

Дослідження проблем кінематики, динаміки, міцності та надійності машин і їх вузлів

УДК 621.833

В.А. СИДОРОВ (канд. техн. наук, доц., sidorov_va@ukr.net)
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННОГО СИГНАЛА

Проведена систематизация, сформулированы правила анализа параметров вибрации при проведении исследований механических колебаний в лабораторных и промышленных условиях.

механические колебания, параметры вибрации, правила анализа

Введение

В настоящее время решение ряда задач контроля технического состояния механического оборудования, выбора оптимальных режимов работы механизмов, определения рациональных параметров резания, проведения научно-исследовательских работ требует выполнение измерений и анализа вибрации. Преимущества анализа вибрационного сигнала заключаются в универсальности, доступности средств измерения, разработанной методологии виброметрии, возможности регистрации сигналов при различных режимах работы, отсутствие специальной подготовки мест измерения.

Вопросам измерения и анализа параметров вибрации посвящено большое количество работ, среди которых следует отметить работы Генкина М.Д. [1], Коллакота Р. А. [2], Ширмана А.Р. [3], Баркова А.В. [4]. Наибольшее внимание уделяется идентификации причин повреждений в механических системах путем анализа спектрального сигнала вибрации. В тоже время отсутствуют систематизированные рекомендации по выбору и анализу параметров вибрации.

Целью работы является систематизация и формулировка правил анализа параметров вибрации при проведении первоначальных исследований механических колебаний.

Основное содержание работы

Элемент механической системы, рассматриваемый как объект исследования колебаний, представляется одностепенной расчетной схемой (рис. 1). Одностепенная система является основным элементом в построении многостепенных расчетных моделей.

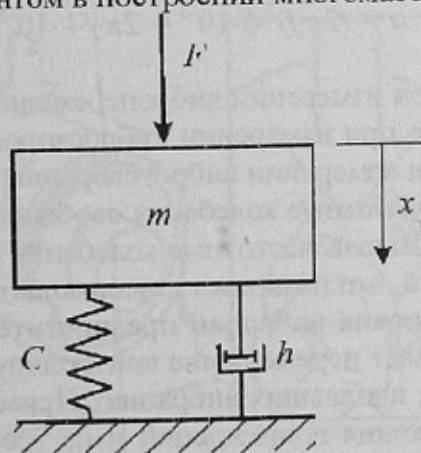


Рис. 1. Одностепенная расчетная модель механических колебаний

Факторами модели являются: масса – m , жесткость – c , коэффициент демпфирования – h . Колебания системы возможны при воздействии силы – F , переменной относительно направления колебаний. Сила F может быть и постоянной, однако параметры контактирующих поверхностей могут служить причиной ее периодического изменения. Частотные параметры характеризуют источник колебаний. Параметры вибрационного процесса при вынужденных колебаниях определяются силами инерции, силами упругости, силами демпфирования и возмущающими силами:

$$m \cdot \ddot{x} + h \cdot \dot{x} + c \cdot x = F$$

Таким образом, поведение одномассовой системы при вынужденных колебаниях определяется двумя группами характеристик.

Первая группа – характеристики системы: масса, жесткость, коэффициент затухания. Конкретные значения данных величин в практических условиях неизвестны, могут быть заданы в матричной форме и предполагаются неизменными в процессе измерения. Повреждения в механической системе приводят к изменению характеристик системы: изменению жесткости при износе деталей, ослаблению резьбовых соединений; изменению коэффициента демпфирования при развитии трещин.

Вторая группа – реакции системы (виброускорение, виброскорость, виброперемещение), являются функцией вынуждающей силы, действующей с определенной частотой. Реакции системы характеризуют не только степень силового воздействия, но и характеристики системы.

Для получения объективной оценки состояния механической системы необходимы значения всех параметров колебательного движения:

- виброускорения a – как показателя сил инерции, характеризующего появление повреждений на ранней стадии развития;
- виброскорости V – как показателя энергии механических колебаний;
- виброперемещения S – как показателя линейных отклонений;
- частоты f – как определителя источника механических колебаний.

Анализ взаимосвязи колебательных величин при гармонических процессах позволяет рекомендовать частотные диапазоны при измерении параметров:

$$\begin{aligned} V &= 2\pi f S = a \cdot 10^3 / (2\pi f); \\ S &= V / 2\pi f = a \cdot 10^3 / (2\pi f)^2; \\ a &= (2\pi f)^2 \cdot S \cdot 10^{-3} = 2\pi f \cdot V \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Предпочтительным при измерении виброперемещения являются низкочастотные диапазоны (до 200...400 Гц); при измерении виброскорости – среднечастотные диапазоны (до 1000...4000 Гц); при измерении виброускорения – высокочастотные диапазоны (до 5000...10000 Гц). Низкочастотные колебания свободно распространяются по металлоконструкциям механизма. Высокочастотные колебания быстро затухают по мере удаления от источника колебаний, что позволяет локализовать место повреждения.

Для оценки общего уровня вибрации предпочтительно использовать виброскорость – этот параметр учитывает перемещение контролируемой точки и энергетическое воздействие на опоры от сил, вызвавших вибрацию. Применение виброускорения необходимо для раннего обнаружения повреждений и не требует преобразований при использовании пьезоэлектрических датчиков (акселерометров). Недостаток – отсутствие

нормативных документов и общепринятого физического и спектрального толкования основных особенностей проявления виброускорения.

Основные характеристики колебательных процессов.

Размах колебаний – разность между наибольшим и наименьшим значениями колеблющейся величины в рассматриваемом интервале времени (двойная амплитуда).

Пиковое значение – определяется как наибольшее отклонение колебательной величины.

Среднее квадратичное значение – квадратный корень из среднего интегрального значения квадрата колеблющейся величины в рассматриваемом периоде времени.

Первые две характеристики (размах колебаний, пиковое значение) используются при анализе конкретных реализаций вибрационного сигнала, дополнительно используется показатель асимметрии. Среднее квадратичное значение – показатель энергетических характеристик системы.

Правила оценки параметров вибрации имеют характер аксиом.

1. Чем меньше значения параметров вибрации, тем техническое состояние механизма лучше.

2. Большие значения параметров указывают на большее воздействие разрушительных сил и позволяют локализовать место повреждения.

3. Направление большей вибрации определяет характер повреждения.

Измерения вибрации проводятся на подшипниковых узлах.

При измерении виброскорости и виброперемещения необходимо провести измерения в трех взаимноперпендикулярных направлениях: поперечных – вертикальном, горизонтальном; продольном – осевом (рис. 2).

1. Значения виброскорости в осевом направлении должны быть минимальны для роторных механизмов.

2. Значения виброскорости в горизонтальном направлении должны быть максимальны и превышать на 20% значения в вертикальном направлении.

3. Увеличение виброскорости в вертикальном направлении – признак повышенной податливости основания, механизма.

4. Увеличение виброскорости в вертикальном и горизонтальном направлении указывает на дисбаланс ротора.

5. Возможная причина увеличения виброскорости в осевом направлении – изгиб ротора, несоосность валов.

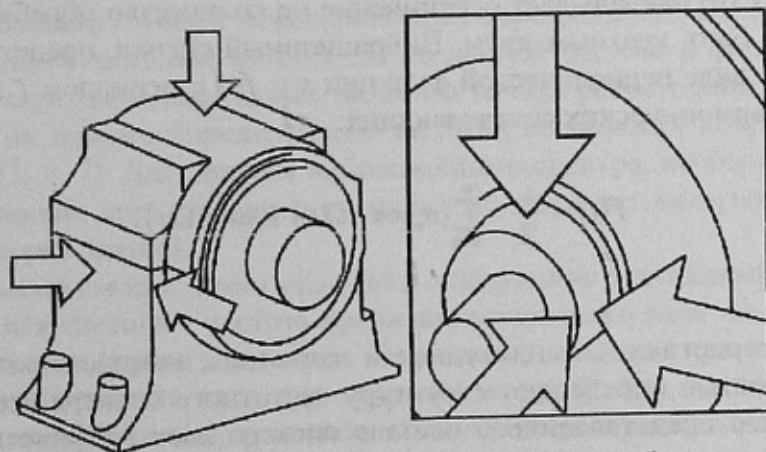


Рис. 2. Направления измерения виброскорости и виброперемещения

При измерении виброускорения достаточны измерения в радиальном направлении – вертикальном и горизонтальном. Желательно, проводить измерения в районе эмиссионного окна – зоны распространения механических колебаний от источника повреждения (рис.3). Эмиссионное окно неподвижно при местной нагрузке и вращается, если нагрузка имеет циркуляционный характер.

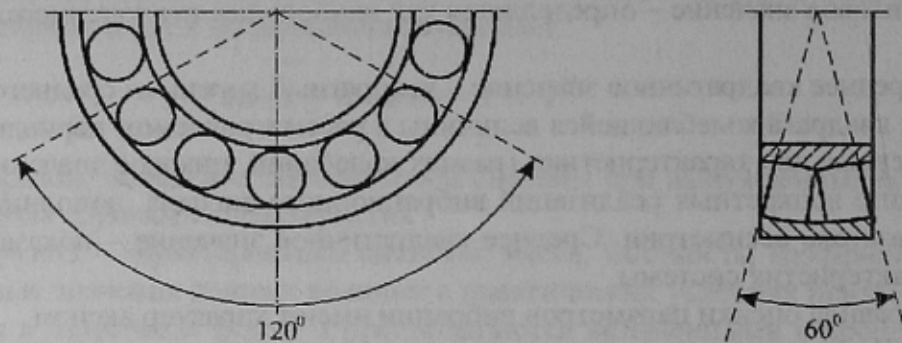


Рис. 3. Расположение эмиссионного окна при измерении виброускорения подшипниковых узлов

В общем случае для оценки состояния механической системы могут быть использованы методы.

1. Взаимной оценки – при сравнении однотипных узлов и механизмов.
2. Относительная оценка предполагает контроль временных изменений.
3. Абсолютная оценка проводится при сравнении измеренных значений со стандартными значениями.

Вибрационный сигнал может быть представлен во временной форме (рис. 4) или в спектральной форме (рис. 5), являющейся одной из форм представления временного сигнала. Спектральный анализ – это метод обработки сигналов, который позволяет выявить частотный состав сигнала. Выявлением повышенных амплитуд вибрации позволяет идентифицировать неисправности оборудования.

Решение задач спектрального анализа возможно при использовании быстрого преобразования Фурье (БПФ) позволяющего определить вклад отдельных составляющих спектра вибрации. Алгоритмы БПФ - методы оптимального и быстрого расчета значений коэффициентов ряда Фурье. Алгоритмы БПФ прекрасно работают в двоичной системе чисел, но это накладывает ограничение на количество обрабатываемых точек - их число должно быть кратным двум. Вибрационный сигнал, представленный во временной области в виде периодической функции $x = f(t)$ с периодом T может быть представлен суммой гармонических составляющих:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t),$$

где частота $\Omega = \frac{2\pi}{T}$.

Две характеристики – амплитудная и частотная, комплексных коэффициентов ряда Фурье, полностью определяют структуру частотного спектра периодического колебания. Наглядное представление о составе спектра дает графическое изображение вибрационного сигнала в виде спектрограмм.

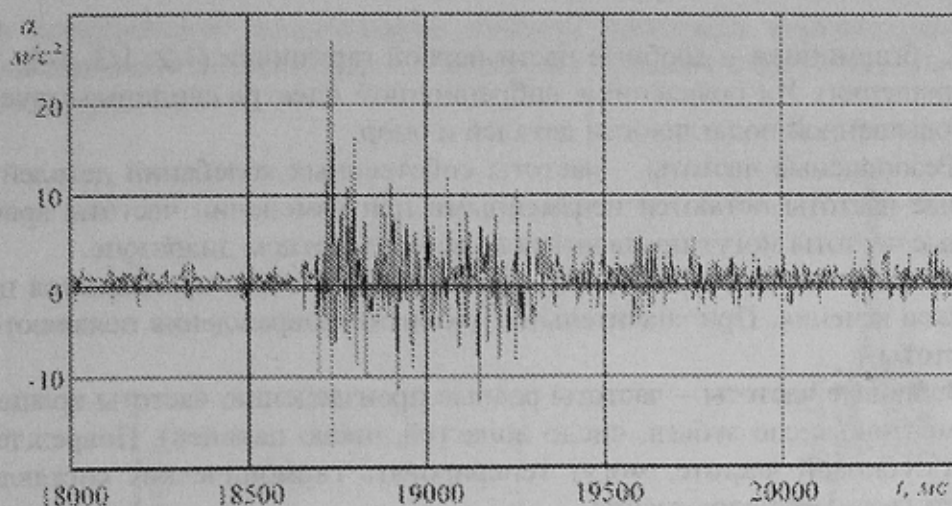


Рис. 4. Пример временной формы вибрационного сигнала

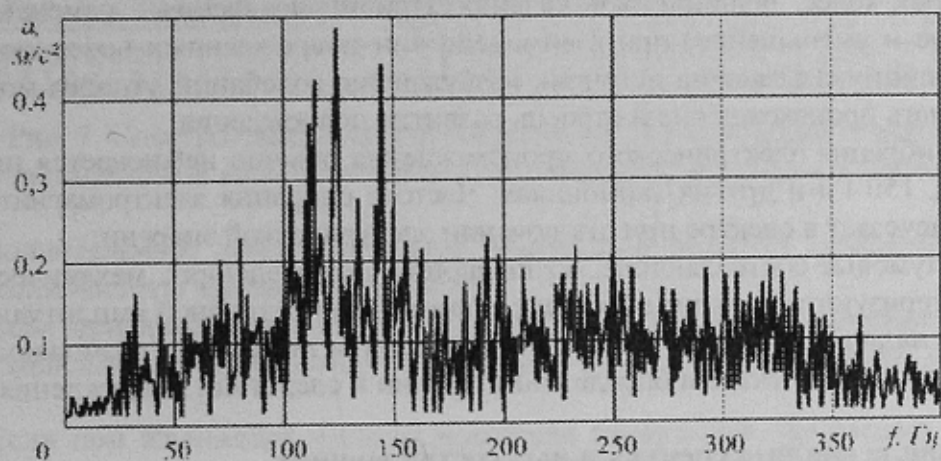


Рис. 5. Пример спектральной формы вибрационного сигнала

Известны методы обработки вибрационного сигнала для получения корреляционных или автокорреляционных функций, спектральной мощности сигнала, спектральных характеристик, расчета эксцесса. Однако, наибольшее распространение получил спектральный анализ из-за однозначной идентификации повреждений и понятных кинематических зависимостей между происходящими процессами и спектрами вибрации.

При составлении словаря неисправностей спектрального анализа кроме частоты колебаний учитывают значение амплитуды на данной частоте и фазой — углом сдвига сигнала данной частоты, относительно момента начала регистрации. Поиск повреждений проводится на заранее определенных частотах возможных повреждений конкретного механизма [5, 6, 7]. Для анализа вибрационного спектра, необходимо выделить основные составляющие спектрального сигнала, это позволит ускорить подготовку специалистов и проверку знаний.

Спектральный сигнал может содержать следующие составляющие.

1. Обратная частота — частота вращения приводного вала механизма или частота рабочего процесса - первая гармоника. Гармоники — частоты кратные обратной частоте. Превышают обратную частоту в целое число раз (2, 3, 4, 5, ...). Часто гармоники называют супергармониками. Гармоники характеризуют неисправности: несоосность, изгиб вала, повреждения соединительной муфты, износ посадочных мест. Количество и амплитуда гармоник показывают степень повреждения механизма.

2. Субгармоники – дробные части первой гармоники ($1/2, 1/3, 1/4, \dots$ оборотной частоты вращения). Их появление в вибрационном спектре свидетельствует о наличии зазоров, повышенной податливости деталей и опор.

3. Резонансные частоты – частоты собственных колебаний деталей механизма. Резонансные частоты остаются неизменными при изменении частоты вращения вала. Резонансные частоты могут проявляться во всем частотном диапазоне.

4. Негармонические колебания – на данных частотах проявляются повреждения подшипников качения. При значительном развитии повреждения появляются гармонические частоты.

5. Зубцовые частоты – частоты равные произведению частоты вращения вала на число элементов (число зубьев, число лопастей, число пальцев). Повреждения, проявляемые на зубцовой частоте, могут генерировать гармонические составляющие при дальнейшем развитии повреждения.

6. Боковые полосы – модуляция процесса, появляются при развитии поврежденной зубчатых колес, подшипников качения. Причин появления – изменение скорости (увеличение и уменьшение) при взаимодействии поврежденных поверхностей. Значение модуляции указывает на источник возбуждения колебаний. Анализ модуляций позволяет узнать происхождение и степень развития повреждения.

7. Вибрация электрического происхождения обычно наблюдается на частоте 50 Гц, 100 Гц, 150 Гц и других гармониках. Частота вибрация электромагнитного происхождения исчезает в спектре при отключении электрической энергии.

8. Шумовые составляющие, возникающие при заеданиях, механических контактах. Характеризуются большим числом составляющих различной амплитуды.

При наличии знаний о составляющих спектра появляется возможность различения их в частотном спектре и определения причин и следствий повреждения

Правила анализа спектральных составляющих.

1. Большие число гармоник характеризует большие повреждения механизма.
2. Амплитуды гармоник должны уменьшаться с увеличением числа гармоники.
3. Амплитуды субгармоник должны быть меньше амплитуды первой гармоники.
4. Увеличение числа боковых полос свидетельствует о развитии повреждения.
5. Большее значение должна иметь амплитуда первой гармоники.
6. Глубина модуляции (отношение амплитуды гармоники к амплитуде боковых полос) определяет степень повреждения механизма.

На рис. 6 представлен пример спектрограммы виброскорости механизма, имеющего дисбаланс ротора и частоту первой гармоники 10 Гц.

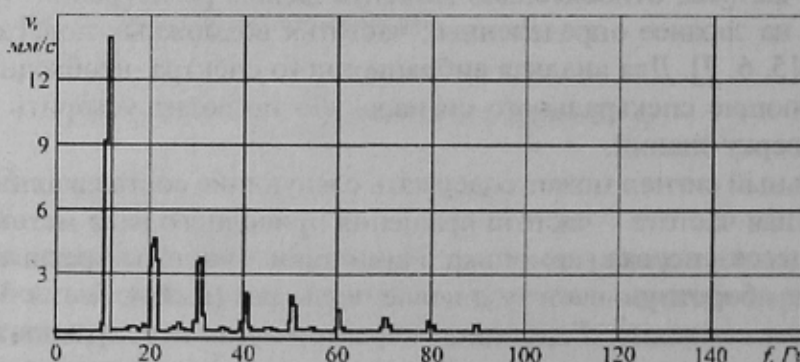


Рис. 6. Спектрограмма виброскорости механизма, имеющего дисбаланс ротора и частоту первой гармоники 10 Гц

При повреждении подшипников качения шпинделя вертикально-фрезерного станка зафиксированы резонансные составляющие элементов подшипников на частотах 7000...9500 Гц (рис. 7).

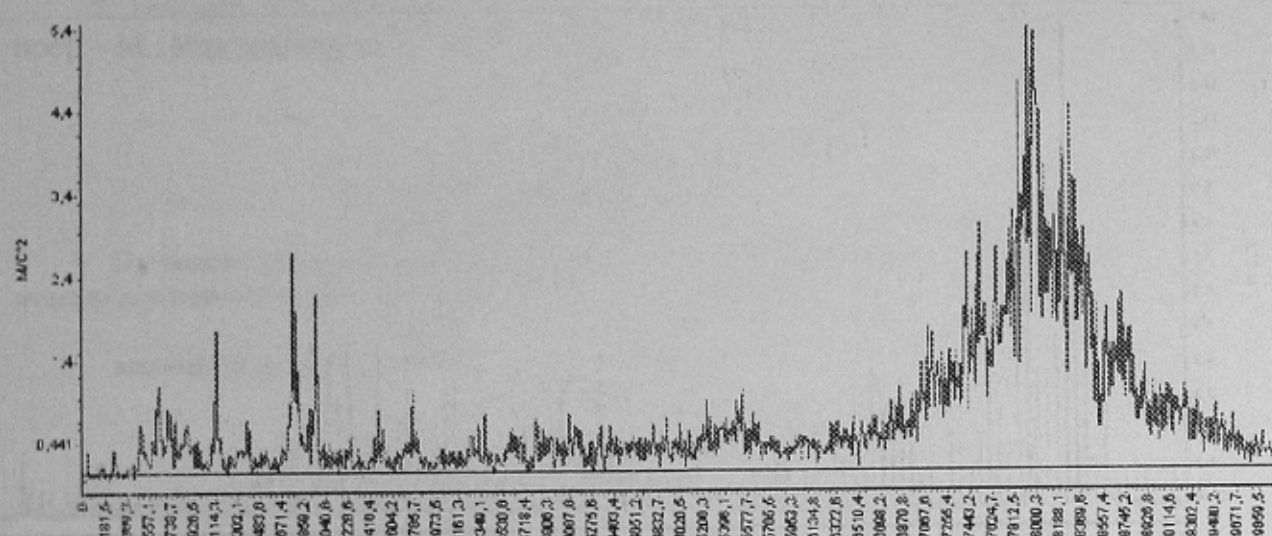


Рис. 7. Спектрограмма виброускорения соответствующая повреждениям подшипников качения шпинделя вертикально-фрезерного станка

Дополнительным диагностическим параметром является измерение вибрации при изменении частоты вращения механизма.

1. Если при изменении частоты вращения происходит увеличение вибрации в линейной зависимости, причиной повреждений являются механические повреждения деталей.

2. Если при изменении частоты вращения происходит увеличение вибрации в квадратичной зависимости, причиной повреждений является дисбаланс ротора.

3. Если при изменении частоты вращения происходит увеличение вибрации в экспоненциальной зависимости, причиной повреждений является трещина в корпусной детали или в основании.

Спектрограмма виброускорения при схватывании второго рода, детали, обрабатываемой на металлорежущем станке (рис. 8), содержит полигармонические составляющие с частотой 33,3 Гц (частота вращения шпинделя 2000 об/мин). Процесс дополнительно модулируется резонансными частотами узлов станка.

Дополнительные правила анализа параметров вибрации.

Значения виброскорости, определяющие границы состояний: до 4,5 мм/с – удовлетворительное; 4,5...10,0 мм/с – плохое; свыше 10,0 мм/с – аварийное. Значения приведены для работы под нагрузкой.

Для оценки состояния подшипников качения проводят измерения пикового и среднеквадратичного значений виброускорения в частотном диапазоне 10...4000 Гц. В общем случае: 1) хорошее состояние характеризуется значением пикового значения виброускорения – до 10,0 м/с²; 2) удовлетворительное состояние – среднеквадратичное значение не превышает 10,0 м/с²; 3) плохое состояние наступает при превышении 10,0 м/с² среднеквадратичным значением; 4) если пиковое значение превышает 100,0 м/с² – состояние становится аварийным. Одним из признаков наличия значительных повреж-

дений является присутствие в спектре виброускорения составляющих со значениями свыше $9,8 \text{ м/с}^2$.

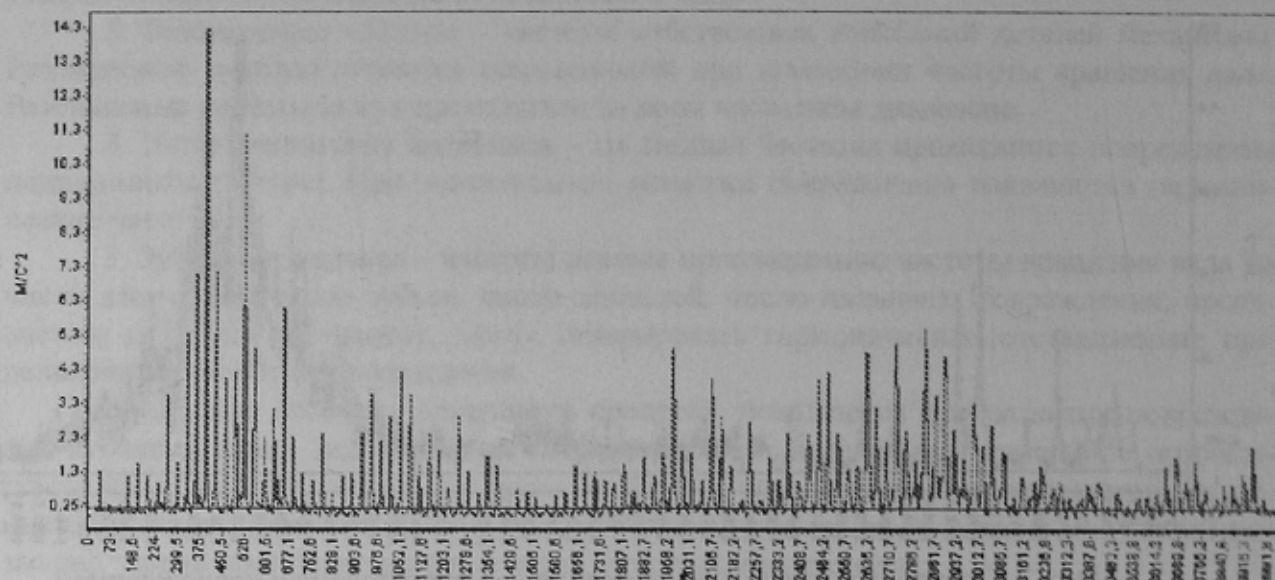


Рис. 8. Спектрограмма виброускорения при схватывании второго рода, детали, обрабатываемой на металлорежущем станке

Большинство встречающихся в практике вибросигналов по форме являются сложными. Необходимо учитывать и случайные процессы, непредсказуемые по своим параметрам (частоте, амплитуде), но сохраняющие свои статистические характеристики (среднее значения, дисперсию) на протяжении процесса наблюдения. Например: кавитация в проточной части насоса, шум работающего двигателя.

Выводы

1. Анализ вибрационных процессов механического оборудования является наиболее информативным способом получения данных о процессах колебаний в механическом оборудовании.
2. Эффективная оценка вибрационных параметров механических систем возможна при соблюдении сформулированных правил анализа общего уровня вибрации.
3. Для определения причин механических колебаний при проведении спектрального анализа выделены основные составляющие спектра вибрационного сигнала.

Список литературы

1. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
2. Коллакот Р. А. Диагностирование механического оборудования / Р. А. Коллакот. – Л.: Судостроение, 1980. – 281 с.
3. Ширман А.Р., Соловьев А.Д. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Д. Соловьев. – Москва, 1996. – 276 с.
4. Барков А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. – 169 с.
5. Голуб Е.С. Диагностирование судовых технических средств: справочник / Е.С. Голуб, Е.З. Мадорский, Г.Ш. Розенберг. – М.: Транспорт, 1993. – 150 с.

6. Баркова Н.А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования: учебное пособие / Н.А. Баркова. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2003. – 160 с.

7. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин [2-е изд. исправленное]. – М.: Машиностроение, 2000. – 344 с.

В.А. СИДОРОВ

Донецкий национальный технический университет
АНАЛІЗ ВІБРАЦІЙНОГО СИГНАЛУ

Проведено систематизацію, сформульовані правила аналізу параметрів вібрації при проведенні досліджень механічних коливань у лабораторних і промислових умовах.

механічні коливання, параметри вібрації, правила аналізу

V.A. SIDOROV

Donetsk National Technical University
THE VIBRATION SIGNAL ANALYSIS

Systematization is made; rules of the vibration parameters analysis are formulated at conducting of mechanical oscillations researches in laboratory and industrial conditions.

mechanical oscillations, vibration parameters, analysis rules

Рецензент: д.т.н., проф. Нечепасв В.Г.

Надійшла до редколегії 04.11.2009