

## Применение цифровой обработки сигналов

Вибрационный контроль и вибрационная диагностика получили активное развитие в последние 15-20 лет. Это объясняется внедрением в данную научно-техническую область современных средств радиоэлектроники и вычислительной техники, позволившим оперативно решать трудоемкие задачи сигнальной обработки и принятия решений.

Перспективным направлением развития систем вибрационного контроля является их реализация в виде измерительно-вычислительных комплексов в состав которых входят: универсальная ПЭВМ с типизированным модулем АЦП, подключаемым к ее стандартному интерфейсу (ISA, PCI, USB), блок аналоговой обработки исходных вибросигналов и блок управления сигнализацией и защитным отключением. При таком построении основная функциональность комплекса обеспечивается алгоритмическим и программным обеспечением, что позволяет оперативно его адаптировать под решение новых задач.

На рисунке 8.1 представлен один из возможных вариантов исполнения такого комплекса.

Программное обеспечение подобного комплекса двухуровневое.

Функции первого уровня:

- работа в режиме реального времени;
- определение интенсивности вибрации в стандартизованных или задаваемых частотных диапазонах, частоты вращения вала, значений амплитудных и фазовых параметров, по крайней мере, до десяти спектральных составляющих вибрации, кратных частоте вращения (порядковый анализ), пик-фактора исходного сигнала;
- сравнение реально полученных значений с контрольными (величина которых может изменяться от точки к точке и с течением времени) и выработка сигналов (сообщений), выдаваемых на исполнительные и отображающие устройства;
- сохранение получаемых данных в специально структурированных файлах;
- сетевое взаимодействие по данным с другими системами или работа в качестве базовой первичной станции в многоуровневых системах поддержки принятия решений и управления технологическими процессами.

Программным обеспечением (ПО) этого уровня решаются следующие подзадачи:

- реализация пользовательского интерфейса при задании управляющих и настроечных параметров программы;
- взаимодействие с блоком ввода, АЦП и ввод оцифрованных данных в ЭВМ;



Рисунок 8.1- Измерительно вычислительный комплекс для решения задач вибрационного контроля и диагностики механизмов и конструкций

- математическая обработка полученных данных;
- оперативное отображение вычисленных результатов в виде, удобном для восприятия, (численные значения, цветовые шкальные индикаторы, тренды во времени, графики спектров и временных реализаций, динамические модели валопровода, сигнализирующие сообщения);
- реализация функций контроля и выдача управляющих воздействий на исполнительные устройства;
- управление файлами сохраняемых данных на жестком диске.

На рисунке 8.2 показана форма экрана при реализации непрерывного вибрационного контроля.

Комплексы выполняющие функции штатного вибрационного контроля сложных механизмов и агрегатов с вращательным движением (турбоагрегаты, компрессоры, мощные двигатели) работают непрерывно и накапливают большие массивы информации, подлежащие обработке на верхнем уровне, на котором принимаются решения. Основные направления обработки этих данных следующие.

1. Визуализация, или предоставление пользователю информации о техническом состоянии объекта в различных формах отображения, статических (графики трендов, временных реализаций вибросигнала, частотные и взаимные спектры, траектории движения подшипниковых опор и т.п.) или динамических (модели

валопровода, ступенчатые индикаторы, модели движения вала, опор и т.п.). Разнообразие форм позволяет пользователю проанализировать проблему с разных точек зрения и сформировать более полное представление о развивающихся процессах.

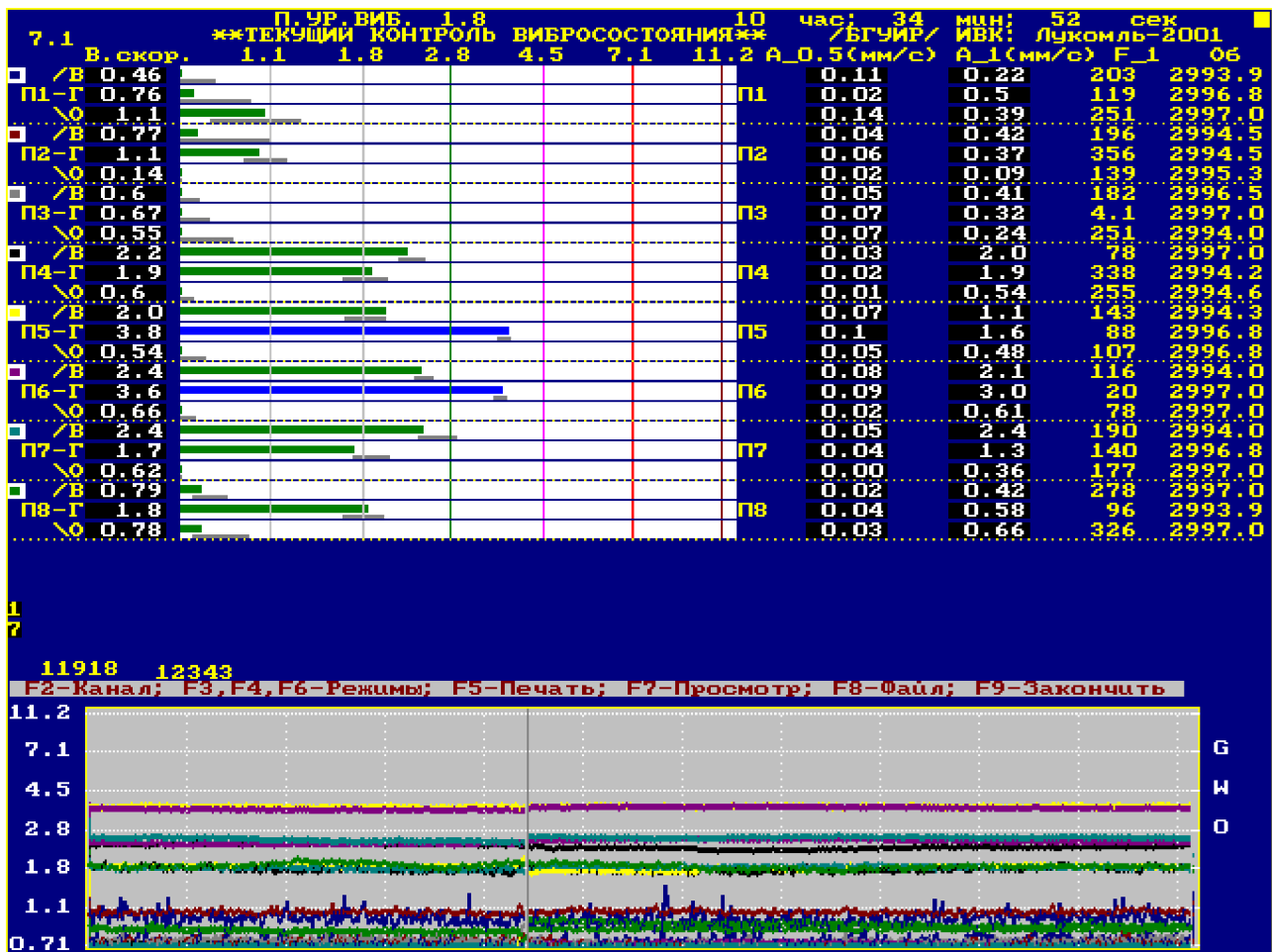


Рисунок 8.2 – Отображение данных при реализации непрерывного вибрационного контроля по 24 каналам

2. Нормализации отдельных групп данных для того, чтобы их можно было сопоставлять в одинаковых координатных осях. Например, при построении вибрационных характеристик выбега, которые представляют зависимость изменения размаха виброперемещения от частоты вращения вала, их следует привести к оси абсцисс, линейной по частоте вращения вала, так как время выбега изменяется от случая к случаю.

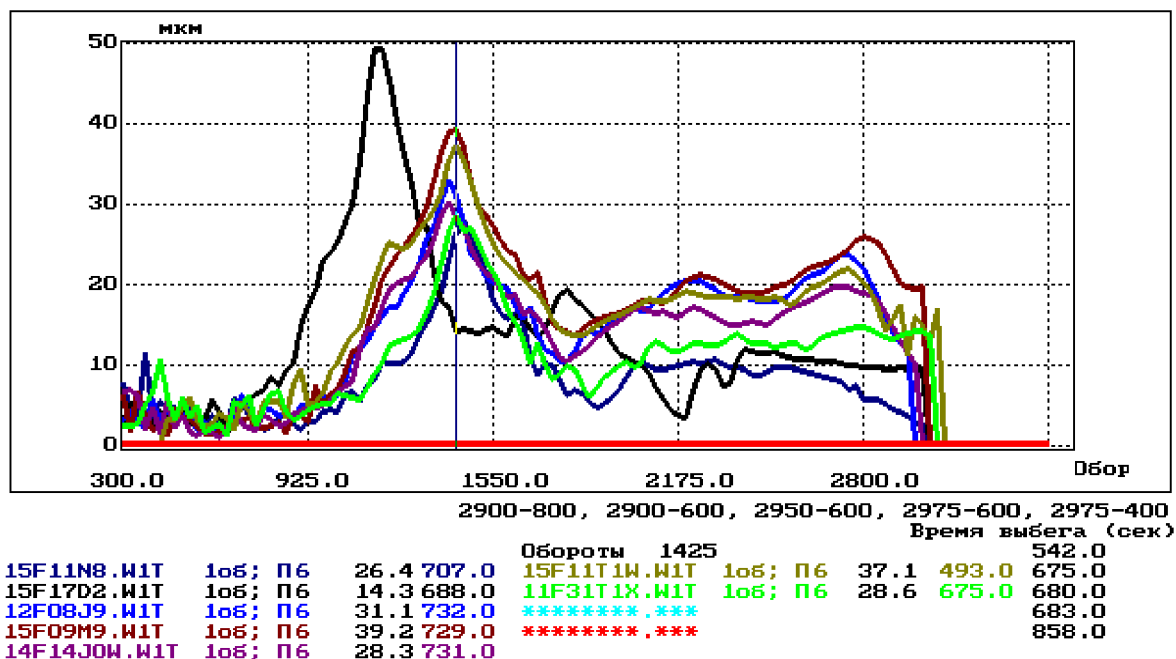


Рисунок 8.3- Нормализованные вибрационные характеристики выбега

3. Определение значений информативных параметров, по которым будет производиться сравнение и взаимный анализ однотипных данных.

4. Принятие решения о подобии векторов информативных параметров, базового и текущего, и формулирование выводов о развитии тех или иных дефектов.

Программные системы этого уровня могут работать в автономном режиме, или в режиме реального времени, как одно из приложений многозадачной операционной системы или как программа ЭВМ, подключенной по сети к системе измерений.

Основными вычислительными алгоритмами систем виброконтроля являются алгоритмы цифровой обработки сигналов: спектральный анализ, цифровая фильтрация, порядковый анализ. Для обеспечения хороших значений метрологических характеристик при обработке реальных сигналов применяется удаление низкочастотных дрейфов и метод определения амплитуды гармонической составляющей, частота которой не кратна базовой частоте спектрального анализа, по значениям соседних спектральных составляющих. Динамика вибрационных явлений оценивается с помощью вейвлет-преобразований, в которых вейвлеты настраиваются на определенную центральную частоту.

Реализация спектрального анализа вибрационных сигналов, полученных при контроле механизмов с вращательным движением, имеет ряд особенностей, которые связаны с тем, что период вращения ротора механизма может быть не кратен временному интервалу, на котором проводится анализ. Если такая кратность присутствует, то в спектре сигнала присутствуют ярко выраженные спектральные составляющие (рисунок 8.4). В противном случае наблюдается размытость спектральных линий (рисунок 8.5) в вычисленном спектре, хотя реально сигнал содержит выраженные спектральные составляющие.

Можно предложить способ борьбы с этим явлением, рассматриваемый далее.

Предположим, что при проведении спектрального анализа с равномерным частотным разрешением производится определение амплитуд спектральных составляющих, которые отстоят друг от друга по частоте на величину кратную  $\Delta f$  - частотному разрешению анализа. Исследуемый сигнал имеет в своем составе гармонические составляющие, не совпадающие с одной из частот равной  $k \cdot \Delta f$ , где  $k$  - целое число.

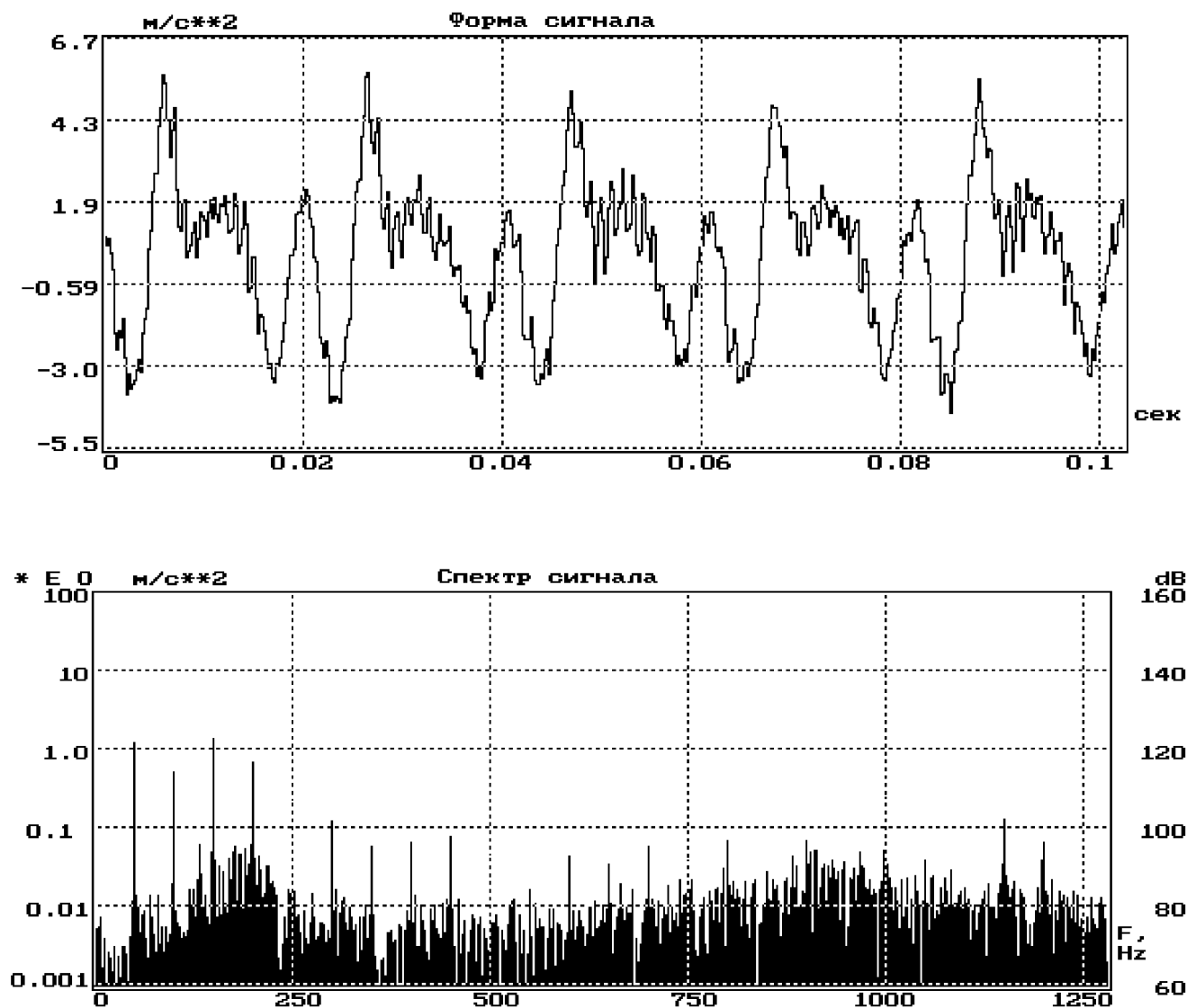


Рисунок 8.4 – Форма и спектр вибрационного сигнала механизма с вращательным движением, когда частота вращения ротора кратна частотному разрешению спектрального анализа



Допустим, что в анализируемом сигнале присутствует гармоническая составляющая с частотой  $\Psi$ , такой, что

$$i \cdot \Delta f < \Psi < (i + 1) \cdot \Delta f, \quad (8.1)$$

а гармонические составляющие с частотами  $i \cdot \Delta f$  и  $(i + 1) \cdot \Delta f$  отсутствуют или имеют значительно меньшую амплитуду по сравнению с ней.

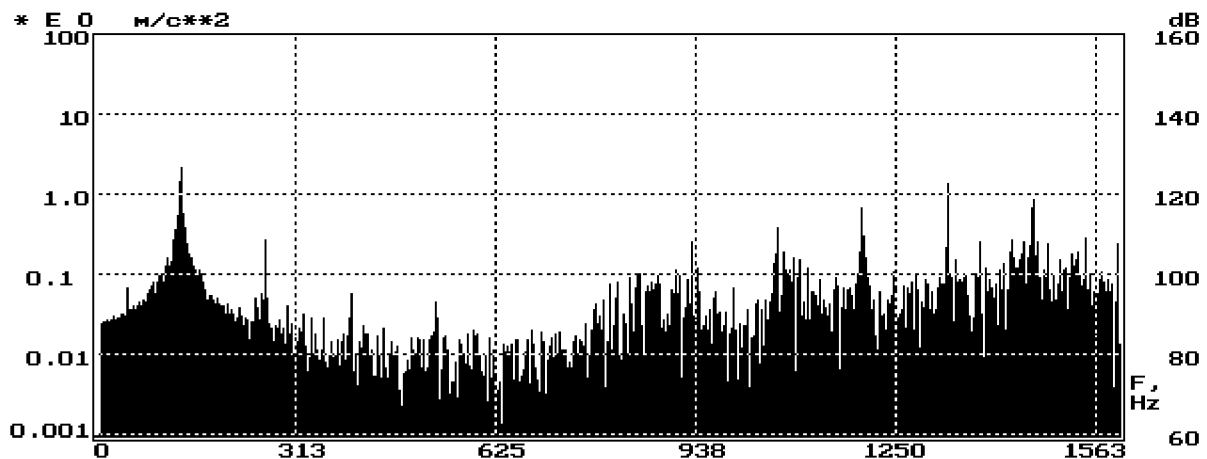


Рисунок 8.5 – Спектр вибрационного сигнала механизма с вращательным движением, когда частота вращения ротора не кратна частотному разрешению спектрального анализа

После проведения спектрального анализа, с применением для выделения интервала анализа сигнала прямоугольного временного окна, будут получены некоторые значения амплитуд спектральных составляющих, соответствующих частотам  $i \cdot \Delta f$  и  $(i + 1) \cdot \Delta f$ . Обозначим их соответственно  $A_i$  и  $A_{i+1}$ .

Введем также обозначение

$$\zeta = (i + 1) \cdot \Delta f - \Psi \quad (8.2)$$

и  $A_\Psi$  - истинное значение амплитуды гармонической составляющей с частотой  $\Psi$ . Тогда, с учетом того, что представление в частотной области прямоугольного временного окна длительностью  $T_a = 1/\Delta f$  описывается выражением

$$X(f) = \frac{\sin(\pi \cdot f \cdot T_a)}{\pi \cdot f}, \quad (8.3)$$

причем,  $X(0) = T_a$ ,  $A_i$  и  $A_{i+1}$  можно выразить через  $A_\Psi$  с помощью соотношений:

$$A_i = A_\Psi \cdot \frac{1}{T_a} \cdot \frac{\sin[\pi(\Delta f - \varsigma)T_a]}{\pi(\Delta f - \varsigma)} = A_\Psi \cdot \frac{1}{T_a} \cdot \frac{\sin\left[\pi\left(1 - \frac{\varsigma}{\Delta f}\right)\right]}{\pi(\Delta f - \varsigma)},$$

$$A_{i+1} = A_\Psi \cdot \frac{1}{T_a} \cdot \frac{\sin(\pi \cdot \varsigma \cdot T_a)}{\pi \cdot \varsigma} = A_\Psi \cdot \frac{1}{T_a} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot \varsigma}{\Delta f}\right)}{\pi \cdot \varsigma}. \quad (8.4)$$

После выполнения преобразований над выражениями (4) определим значение  $\varsigma$  :

$$\frac{A_{i+1}}{A_i} = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot \varsigma}{\Delta f}\right)}{\pi \cdot \varsigma} \cdot \frac{\pi(\Delta f - \varsigma)}{\sin\left[\pi\left(1 - \frac{\varsigma}{\Delta f}\right)\right]} = \frac{\Delta f - \varsigma}{\varsigma};$$

$$\varsigma = \frac{\Delta f}{1 + \frac{A_{i+1}}{A_i}}. \quad (8.5)$$

Теперь можно определить значение частоты  $\Psi$  :

$$\Psi = (i+1) \cdot \Delta f - \varsigma \quad (8.6)$$

и амплитуду гармонической составляющей  $A_\Psi$  :

$$A_\Psi = A_{i+1} \cdot \frac{\pi \frac{\varsigma}{\Delta f}}{\sin\left(\pi \frac{\varsigma}{\Delta f}\right)}. \quad (8.7)$$

Таким образом, значение частоты и амплитуды спектральной составляющей, с частотой не кратной частотному разрешению спектрального анализа можно определить по значениям соседних, по отношению к ней, спектральных составляющих, вычисленных с помощью дискретного преобразования Фурье.

Предложенный способ обеспечивает необходимые для систем вибрационного контроля точностные показатели вычисления амплитуд отдельных спектральных составляющих, кратных частоте вращения.

При анализе нетипичных вибрационных явлений применяются усреднение во временной области относительно фазы конкретной спектральной составляющей и

вейвлет-анализ. Усреднение позволяет подавить флуктуирующие случайным образом составляющие вибрации, а вейвлет-анализ – определить динамику развития процессов в определенных частотных полосах.

В заключение следует отметить, что на предприятия энергетики Республики Беларусь поставлено более 25 систем вибрационного контроля серии «Лукомль», которые эксплуатируются как стационарные штатные системы. Ряд из них работают в режиме автоматики защитного отключения по вибрации. Алгоритм принятия решения об отключении агрегата учитывает значения низкочастотной вибрации, высокочастотной вибрации, обратной составляющей и изменения вектора обратной составляющей, причем конкретный уровень принятия решения по каждому из факторов устанавливается с учетом индивидуальных особенностей технического объекта.