

УДК 621.389, 519.687.7, 519.684.6, 004.514

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА ВИБРОСИГНАЛОВ

В.В. Гренке***, И.В. Шакиров***, А.М. Самойлов*

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: viktor_grenke@hotmail.com

Приводится описание конструкции и принципов работы комплекса для анализа вибросигналов. Особенностью комплекса является применение в нем методов вейвлет-анализа. Показаны особенности вейвлет-преобразования при решении задач вибродиагностики механических систем в сравнении с Фурье-анализом. Создан аппаратно-программный макет измерительного комплекса, проведены его испытания.

Введение

Снижение затрат на техническое обслуживание, повышение надежности, эффективную и безопасную эксплуатацию механического оборудования можно обеспечить, в том числе, и путем создания на предприятии системы мониторинга и диагностики оборудования, основанного на принципах неразрушающего контроля. Одним из направлений, базирующихся на этих принципах, является вибродиагностика подвижных частей механизмов и узлов. На рынке представлено большое количество приборов и систем, позволяющих проводить мониторинг и анализ различного рода механических систем. Однако при их выборе зачастую потребитель сталкивается с разного рода ограничениями, связанными с возможностями предлагаемого оборудования. Например, вейвлет-анализ в устройствах диагностики механических систем еще только начинает применяться и в большинстве приборов не представлен, сказывается также отсутствие поддержки локальной линии связи, истории проводимых измерений, возможности локализовать место в механизме, где предположительно идет процесс разрушения и т. д.

Разработка многоканального аппаратно-программного комплекса для мониторинга и анализа вибросигналов ставит своей целью получить наращиваемую систему с хорошими характеристиками и возможностью использования вейвлет-анализа применительно к сигналам, получаемым от механических систем и устройств, а также многоканальность, возможность соединения в единую мониторинговую сеть, наличие спектрально-временного вейвлет-анализа [1], работа в реальном времени, широкий частотный диапазон, локализация событий методом временной локализации, автоматизация слежения за узлами контролируемых агрегатов, ведение истории измерений.

Применение вейвлет-преобразования для анализа гармонических сигналов

Вейвлет-анализ начинает успешно применяться в вибродиагностике и пока редко встречается в измерительных приборах и комплексах. Наряду с

общепринятыми методами обработки цифровых сигналов применение вейвлет-преобразования для анализа сигналов расширяет возможности изучения данных. Классическое преобразование Фурье является полезным математическим аппаратом для анализа и синтеза простых и периодических сигналов. Оно обладает преимуществом легкой реализации, по сравнению с вейвлет-преобразованием. С другой стороны, вейвлет-преобразование позволяет выявить особенности сигнала в случаях, когда Фурье-преобразование оказывается нечувствительным к особенностям сигнала. На рис. 1 показан пример периодического во времени сигнала с выбросом на положительном полупериоде. Ниже приведены его спектры: Фурье-спектр (рис. 2) и вейвлет-спектр (рис. 3). Из Фурье-спектра видно, что четко выделена только одна гармоника, характеризующая периодический сигнал. О присутствии высокочастотного выброса судить сложно. Приведенный вейвлет-спектр был получен с помощью дискретизированной версии интегрального вейвлет-преобразования с применением гауссова вейвлета второго порядка — «Мексиканская шляпка» [2, 3]. Этот анализирующий вейвлет был выбран экспериментальным путем, как дающий хорошие результаты применительно к анализируемым сигналам. Гауссовы вейвлет-функции являются частными производными от функции Гаусса и определяются следующими соотношениями:

$$\psi_m(t) = (-1)^{m+1} \cdot d_t^m \left[\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \right],$$

$$\hat{\psi}_m(\omega) = m \cdot (i\omega)^m \cdot \exp\left(-\frac{\omega^2}{2}\right),$$

где $d_t^m = d^m[f(t)]/dt^m$, $m \geq 1$. В нашем случае $m=2$.

Из вейвлет-спектра видно, что сигнал периодичен во времени. Об этом говорит присутствие повторяющихся «парабол» на спектрограмме. Особо выражен выброс на одном из полупериодов на спектрограмме, который виден в виде «перевернутого» треугольника. Наличие данного острого пика на спектрограмме позволяет судить не только о присутствии нелинейности в сигнале, но и определить его положение.

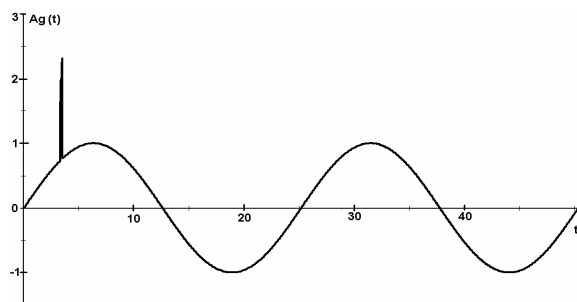


Рис. 1. Пример периодического сигнала с выбросом на положительном полупериоде

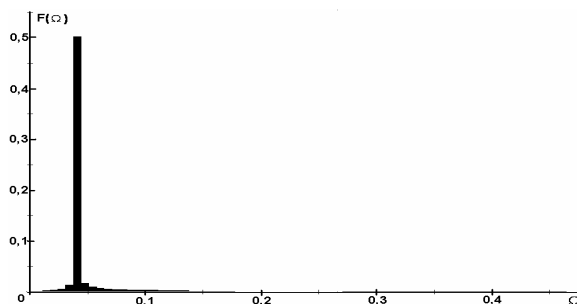


Рис. 2. Фурье-спектр периодического сигнала с выбросом на положительном полупериоде

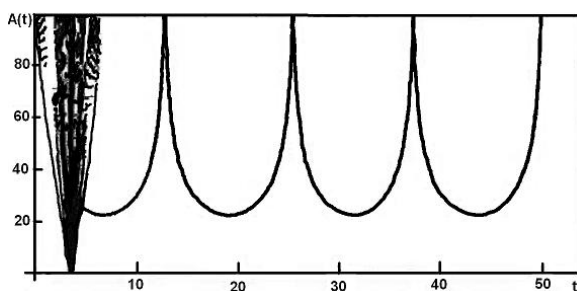


Рис. 3. Вейвлет-спектр периодического сигнала с выбросом на положительном полупериоде

вейвлет-функции, можно полнее выявить и подчеркнуть те или иные свойства анализируемого сигнала, расширяя тем самым возможности для анализа.

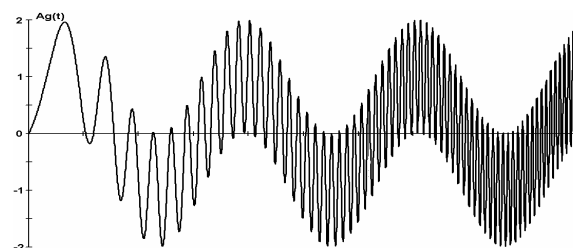


Рис. 4. Пример сложного модельного сигнала

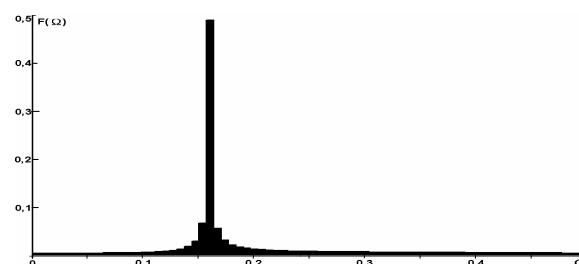


Рис. 5. Фурье-спектр сложного модельного сигнала

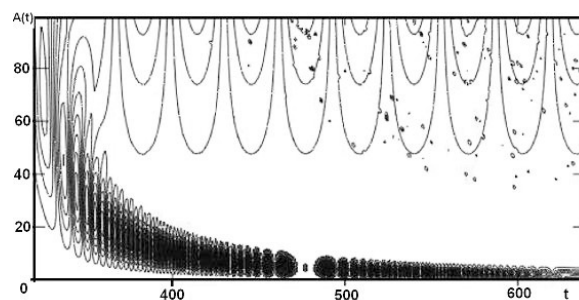


Рис. 6. Вейвлет-спектр сложного модельного сигнала

Далее, на рис. 4 показан пример сложного сигнала с модуляцией по частоте и по амплитуде. Ниже приведены Фурье-спектр (рис. 5) и вейвлет-спектр (рис. 6).

Из Фурье-спектра видна только одна выраженная гармоника, характеризующая модулируемый периодический сигнал. Судить о наличии в сигнале второй модулирующей синусоиды с изменяемой по времени частотой по данному Фурье-спектру невозможно. Из вейвлет-спектра анализируемого модельного сигнала (рис. 6) видно, что присутствуют два сигнала: сигнал с постоянной низкочастотной гармоникой («параболы» сверху) и сигнал с увеличивающейся частотой по времени (нижняя часть спектрограммы). Видно, что модулирующий сигнал изменяется плавно, без скачков. Таким образом, Фурье-анализ приведенного модельного сигнала не позволил выявить наличие локальных особенностей, в то время, как вейвлет-анализ четко указал их с точностью до времени возникновения. Ключевую роль при вейвлет-анализе играет выбор базового вейвлета. Используя различные

Аппаратная часть

При разработке аппаратной части комплекса учитывалось то, что та часть оборудования, которая не является специфической и в задачи которой входят стандартные функции, такие как хранение данных, отображение результатов на экране, интерфейс с пользователем и т. п., должна состоять из готовых стандартных узлов. Это позволяет сократить время разработки, так как дает возможность работать со стандартными средствами. Упрощенная структурная схема аппаратной части комплекса представлена на рис. 7. Аппаратная часть комплекса состоит из многоканального процессорного модуля первичного сбора и обработки данных, связанного с вторичным модулем обработки и вывода на экран посредством Ethernet-интерфейса. Использование Ethernet-интерфейса и специализированного протокола связи позволяет подсоединять к одному вторичному модулю несколько однотипных первичных модулей, что делает структуру комплекса наращиваемой и позволяет проводить мониторинг значительного числа узлов и агрегатов.

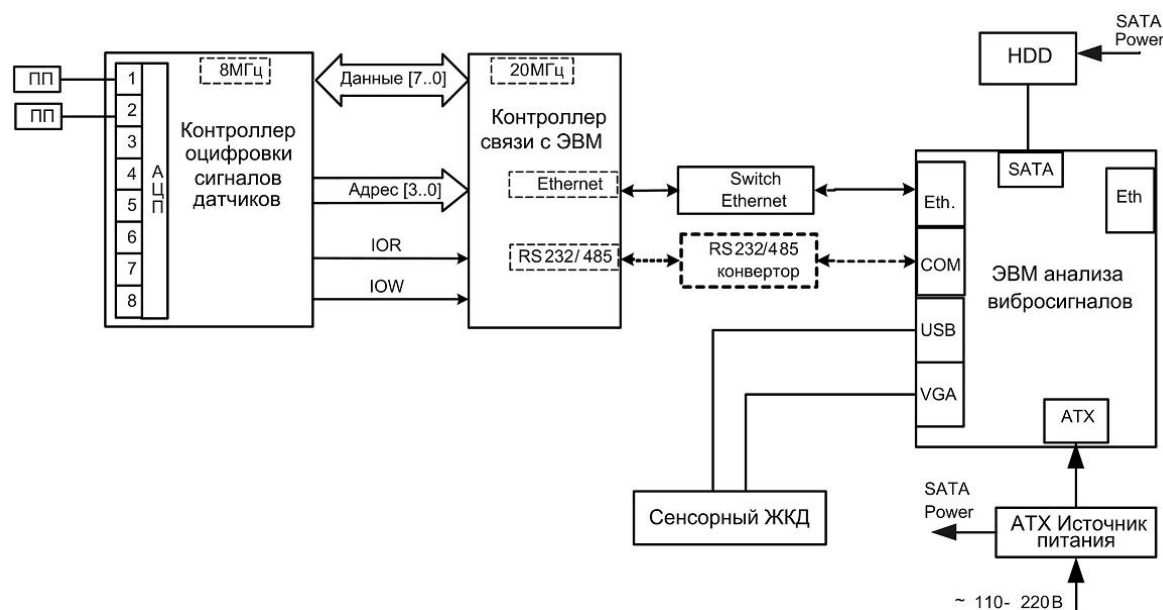


Рис. 7. Упрощенная структурная схема аппаратной части комплекса

В задачи первичного модуля входит оцифровка данных с вибродатчиков, предварительная их обработка, подготовка данных к пересылке во вторичный модуль. Для решения этих задач первичный модуль должен содержать аналого-цифровой преобразователь, микропроцессор и MAC+PHY Ethernet контроллер. Основные характеристики измеряемых параметров определяются большей частью рабочими характеристиками вибродатчика, поэтому погрешность измерения и влияние первичного модуля на вибродатчика минимизированы. Как правило, в качестве вибродатчика применяются акселерометры, преобразующие ускорение в электрический сигнал. На рынке существует большой выбор элементной базы для реализации первичного модуля, остановимся на одной из возможных реализаций. Модуль первичной обработки может быть построен на базе микроконтроллера семейства MSP430 (Texas Instruments) и CS8900A в качестве MAC+PHY Ethernet контроллера (Crystal Semiconductor Corporation). Модуль, реализованный на этой элементной базе, способен решить поставленные перед ним задачи.

В качестве вторичного модуля целесообразно применить компьютер под управлением операционной системы Linux с материнской платой формата mini-ITX (размер 170×170 мм) и сенсорным жидкокристаллическим дисплеем. Например, плата EMB-9680 от компании Evalue Technology имеет широкую функциональность и низкую стоимость. Она поддерживает процессоры Intel Pentium M и Celeron M с частотой системной шины 400/533 МГц. Модель EMB-9680 построена на основе чипсета Intel 915GM (южный мост ICH6-M) и снабжена встроенным графическим контроллером Intel Graphics Media Accelerator 900 (Intel GMA 900), сетевым контроллером 10/100 Ethernet. Максимальный объем оперативной памяти DDR SDRAM составляет 1 Гб, допускается подключение

двух устройств с последовательным интерфейсом Serial ATA (пропускная способность до 150 Мб/с). Плата рассчитана на работу под управлением операционной системы Linux. Таким образом, аппаратная часть частично реализуется на стандартных решениях, что значительно ускоряет разработку и позволяет быстро адаптировать комплекс под быстро меняющиеся технологии.

Программная часть

Программная часть комплекса состоит из функциональных программных модулей, осуществляющих преобразование виброданных, их первичную обработку, передачу на устройство, осуществляющее вторичную обработку, анализ, вывод и сохранение полученных данных. На рис. 8 представлена упрощенная структурная схема программной части, состоящая из двух основных модулей: программное обеспечение контроллера (первичный модуль) и программное обеспечение ЭВМ (вторичный модуль). В свою очередь, программное обеспечение контроллера (первичный модуль) состоит из двух частей: модуля первичной обработки сигнала и модуля конфигурации и обмена данными. Модуль первичной обработки сигнала реализован в прототипе виброанализатора [4]. Модуль конфигурации и обмена данными обеспечивает связь контроллера с ЭВМ посредством интерфейса связи.

Программное обеспечение ЭВМ состоит из трех основных частей: модуля конфигурации и обмена данными, модуля математической обработки данных, модуля организации взаимодействия оператора и ЭВМ. Модуль конфигурации и обмена данными имеет аналогичные функции, как и у одноименного модуля контроллера. Отличием этого модуля является наличие транспортного компонента, который служит для сопряжения программного обес-

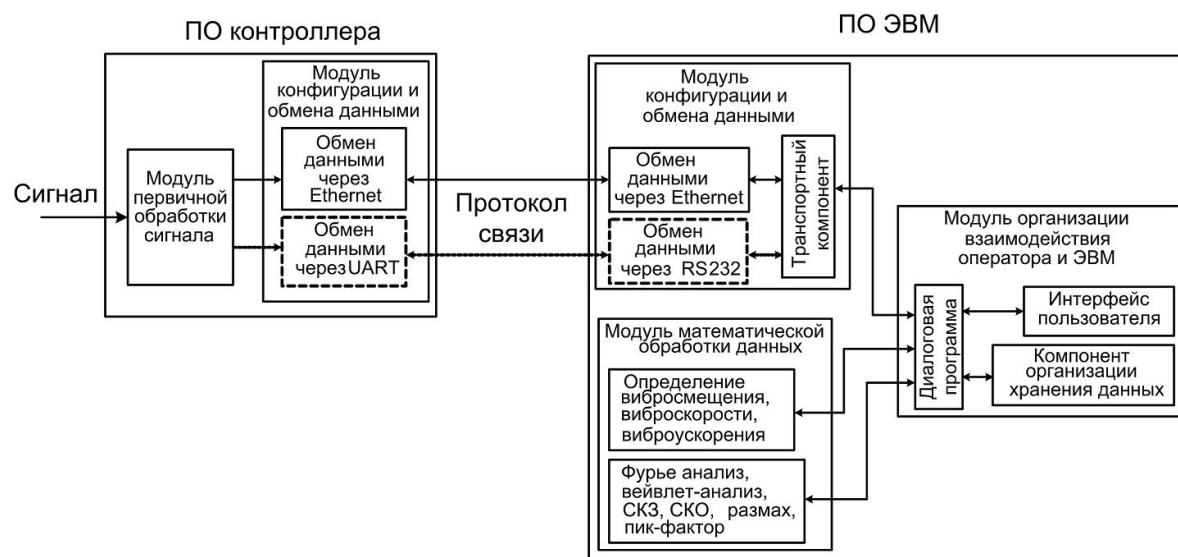


Рис. 8. Упрощенная структурная схема программной части

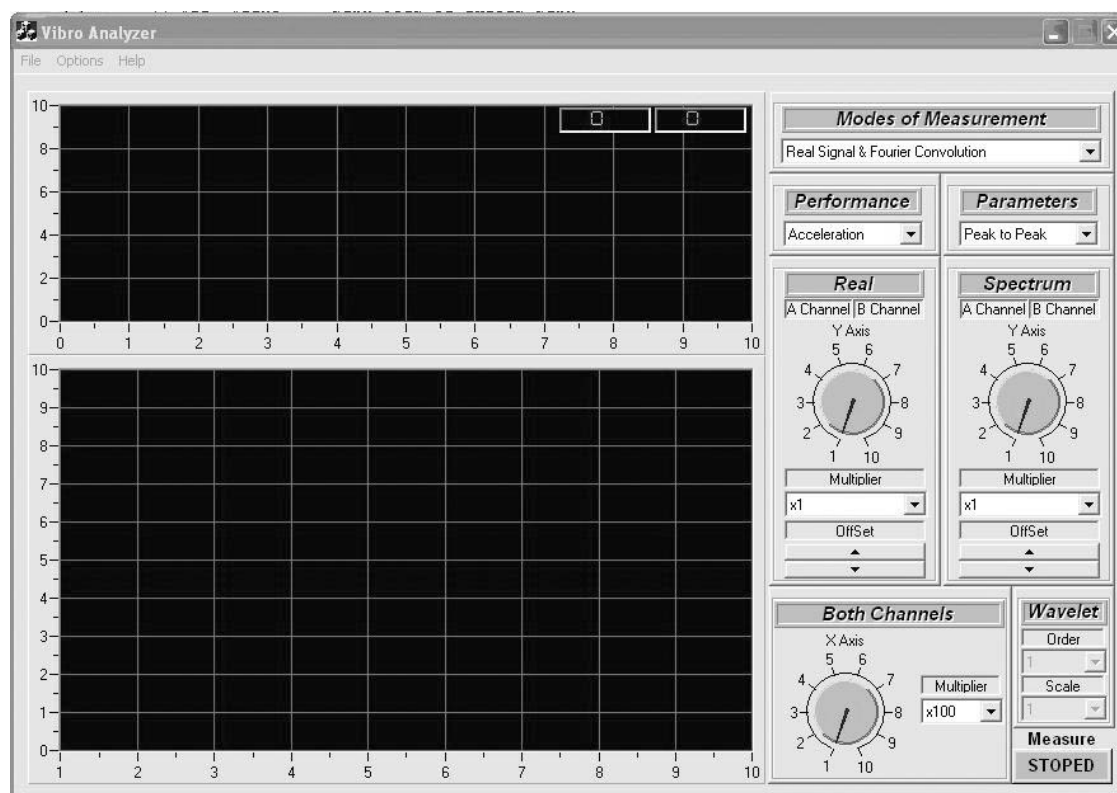


Рис. 9. Внешний вид пользовательского интерфейса программы виброанализатора

печения с различными видами аппаратных интерфейсов связи. Назначением модуля математической обработки данных является исследование поведения сигнала в режиме осциллографа, оценка основных параметров вибросигнала, проведение Фурье- и вейвлет-анализа. Связь контроллера и ЭВМ осуществляется посредством разработанного протокола связи, благодаря которому можно реализовать разветвленную систему сбора данных с пер-

вичных модулей. На рис. 9 приведен внешний вид рабочей программы виброанализатора.

Пользовательское приложение на экране монитора одновременно отображает сигнал в режиме реального времени, его спектр, а также одни из параметров: среднееквадратическое значение, среднееквадратическое отклонение, размах или пик-фактор. Перечислим основные функции, реализованные в данной программе:

1. выбор преобразования (Фурье или вейвлет), базисного вейвлета, его масштаба (или диапазона масштабов);
2. выбор измеряемого вибропараметра (ускорение, скорость или смещение), а также параметра, характеризующего сигнал (среднеквадратическое значение и отклонение, размах, пик-фактор);
3. изменение коэффициента усиления по ординате и абсциссе;
4. отображение/скрытие сигнала или его спектра для отдельного канала;
5. добавление постоянной составляющей к сигналу или его спектру.

Дополнительные функции: выбор аппаратного интерфейса, запуск/остановка измерения, запись/чтение данных из файла и вывод их на экран, синхронизация работы первичных модулей обработки, мониторинг состояния оборудования самой системы.

Действующий макет комплекса

Лабораторный макет аппаратно-программного комплекса виброанализатора разработан в рамках работ по проведению лабораторных исследований неразрушающего контроля подвижных механизмов и узлов. На рис. 10 показан внешний вид дей-

ствующего макета аппаратно-программного комплекса виброанализатора.

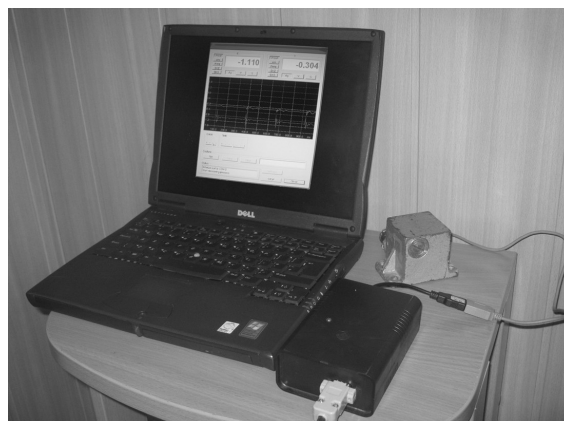


Рис. 10. Внешний вид макета аппаратно-программного комплекса виброанализатора

Прототип модуля первичной обработки [4] реализован на основе акселерометра ADXL210, отладочного набора AsmegaM от фирмы ArgusSoft и разработанного специально для него программного обеспечения. В качестве модуля вторичной обработки используется персональный компьютер с разработанным для него программным обеспечением на языке C/C++. Приведем примеры сигналов и результаты, полученные с помощью дей-

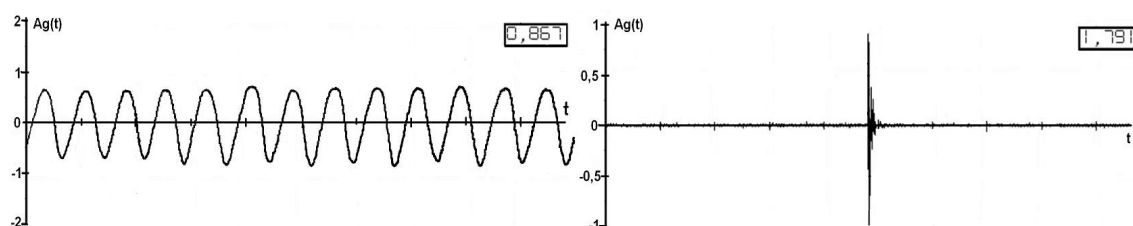


Рис. 11. Графики гармонического и импульсного сигналов на входе макета

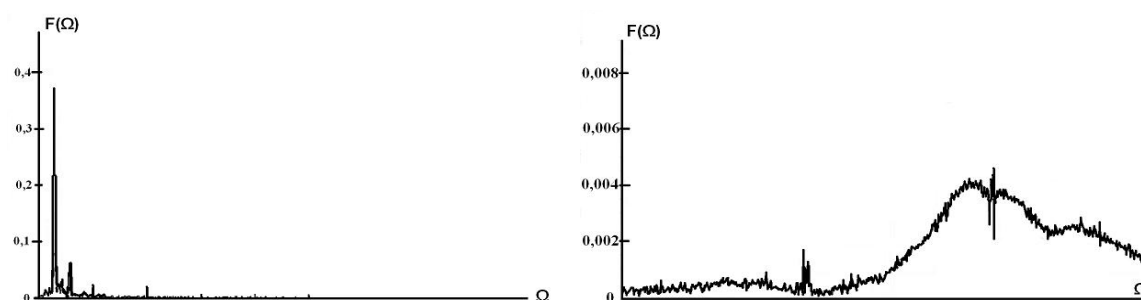


Рис. 12. Фурье-спектры гармонического и импульсного входных сигналов, полученные на макете

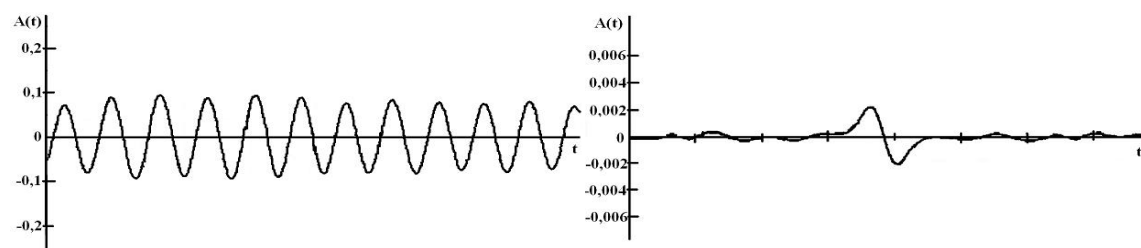


Рис. 13. Срезы вейвлет-спектров гармонического и импульсного входных сигналов, полученные на макете

ствующего макета при их обработке в режиме реального времени. На рис. 11 показаны графики гармонического и импульсного входных сигналов, полученных с модуля первичного преобразования. На рис. 12, 13 приведены Фурье- и вейвлет-спектры этих сигналов соответственно.

Выводы

Применение вейвлет-преобразования в аппаратно-программном комплексе виброанализатора дает возможность проводить детальный частотно-временной анализ вибросигналов. Как показывает эксперимент, это преобразование позволяет наиболее

подробно изучать свойства измеряемых сигналов вибрации. Представлены различия в информативности Фурье- и вейвлет-спектров на примере тестовых сигналов. Обеспечение измерения вибросигналов для большого числа точек и организация разветвленной системы сбора информации о состоянии диагностируемого оборудования стало возможным благодаря применению протокола связи, специально разработанного для организации сети между модулем вторичной обработки и множеством модулей первичной обработки. На базе реализованного макета аппаратно-программного комплекса проведены лабораторные исследования и испытания, необходимые для создания серийного образца устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.
2. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 1145–1170.
3. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.

4. Гренке В.В., Светлаков А.А. Портативный аппаратно-программный анализатор вибраций технологического оборудования и его узлов // Современные средства и системы автоматизации: Матер. Всеросс. научно-практ. конф. молодых ученых. – 21–23 октября 2003 г. – Томск, 2003. – С. 95–98.

Поступила 31.10.2006 г.

УДК 514.88, 514.112.3, 535.015

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ СТЕРЕОДАЛЬНОМЕРА

А.М. Самойлов*, В.В. Гренке***, И.В. Шакиров***

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: sam_anton_mih@ngs.ru

Показано решение задачи определения координат совокупности движущихся объектов при работе телевизионного стереодальномера. Описана методика оценки точности определения их координат. Приведены результаты применения методики на макете телевизионного стереодальномера.

Введение

Дальномеры применяют для определения расстояний до объектов [1]. Часто возникает задача применения автоматизированных измерительных комплексов, способных наблюдать за местностью больших размеров и определять координаты всех находящихся в ней объектов. При этом объекты могут быть подвижными, то есть их координаты могут изменяться с течением времени. Дополнительно требуется идентификация объектов по определенным признакам. Большинство дальномеров (лазерные, оптические) требуют целеуказания (направления) на объект и позволяют одновременно определять расстояние только до одного объекта, либо до группы объектов, находящихся на небольшом расстоянии друг от друга. Кроме того, они неспособны описать объект наблюдения по определенным признакам. Таким образом, при по-

строении автоматизированных измерительных комплексов для решения задач подобного уровня использование стандартных дальномеров оказывается нецелесообразным.

В комплексе задачу определения координат объектов, находящихся на обширной территории, и их идентификацию можно решить на базе оптического телевизионного стереодальномера, работающего по принципу человеческих глаз. То есть удаление объекта от системы, состоящей из двух разнесенных телевизионных камер, работающих синхронно, определяется величиной смещения объекта на обоих изображениях. Точность определения координат объекта различна для разных участков стереозоны, и ее величина зависит от ряда параметров системы и удаленности объекта. Следовательно, ставится задача расчета ошибки определения координат объекта в стереозоне и за-