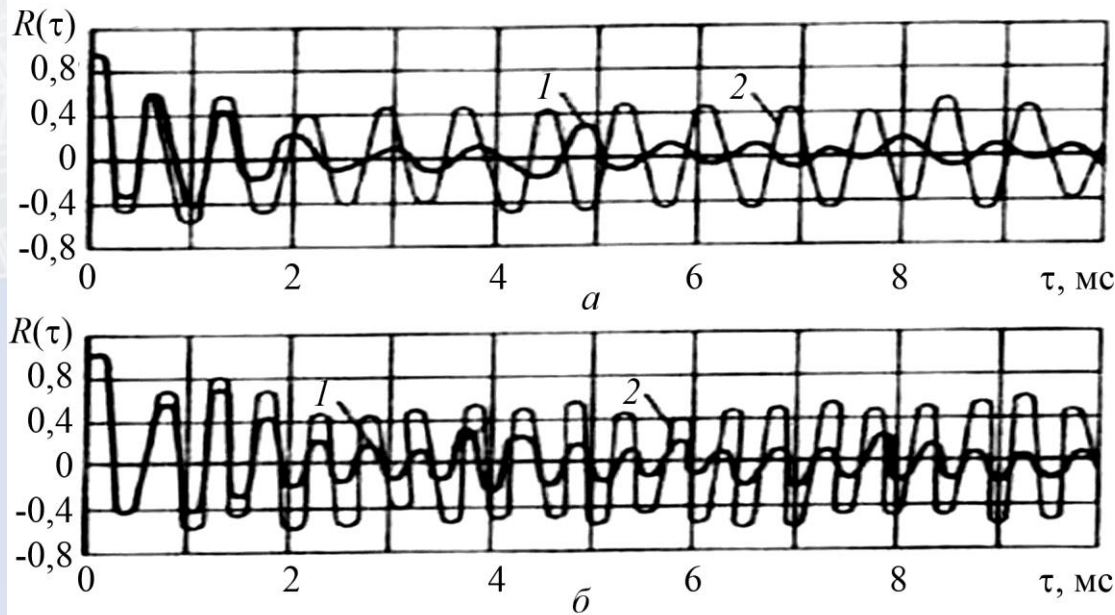
- При увеличении  $R_m(\tau)$  функция убывает, и после достижения некоторого значения  $T$  ее значение становится пренебрежимо малым. Амплитуда автокорреляционной функции при  $\tau=T$  пропорциональна отношению мощности периодической составляющей к общей мощности сигнала, т.е. характеризует интенсивность ударов в неисправном узле.
- В качестве диагностического параметра определяющего техническое состояние механических узлов, можно использовать следующую величину

$$\delta = R(0) - \frac{\sum_{k=1}^n R(kT)}{N},$$

где  $R(0)$  – значение корреляционной функции при  $\tau = 0$ ;  
 $R(kT)$  – значение той же функции при  $\tau = kT$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ );

Рис. 9. Корреляционные функции виброускорения корпуса агрегата:  
 а –  $n=1420$  мин-1; б –  $n=2050$  мин-1;  
 1 – при наличии дефекта в подшипнике; 2 – при отсутствии дефекта в подшипнике

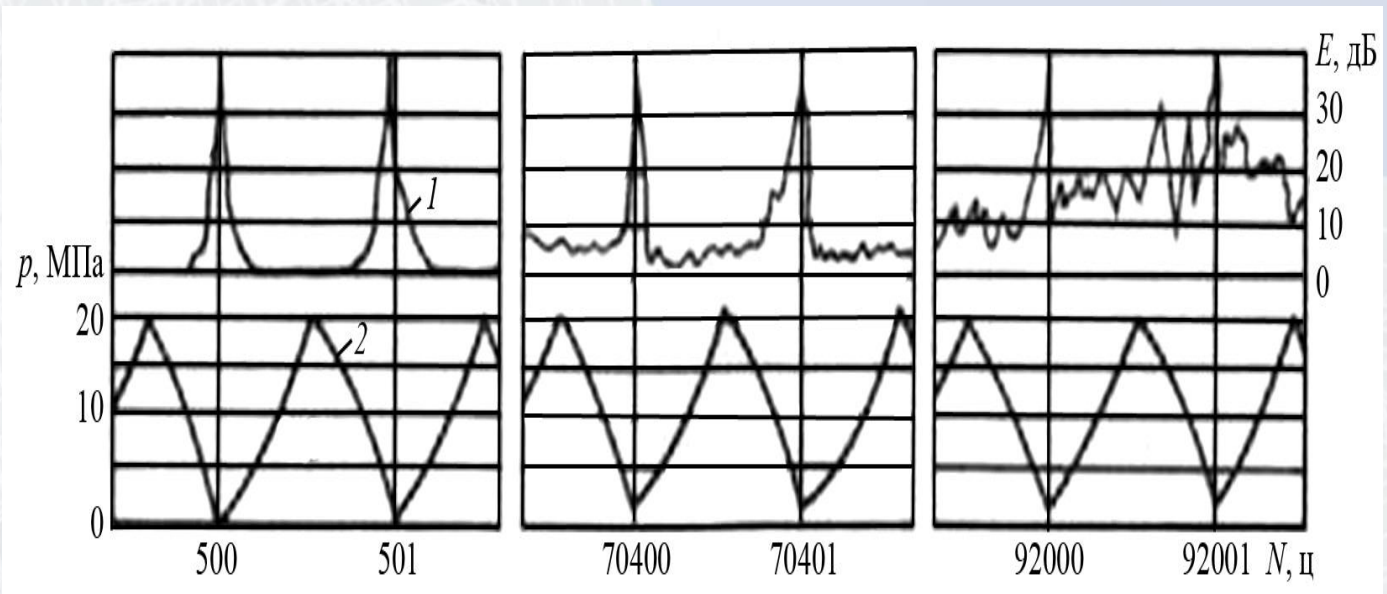
$N$  – число усредненных пиковых значений корреляционной функции.



Корреляционные функции виброускорения корпуса агрегата:  
 а –  $n=1420$  мин-1; б –  $n=2050$  мин-1;  
 1 – при наличии дефекта в подшипнике; 2 – при отсутствии дефекта в подшипнике

- . Фликер-шум возникает в узлах агрегатов, подвергающихся старению и медленному изнашиванию. Это инфранизкие колебания (0,01–60 Гц), амплитуда которых пропорциональна  $1/f$ . Этот параметр используется для диагностирования кинематических пар на ранней стадии. Сложность измерения сигналов инфранизких частот ограничивает для диагностирования использование этого параметра. Выделение фликер-шума производится путем многократного детектирования общего сигнала, идущего от вибропреобразователя (выделение низкочастотной модуляции).

- . Диагностика по акустической эмиссии представляет собой анализ сверхвысокочастотных колебаний (**0,1–10 МГц**), появляющихся при нарушении структуры металла. Энергия сигналов акустической эмиссии используется для обнаружения усталостных трещин на ранней стадии их развития в корпусах механизмов.
- На рис. приведены циклограммы нагружения корпуса фильтра давлением рабочей жидкости корпуса гидрофильтра и соответствующие уровню дефекта сигналы акустической эмиссии.
- Акустическая дефектоскопия реализуется несколькими методами.
- Реверберационный метод заключается в анализе времени объемной реверберации, т.е. процесса постепенного затухания звука в контролируемом объекте.
- Велосиметрический метод эходефектоскопии – измерение изменения скорости распространения упругих волн в зоне расположения дефектов в многослойных конструкциях. Метод используется для обнаружения зон нарушения сцепления между слоями металла.
- Акустико-эмиссионный метод контроля – метод приема и анализа волн акустической эмиссии в изделии при развитии трещин в процессе его нагружения.



Изменение энергии сигналов акустической эмиссии в процессе циклического нагружения корпуса гидрофилтра:

а – корпус исправен; б – начальная стадия появления трещины в корпусе гидрофилтра; в – акустическая эмиссия перед раскрытием трещины;

1 – энергия сигналов акустической эмиссии;

2 – циклограмма нагружения корпуса фильтра давлением рабочей жидкости

- Акустико-топографический метод основан на возбуждении в контролируемом изделии:
  - в первом варианте метода – мощных изгибных колебаний заданной;
  - во втором варианте – непрерывно меняющейся частоты с одновременной визуализацией картины колебаний поверхности изделия, например, путём нанесения на эту поверхность тонкодисперсного порошка.
- При достаточно сильных колебаниях поверхности изделия с заданной частотой частицы порошка из мест, не принадлежащих узлам, смещаются к узлам колебаний, тем самым образуя фигуры Хладни – картины распределения узловых линий на поверхности.
- Для бездефектного изотропного материала – картина четкая и непрерывная. При наличии в материале дефекта в зоне дефекта картина меняется: узловые линии искажаются в месте наличия включений, а также на участках, характеризующихся анизотропией механических свойств, или прерываются при наличии расслоения.
- Во втором варианте метода при наличии расслоения находящийся над ним участок верхнего слоя изделия рассматривается как колеблющаяся, закрепленная по краю диафрагма. В момент резонанса (совпадения частоты возбуждения с собственной частотой этой диафрагмы), частицы порошка перемещаются к границам дефектной зоны, оконтуривая ее с большой точностью.

- Метод предусматривает диагностику в диапазоне **частот 30–200 кГц** с возможностью обнаружения в многослойном изделии при толщине верхнего листа **0,25 мм дефектов протяжённостью 1–1,5 мм**. Излучатель прижимается к поверхности изделия в одной точке. Мертвая зона отсутствует.
- Ультразвуковой контроль, основанный на возбуждении ультразвуковых волн, нашел применение при контроле сварных соединений. Ультразвуковые волны вводятся в шов через основной металл с помощью наклонных акустических преобразователей. При поиске дефектов производят продольно-поперечное перемещение (сканирование) преобразователя вдоль шва, одновременно осуществляя его вращательное движение. Чувствительность ультразвукового контроля определяется минимальными размерами выявляемых дефектов или эталонных отражателей (моделей дефектов), в качестве которых применяют плоскостные сверления, ориентированные перпендикулярно направлению прозвучивания, а также боковые сверления или зарубки.
- Эхо-метод, теневой и зеркально-теневой методы контроля используются в импульсных дефектоскопах.



- При эхо-методе в изделие посылаются короткие импульсы ультразвуковых колебаний, регистрируются интенсивность и время прихода эхосигналов, отраженных от дефектов. Для контроля изделия датчик эходефектоскопа сканирует его поверхность. Метод позволяет обнаруживать поверхностные и глубинные дефекты.
- **При теновом методе ультразвуковые колебания отражаются от дефекта с уменьшением энергии или огибают дефект с изменением фазы. Метод** нашел широкое применение для контроля сварных швов, рельсов и др.
- Зеркально-теновой метод, как замена или дополнение эхо-метода, предназначен для выявления дефектов, дающих слабое отражение ультразвуковых волн в направлении раздельно-совмещенного преобразователя. Дефекты, например, вертикальные трещины, перпендикулярные поверхности, по которой перемещают преобразователь, дают очень слабый рассеянный и донный сигналы благодаря тому, что на их поверхности продольная волна трансформируется в головную, которая в свою очередь излучает боковые волны, уносящие энергию. Примером применения метода может стать контроль рельсов на вертикальные трещины в шейке. **Этот метод обычно в 10–100 раз хуже эхо-метода по чувствительности.**

- Параметры кепструм-анализа целесообразно применять в случаях, когда изменение состояния механизма проявляется недостаточно четко и по амплитудному спектру вибрации не распознается.

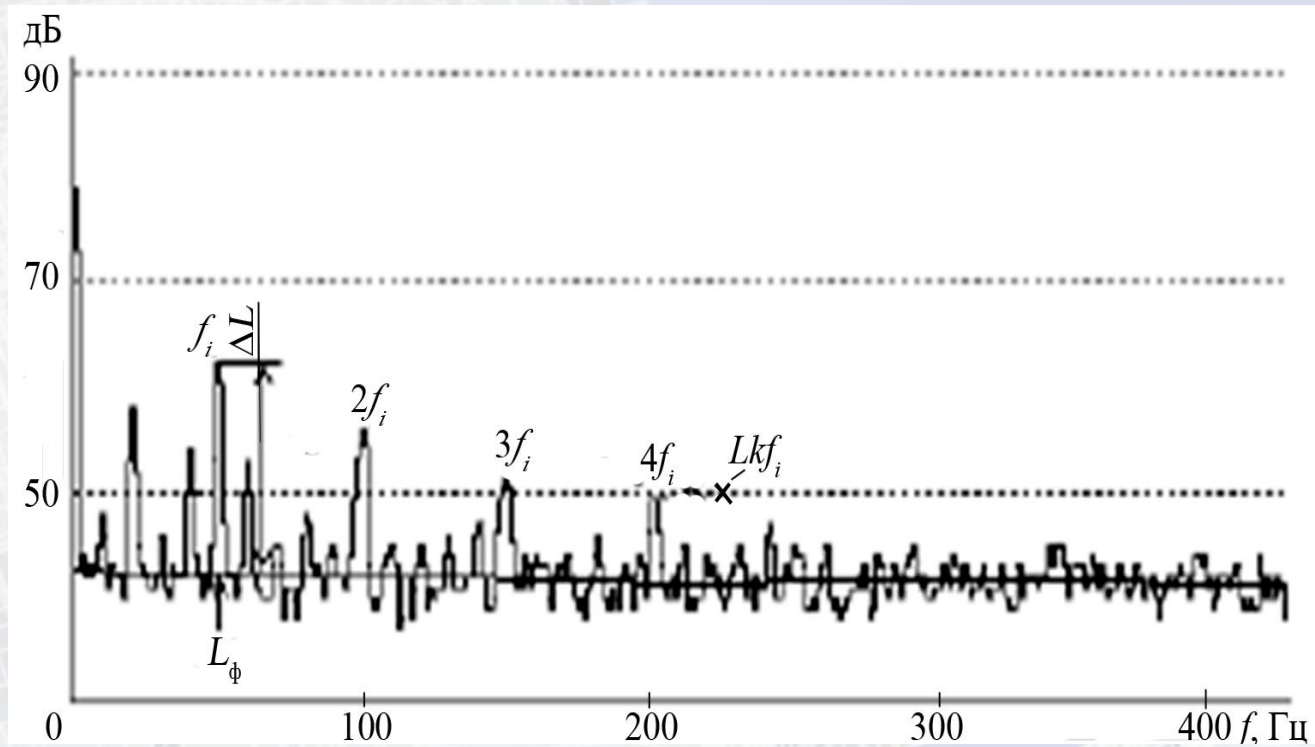
Кепструм  $C(q)$  определяется

$$C(q) = |F \{ \log_2 [G(\omega)] \}|^2,$$

- 
- где  $F$  – преобразование Фурье;
- – энергетический спектр;
- $q$  – квефренси (независимая переменная кепструма).
- Достоинство метода, несмотря на аппаратную сложность, – высокая разрешающая способность.

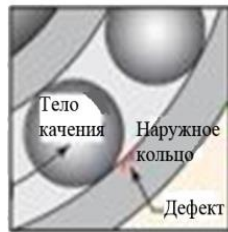
# Диагностика по спектру огибающей сигнала

- Метод диагностики по спектрам огибающих – эффективный метод обнаружения дефектов на ранних стадиях, т.к. менее остальных подвержен различным помехам и в результате имеет большую достоверность, что объясняет его широкое применение на практике.
- Спектр огибающей вибрации – узкополосный спектр огибающей высокочастотных случайных составляющих вибрации, которые предварительно выделены из полного сигнала при помощи полосового фильтра, например, третьоктавного.
- Параметры спектра огибающей (частоты и амплитуды гармонических составляющих) позволяют определить свойства случайной вибрации, приобретающей амплитудную модуляцию из-за дефектов в узлах трения.
- В бездефектных узлах трения силы трения и уровень возбуждаемой ими случайной вибрации стабилен во времени. Гармонические составляющие в спектре огибающей вибрации таких узлов отсутствуют. Если силы трения и вибрация из-за дефекта приобретают амплитудную модуляцию, то частота модуляции определяет вид, а глубина модуляции – величину дефекта. В спектре огибающей они определяются частотами и амплитудами появившихся гармонических составляющих.
- Типичный спектр огибающей случайной вибрации узла трения, а именно подшипника качения, приведен на рис

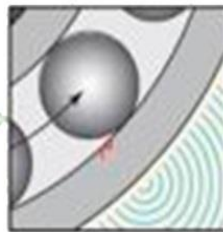


- Спектр огибающей вибрации подшипника с раковиной на наружном кольце

- При отсутствии дефектов спектр огибающей имеет только фоновые (случайные) составляющие с близкими по величине уровнями, т.к. в выбираемой третьоктавной полосе сигнал вибрации является стационарным случайным процессом. Дефект поверхности трения приводит к модуляции вибрации с определенной частотой  $f_i$ . В спектре появляется ряд гармонических составляющих на частотах  $kf_i$ , причем  $k$  может иметь как одно значение, например  $k=1$ , так и группу  $k=1,2,3, \dots$ . Вид дефекта определяется частотой модуляции  $f_i$  и числом  $k$  обнаруженных гармонических составляющих.
- Величина дефекта определяется разностью уровней  $\Delta L$  максимальной из гармоник  $L_{kf_i}$  и фона  $L_f$ .
- На рис. приведен алгоритм обработки сигнала, реализуемый при методе огибающей спектра



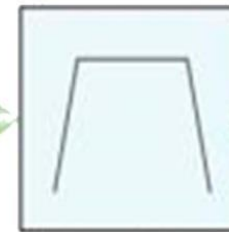
Периодический ударный импульс



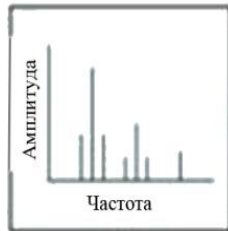
Резонанс элементов подшипника



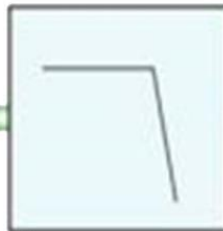
Сейсмодатчик



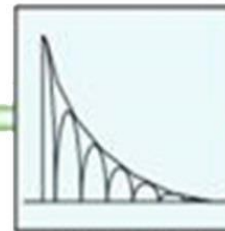
Полосовой фильтр



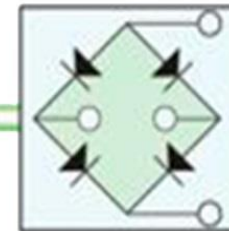
Спектральный анализ



Фильтр высоких частот



Огибающие формы вибросигнала



Демодуляция

- Алгоритм обработки сигнала

# Акустический канал и его основные свойства

- Акустический канал – исходное понятие вибродиагностирования. Он включает кинематическую пару, служащую источником вибрации, вибропреобразователь, принимающий сигнал, и среду, по которой сигнал от кинематической пары проходит к вибропреобразователю. При наличии в агрегате множества кинематических пар его конструктивная схема может быть представлена в виде системы резонаторов со свойствами, определяющимися упругомассовыми характеристиками основных элементов. При действии многокомпонентной вибрации в системе возможно совпадение или близость частот вынуждающей силы к частотам собственных колебаний одного или нескольких резонаторов.
- Амплитуда резонансных колебаний, возникающих при этом, определяет техническое состояние агрегата технологической системы. При целой кратности частот возможен такой же эффект.
- Одна из причин появления резонанса – изменение критических частот вращения вала агрегата под действием различных факторов в зависимости от условий эксплуатации. Эти факторы сводятся в основном к изменению упругих свойств узлов и деталей агрегата из-за изнашивания, ослабления соединений.

- Сигнал от одной кинематической пары, распространяясь по механизму, может встретиться с сигналами от других пар. Если сигналы при этом совпадают по фазе, то они могут, суммируясь, усиливаться, в противном случае, вычитаясь, ослабевать. Так как акустические каналы имеют свои резонансы, то все сигналы, имеющие частоты, равные резонансам акустических каналов, проходят без ослабления или усиливаются, остальные – тормозятся.
- Частотная характеристика акустического канала

$$S(\omega) = H(\omega)Q(\omega),$$

- где  $H(\omega)$  – амплитудно-частотная характеристика акустического канала;
- $Q(\omega)$  – спектр входного сигнала.
- Спектр – важная характеристика акустического канала, значение которого позволяет выбрать рациональные параметры диагностической аппаратуры и использовать различия в спектрах сигналов, генерируемых кинематическими парами.



- Основные параметры спектра – верхняя и нижняя частоты (его границы), между которыми лежит основная доля энергии сигнала.
- Упрощенные математические выражения для вычисления основных параметров спектра можно получить на основе выражения и положения теории Герца

$$f_{\text{в}} = \frac{1,5}{\tau}, \quad f_{\text{ср}} \approx \frac{0,7}{\tau}, \quad f_{\text{н}} \approx C \sqrt{\frac{1}{4\pi V}},$$

где  $f_{\text{в}}$ ,  $f_{\text{ср}}$ ,  $f_{\text{н}}$  – верхняя, средняя и нижняя частоты спектра;

$\tau$  – длительность процесса соударения деталей кинематической пары;

$V$  – объем механизма;

$C$  – скорость распространения волны.



**Спасибо за внимание**