



УДК 004.421.2:534–16

П. Ю. Бранцевич, В. Э. Базаревский

*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИМЕРОВ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Рассмотрены вопросы применения результатов работы научно-исследовательской лаборатории вибродиагностических систем при обучении студентов специальности «Программное обеспечение информационных технологий» предмету цифровая обработка сигналов. Отмечена практическая направленность данного предмета и его важность при решении прикладных технических задач. Предлагается реализация интернет-ресурса для обработки сигнальных данных.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, вибрация, обучение.

P. Ju. Brancevich, V. E. Bazarevsky

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Belarus*

APPLICATION OF VIBRATION MONITORING SOLUTIONS EXAMPLES IN SCOPE OF RESEARCH IN DIGITAL SIGNAL PROCESSING ALGORITHMS

We cover vibrodiagnostic systems laboratory research issues while students studying of digital signal processing discipline in «software information technology» specialty. We notice practical orientation of the subject and its importance while practical engineering problems solving. We suggest internet resource implementation for signal data processing.

Key words: Digital signal processing, vibration, training.

При решении многих технических задач, связанных с обработкой реальных данных, активно применяются современные компьютерные средства и технологии, которые реализуют различные методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов. Поэтому при подготовке специалистов в области компьютерной техники и программирования, одной из сфер профессиональной деятельности которых является разработка и эксплуатация подобных устройств и систем, требуется существенное внимание уделять данной предметной обла-

сти. Учебные программы предметов, связанных с вопросами цифровой обработки сигналов (ЦОС), как правило, включают такие разделы, как спектральный анализ, цифровая фильтрация, численное интегрирование, сглаживание данных, вейвлет-анализ, которые базируются на соответствующих разделах математики. Однако просто формальное изложение данного материала в ходе учебного процесса вызывает у студентов некоторое непонимание его практической применимости. Поэтому для лучшего понимания и усвоения вопросов цифровой обработки сигналов и данных весьма полезно теоретические сведе-

ния сопровождать реальными примерами их использования при решении конкретных прикладных задач.

Практически все основные методы и алгоритмы ЦОС используются при решении задач вибрационного контроля, мониторинга и диагностики. При этом приходится обеспечивать достижение высокой точности определения параметров вибросигналов при наличии различных возмущающих факторов и помех, а также реализовывать различные специальные методы выделения информативно значимых признаков.

В результате выполнения работ научно-исследовательской лабораторией вибродиагностических систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники получен большой объем экспериментальных данных, разработаны алгоритмы и программные средства, которые позволяют осуществить наглядную демонстрацию применения алгоритмов ЦОС.

Вибрационные сигналы, полученные при исследовании работы механизмов и агре-

гатов с вращательным движением (рис. 1), представляют собой композицию периодической $p(nt_d)$ и шумоподобной $s(nt_d)$ составляющих:

$$x(nt_d) = p(nt_d) + s(nt_d) = \sum_{m=1}^L A_m \cos[2\pi k_m f_o n t_d - \phi_m] + s(nt_d), \quad (1)$$

где n – номер дискретного отсчета, $n = 0, 1, 2, \dots$; t_d – интервал дискретизации; f_o – частота вращения приводного вала (оборотная частота); k_m – кратность m -й гармоники, включенной в периодическую составляющую, относительно f_o ; A_m, f_m, ϕ_m – амплитуда, частота, начальная фаза m -й гармоники, $f_m = k_m f_o$; L – число гармоник в периодической составляющей вибросигнала.

Кратность гармоник, входящих в состав периодической составляющей вибросигнала, определяется с учетом параметров подшипников, зубчатых передач, схемы редуктора контролируемого узла и его других

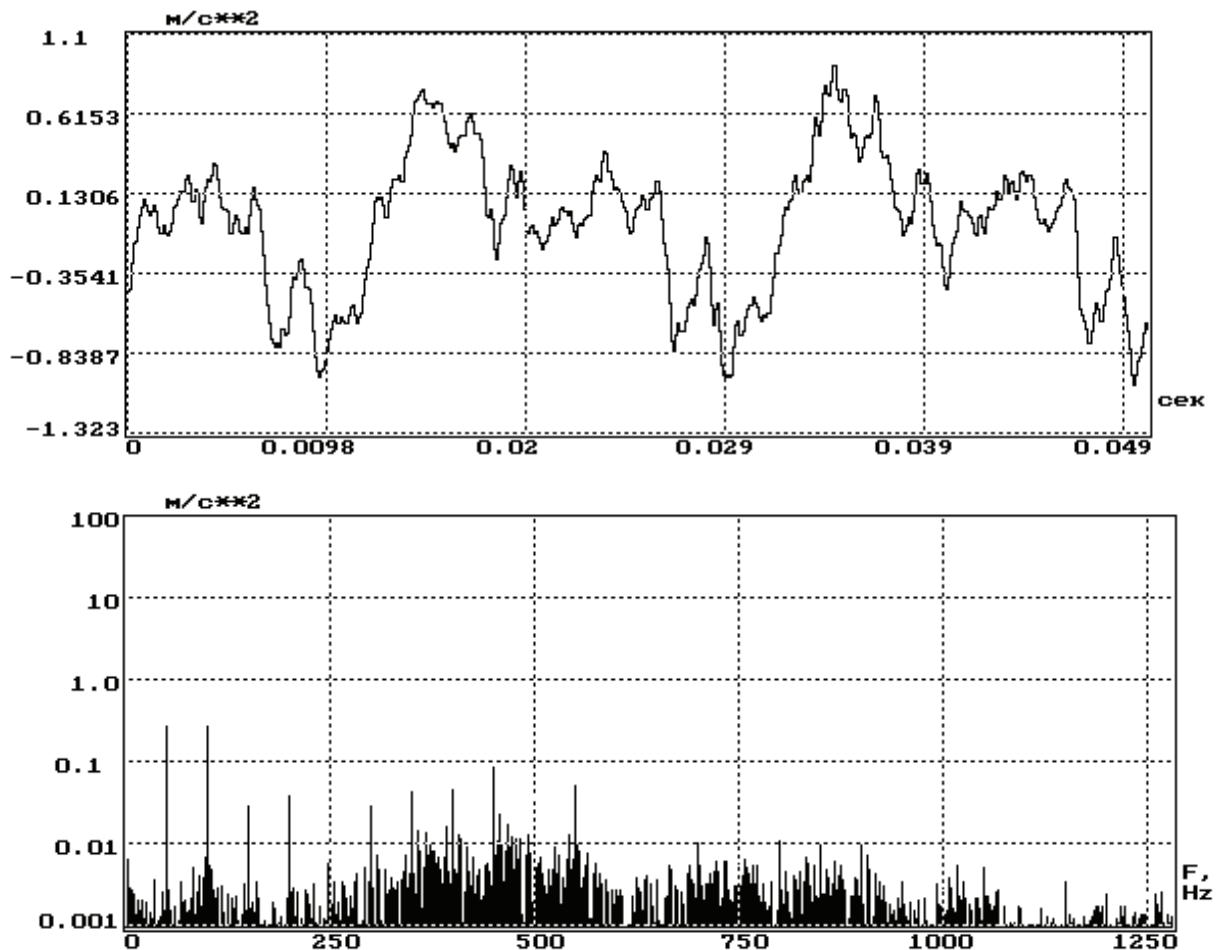


Рис. 1. Временная реализация и амплитудный спектр вибрационного сигнала

конструктивных особенностей. Если точно известна частота f_0 , то амплитуда и начальная фаза m -й гармоники легко вычисляются с помощью дискретного преобразования Фурье, причем количество дискретных точек преобразования выбирается таким, чтобы интервал анализа был кратным (в рамках возможностей интервала дискретизации) периоду f_m .

Однако на практике для контроля вибрации часто используют приборы, в которых отсутствует измерительный канал для фазового датчика, применяемого для определения частоты вращения и фазовых сдвигов оборотных составляющих вибрации. Традиционный же спектральный анализ позволяет точно вычислить первую и другие оборотные частоты только в том случае, если они кратны фундаментальной частоте спектрального анализа. При проведении исследований вибрационно-го состояния реальных объектов такой кратности удается достигнуть далеко не всегда. Следствие этого – размывание оборотной частотной составляющей по соседним спектральным линиям и проблемы с определением её значения.

Теоретические и экспериментальные исследования [1–3] показали, что частоту и амплитуду оборотной составляющей можно определить с хорошей точностью, используя следующие выражения:

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

$$A_{f_o} = \frac{A_i \cdot A_{i+1}}{A_i + A_{i+1}} \cdot \frac{\pi}{\sin \left(\pi \frac{A_i}{A_i + A_{i+1}} \right)},$$

где Δf – частотное разрешение спектрального анализа; A_i, A_{i+1} – амплитуды спектральных составляющих, являющихся ближайшими в меньшую и большую сторону относительно оборотной частоты.

Когда частота f_0 найдена, периодическая составляющая сигнала $p(nt_d)$ вычисляется по формуле левого слагаемого выражения (1), а шумоподобная составляющая находится как

$$s(nt_d) = x(nt_d) - p(nt_d).$$

Далее выполняется раздельная обработка выделенных составляющих и определяются их параметры.

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты разложения вибрационного

сигнала, изображенного на рис. 1, на периодическую и шумоподобную составляющие.

Вычисление амплитудного спектра сигнала осуществляется с помощью алгоритмов дискретного и быстрого преобразования Фурье. Для отображения исходных временных реализаций сигналов и их спектров в ходе лабораторных работ студентами разрабатываются программы, реализующие данные функции. При этом существенное влияние уделяется вопросам представления шкал. Для отображения амплитудного спектра используется как линейная, так и логарифмическая шкала. Последняя шкала позволяет детально рассмотреть малые (тысячные и сотые) и большие (десятки и сотни) значения отображаемых данных.

Исходные вибрационные сигналы обычно представлены в единицах ускорения. Переход к единицам виброскорости и виброперемещения, в которых обычно осуществляется нормирование допустимых уровней вибрации, производится с помощью интегрирования. Интегрирование выполняется во временной или в частотной областях. Вычисление параметров вибрации механизмов осуществляется в определенных частотных полосах (например, 10–1000 Гц). Для выделения сигналов в этих полосах применяется цифровая фильтрация, реализуемая различными способами [2].

На вычисление амплитудного спектра сигнала сильное искажающее воздействие, проявляющееся в «замазывании» низкочастотной области, оказывают его медленные дрейфы (рис. 3), которые могут возникать при быстром изменении температуры контролируемого объекта, температуры первичного датчика или изменении питающих напряжений согласующих усилителей.

Для выявления характера изменения зашумленного, но вместе с тем достаточно медленно изменяющегося сигнала на каком-то временном отрезке, можно найти описание этого изменения в виде алгебраического многочлена, причем для практического применения можно ограничиться первой или второй степенью этого многочлена.

Так как многочлен должен описывать дрейф на всем интервале анализа, то он может быть найден как среднеквадратическое приближение в виде полинома:

$$P_n(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_nx^n.$$

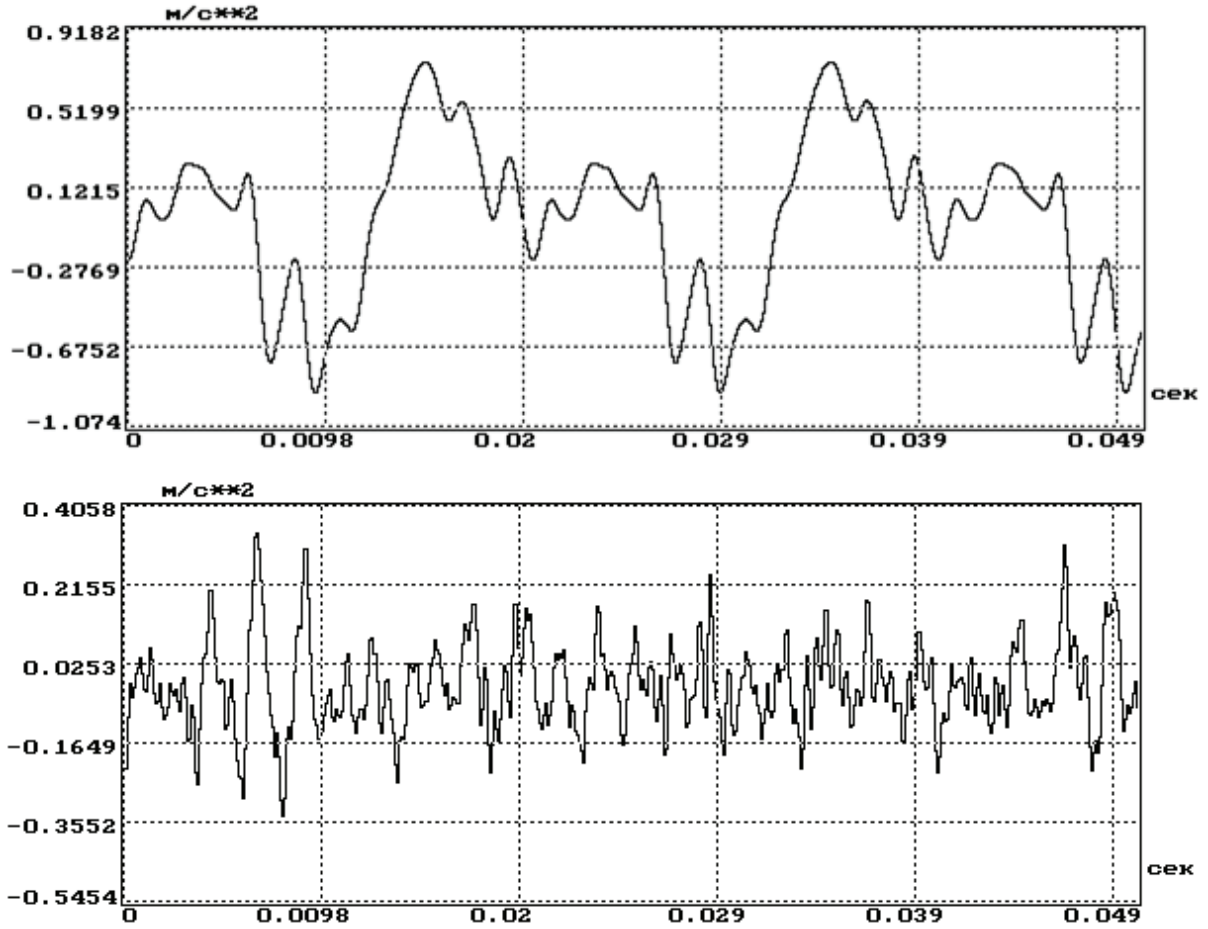


Рис. 2. Периодическая и шумоподобная составляющие вибрационного сигнала

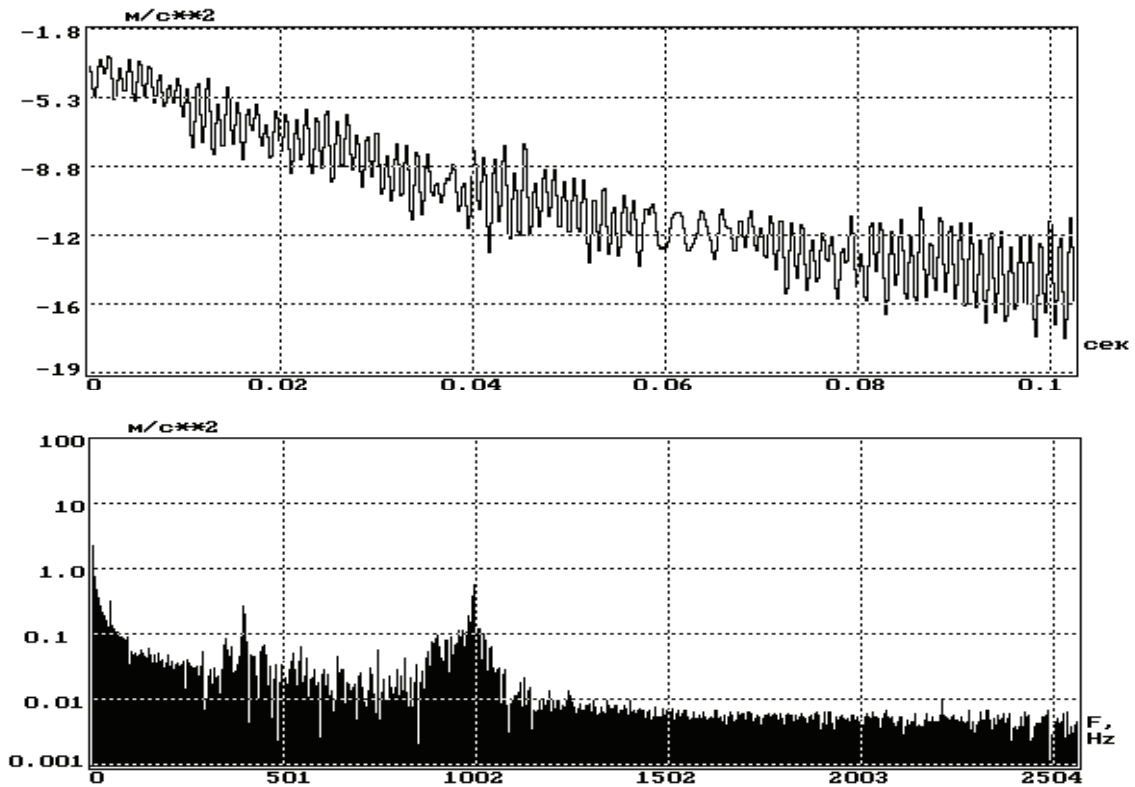


Рис. 3. Форма и амплитудный спектр вибросигнала при наличии дрейфа

Значения коэффициентов многочлена наилучшего приближения находятся путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} c_0 s_{00} + c_1 s_{10} + c_2 s_{20} + \dots + c_n s_{n0} = r_0; \\ c_0 s_{01} + c_1 s_{11} + c_2 s_{21} + \dots + c_n s_{n1} = r_1; \\ \dots\dots\dots \\ c_0 s_{0n} + c_1 s_{1n} + c_2 s_{2n} + \dots + c_n s_{nn} = r_n. \end{cases}$$

Для функции $f(x)$, представленной в дискретном виде, со значениями аргумента от 0 до $N - 1$:

$$s_{ij} = \sum_{x=0}^{N-1} x^{i+j};$$

$$r_i = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \cdot x^i.$$

На практике для описания низкочастотного дрейфа целесообразно применять полиномы первой или второй степени. Для полинома первой степени система уравнений имеет вид

$$\begin{cases} c_0 s_{00} + c_1 s_{10} = r_0; \\ c_0 s_{01} + c_1 s_{11} = r_1. \end{cases}$$

Решая эту систему, получим:

$$c_0 = (r_1 s_{10} - r_0 s_{11}) / (s_{01} s_{10} - s_{00} s_{11});$$

$$c_1 = (r_0 s_{01} - r_1 s_{00}) / (s_{01} s_{10} - s_{00} s_{11}).$$

Для полинома второй степени система принимает вид

$$\begin{cases} c_0 s_{00} + c_1 s_{10} + c_2 s_{20} = r_0; \\ c_0 s_{01} + c_1 s_{11} + c_2 s_{21} = r_1; \\ c_0 s_{02} + c_1 s_{12} + c_2 s_{22} = r_2. \end{cases}$$

В этой системе значения коэффициентов S определяются выражениями:

$$s_{00} = \sum_{x=0}^{N-1} 1 = N;$$

$$s_{10} = s_{01} = \sum_{x=0}^{N-1} x = N(N-1)/2;$$

$$s_{11} = s_{20} = s_{02} = \sum_{x=0}^{N-1} x^2 = N(N-1)(2N-1)/6;$$

$$s_{12} = s_{21} = \sum_{x=0}^{N-1} x^3 = N^2(N-1)^2/6;$$

$$s_{22} = \sum_{x=0}^{N-1} x^4 = \left[N(N-1)(2N-1)(3(N-1)^2 + 3(N-1)-1) \right] / 30,$$

а коэффициенты r рассчитываются по формулам:

$$r_0 = \sum_{x=0}^{N-1} f(x);$$

$$r_1 = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \cdot x;$$

$$r_2 = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \cdot x^2.$$

Применив метод определителей для решения системы, можно получить коэффициенты для полинома второй степени:

$$c_0 = D_0/D;$$

$$c_1 = D_1/D;$$

$$c_2 = D_2/D,$$

где

$$D = k_0 k_2 k_4 + 2k_1 k_2 k_3 - k_1^2 k_4 - k_0 k_3^2 - k_2^3;$$

$$D_0 = r_0 k_2 k_4 + k_3 (r_2 k_1 + r_1 k_2) - r_1 k_1 k_4 - r_0 k_3^2 - r_2 k_2^2;$$

$$D_1 = r_1 k_0 k_4 + k_2 (r_0 k_2 + r_2 k_1) - r_2 k_0 k_3 - r_1 k_2^2 - r_0 k_1 k_4;$$

$$D_2 = k_2 (r_1 k_1 + r_2 k_0) + r_0 k_1 k_3 - r_0 k_2^2 - r_2 k_1^2 - r_1 k_0 k_3;$$

$$k_0 = s_{00}; \quad k_1 = s_{01} = s_{10};$$

$$k_2 = s_{02} = s_{11} = s_{20};$$

$$k_3 = s_{12} = s_{21}; \quad k_4 = s_{22}.$$

Путем вычитания значений полинома с вычисленными коэффициентами из исходного сигнала производится удаление медленно дрейфа, что позволяет демаскировать низкочастотную область (рис. 4) [4].

В ходе развития вибрационных процессов могут возникать различные аномальные явления, связанные с зарождением и развитием дефектов технических объектов или с какими-то другими причинами. Для оценки динамики изменения вибросигнала в той или иной частотной зоне используется вейвлет-анализ, с настройкой центральной частоты вейвлета на определенное значение. Также решаются задачи сглаживания данных [5].

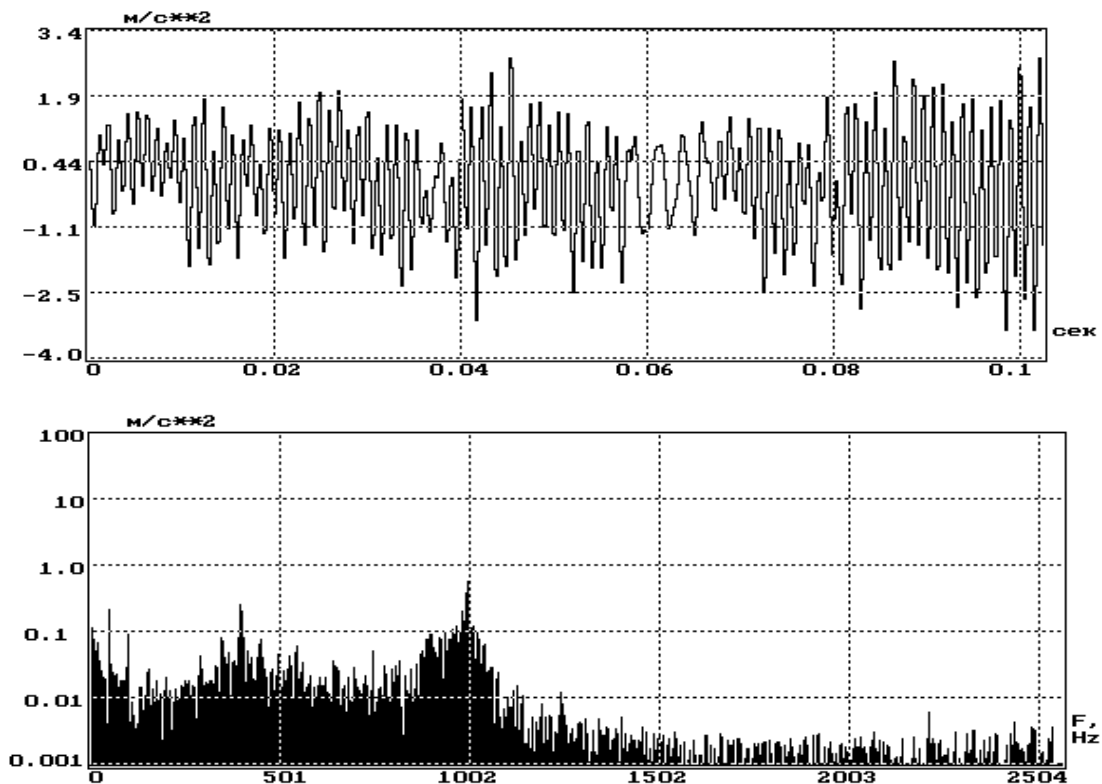


Рис. 4. Форма и амплитудный спектр вибросигнала после удаления низкочастотного дрейфа

Таким образом, в системах вибрационного контроля, мониторинга, диагностики реализуются самые разнообразные алгоритмы цифровой обработки сигналов, и примеры из реальной практики позволяют проиллюстрировать теоретический материал цифровой обработки сигналов и показать его прикладную значимость.

Расширение пропускной способности каналов передачи данных и развитие технологий браузерной визуализации позволяет создавать интерактивные приложения по обработке и отображению сложной графической информации. В качестве задачи, подлежащей решению в рамках подобных приложений, может рассматриваться задача визуализации вибросигналов, их спектров, каскадов спектров, вейвлетов, а также других результатов преобразований в рамках браузерного HTML5 приложения.

Помимо алгоритмических и аналитических задач, специфичных только для сферы вибродиагностики и цифровой обработки сигналов, такая система должна соответствовать ряду общесистемных требований:

- независимость от какой-либо аппаратно-программной архитектуры;
- поддержка распределенной обработки;
- работа в рамках протоколов Http и Https в сети Интернет;

- наличие ряда мобильных клиентов, а также возможность сравнительно легкого добавления новых мобильных клиентов;
- система должна содержать алгоритмическое ядро, способное к переносу на каждый распределенный компонент системы, вне зависимости от его программно-аппаратной реализации, и при этом обеспечивать согласованность в работе со всеми остальными компонентами системы;
- наличие функционала верификации согласованной работы всех своих компонентов;
- горизонтальная масштабируемость;
- невысокая стоимость разработки и эксплуатации;
- предоставление своего функционала сторонним пользователям как услуги;
- наличие аналитического функционала для определения степени собственного использования, наиболее и наименее популярных компонентов для корректировки и развития функциональных возможностей системы в процессе поддержки и для планирования новых версий системы;
- наличие функционала аудита и протоколирования наиболее существенных действий пользователя для отслеживания истории изменения состояния исследуемых объектов и результатов их исследования;

- запрет доступа пользователей одних организаций к данным пользователей других организаций, а также поддержка ряда мер, исключающих доступ к секретным (или скрытым) сведениям чужих пользователей;
- мобильные компоненты системы, а также компоненты стационарных компьютеров и ноутбуков должны содержать функционал интеграции собственного программного обеспечения с аппаратно-программными комплексами сбора и оцифровки вибрационных сигналов и данных.

Вопросы создания подобных программных средств являются предметом исследования в ходе выполнения научно-исследовательских работ студентами, магистрантами и аспирантами, а также изучаются при выполнении практических и лабораторных работ.

Создание интернет-приложений, ориентированных на проведение исследований различных по структуре цифровых сигналов и выполняющихся как на настольных, так и на мобильных платформах, позволит предоставить новые возможности обучения студентов и проведения научно-технических работ.

Библиографические ссылки

1. Бранцевич П. Ю., Базаревский В. Э., Костюк С. Ф. Применение разложения вибрационных сигналов на периодическую и шумоподобную составляющие при исследовании технического состояния механизмов с вращательным движением // Механика 2011 : сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике. Минск : Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси, 2011. Т. II. С. 27–31.
2. Бранцевич П. Ю. Применение цифровой обработки сигналов в системах вибрационного контроля // Электроника инфо. 2010. № 1. С. 36–38.
3. Бранцевич П. Ю. ИВК «Лукомль-2001» для вибрационного контроля // Энергетика и ТЭК. 2008. № 12 (69). С. 19–21.
4. Бранцевич П. Ю. Способ удаления низкочастотного дрейфа при обработке экспериментальных данных // Актуальные проблемы информатики : сб. трудов 6 Междунар. науч. конф. Минск : БГУ, 1998. С. 336–343.
5. Бранцевич П. Ю., Гузов В. А. Применение усреднения во временной области и вейвлет-анализа для исследования вибрационных сигналов // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций : сб. докл. М. : ОАО «ВТИ», 2007. С. 58–66.

*Статья поступила в редакцию
06.11.2012 г.*