

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 519.246.27

ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ
ОЦЕНКИ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2013 г. В. Н. Якимов, О. В. Горбачев

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: yvnr@hotmail.com, oleg.gorbachev@gmail.com

Поступила в редакцию 01.08.2012 г.

После доработки 19.11.2012 г.

Рассматривается специализированная измерительная система, предназначенная для спектрального анализа многокомпонентных процессов. В основе функционирования системы лежит программная реализация цифровых алгоритмов вычисления оценок коэффициентов Фурье, разработанных с применением знакового аналого-стохастического квантования. Представлена структурная схема измерительной системы и модульная организация ее программного обеспечения. Описана процедура подготовки и проведения анализа многокомпонентного процесса. Приведены результаты эксперимента по оценке амплитудного спектра с использованием модели многокомпонентного процесса.

DOI: 10.7868/S0032816213040289

ВВЕДЕНИЕ

В ходе проведения экспериментальных исследований часто требуется осуществлять техническую диагностику различного рода машин и механизмов путем мониторинга их вибрационного состояния. Это приводит к необходимости анализа многокомпонентных колебательных процессов (м.к.п.). Одним из важнейших методов анализа м.к.п. является спектральный анализ, который позволяет получать информацию о динамических свойствах исследуемых объектов в реальных условиях их эксплуатации [1].

На практике в качестве математической модели м.к.п. обычно рассматривают аддитивную смесь гармонических компонент с частотой f_k , амплитудой α_k и начальной фазой φ_k и независимого в статистическом смысле по отношению к ним широкополосного шума $e(t)$ [1], т.е.

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^K \alpha_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k) + e(t),$$

$$\alpha_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \varphi_k = \arctg(-b_k/a_k), \quad f_k = kf_0,$$

где a_k и b_k – коэффициенты гармонического ряда Фурье; f_0 – основная частота; K – общее число гармонических компонент.

Таким образом, спектральный анализ м.к.п. связан с вычислением на дискретных частотах f_k оценок амплитудного спектра α_k на фоне широкополосного шума $e(t)$, имеющего непрерывный спектр. Классические цифровые методы вычисления спектральных оценок требуют выполнения

прямого преобразования Фурье многоуровневых цифровых отсчетов м.к.п., что приводит к существенным затратам времени даже при выполнении быстрого преобразования Фурье [2].

Повысить быстродействие вычисления цифровых оценок амплитудного спектра можно за счет применения в качестве первичного аналого-цифрового преобразования знакового аналого-стохастического квантования [3]:

$$z(t) = \begin{cases} +1, & x(t) \geq \xi(t), \\ -1, & x(t) < \xi(t), \end{cases}$$

где $\xi(t)$ – равномерно распределенный вспомогательный случайный процесс, который выступает в роли стохастического порога квантования.

В [3] с использованием знакового аналого-стохастического квантования получены математические соотношения для вычисления оценок коэффициентов Фурье a_k и b_k , которые имеют вид

$$\hat{a}_k = 2(k\pi)^{-1} X_{\max} z(t_0) \sum_{i=1}^{p-1} (-1)^i \sin(2\pi k T^{-1} t_i^z),$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, K,$$

$$\hat{b}_k = (k\pi)^{-1} X_{\max} z(t_0) \times$$

$$\times \left(1 + (-1)^p + 2 \sum_{i=1}^{p-1} (-1)^i \cos(2\pi k T^{-1} t_i^z) \right),$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, K,$$

где T – продолжительность времени анализа; X_{\max} – наиболее вероятное максимально возможное значение, которое может принять м.к.п.; $z(t_0)$ – ре-

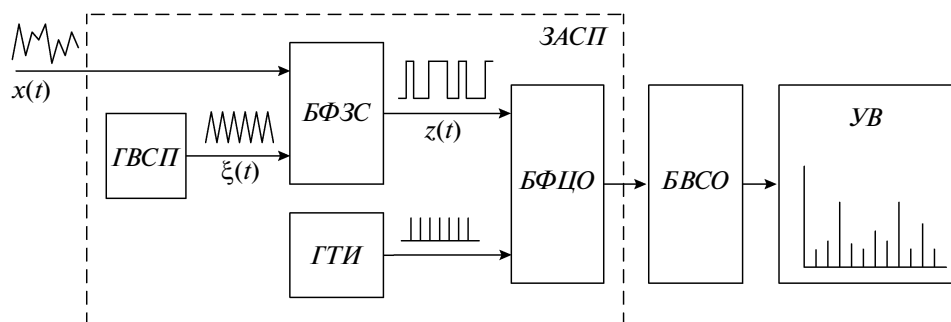


Рис. 1. Обобщенная структурная схема измерительной системы оценки амплитудного спектра м.к.п. ЗАСП – знаковый аналого-стохастический преобразователь; ГВСП – генератор вспомогательного случайного процесса; БФЭС – блок формирования знакового сигнала; ГТИ – генератор тактовых импульсов; БФЦО – блок формирования цифровых отсчетов; БВСО – блок вычисления спектральных оценок; УВ – устройство вывода.

зультат знакового аналого-стохастического квантования в начальный момент времени анализа; t_i^z и p – отсчеты моментов времени и их количество, соответствующие переходу через ноль результата знакового аналого-стохастического квантования в пределах интервала времени анализа.

На основе вышеприведенных соотношений были разработаны алгоритмы для вычисления оценок амплитудного спектра α_k , которые не требуют выполнения многоразрядных цифровых операций умножения, что ведет к увеличению быстродействия спектрального анализа м.к.п. Основными операциями этих алгоритмов являются простые арифметические операции суммирования и вычитания фильтрующих функций \sin и \cos . Данные алгоритмы послужили основой для создания специализированной измерительной системы вычисления цифровых оценок амплитудного спектра м.к.п.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА

Обобщенная структурная схема измерительной системы представлена на рис. 1. Аппаратная часть системы состоит из двух основных блоков:

- знакового аналого-стохастического преобразователя;
- блока вычисления спектральных оценок.

Анализируемый м.к.п. $x(t)$ подается на вход знакового аналого-стохастического преобразователя, где он поступает на первый вход блока формирования знакового сигнала $z(t)$, второй вход которого подключен к выходу генератора вспомогательного случайного процесса. Следует отметить, что в частном случае в качестве вспомогательного случайного процесса $\xi(t)$ может использоваться сигнал треугольной формы [4]. В блоке формирования знакового сигнала происходит сравнение $x(t)$ и $\xi(t)$ и определяются моменты времени превышения одного из них над другим.

Далее сформированный знаковый сигнал $z(t)$ подается на первый вход блока формирования цифровых отсчетов моментов времени t_i^z . Второй вход блока формирования цифровых отсчетов подключен к выходу генератора тактовых импульсов, частота следования которых задается много большей верхней анализируемой частоты в спектре м.к.п. На выходе знакового аналого-стохастического преобразователя получаем поток данных в виде цифровых отсчетов моментов времени t_i^z , которые поступают на вход блока вычисления спектральных оценок, где происходит расчет оценок статистических характеристик (математического ожидания, дисперсии, среднеквадратического отклонения, коэффициента вариации) и осуществляется выполнение процедур вычисления спектральных оценок исследуемого м.к.п. Блок вычисления спектральных оценок может быть выполнен либо в виде специализированного вычислительного блока, либо в качестве него может выступать э.в.м. Полученные спектральные оценки подаются на устройство вывода для их визуального отображения.

ЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Для реализации широких функциональных возможностей и удовлетворения требованиям, предъявляемым к современным измерительным системам [5], разработано модульное программное обеспечение. Каждый программный модуль отвечает за выполнение только своей задачи и взаимодействует с другими модулями по установленным связям через программные интерфейсы. Программное обеспечение осуществляет управление работой системы в целом, реализует логические операции, предусмотренные процессом измерения, выполняет процедуры вычисления

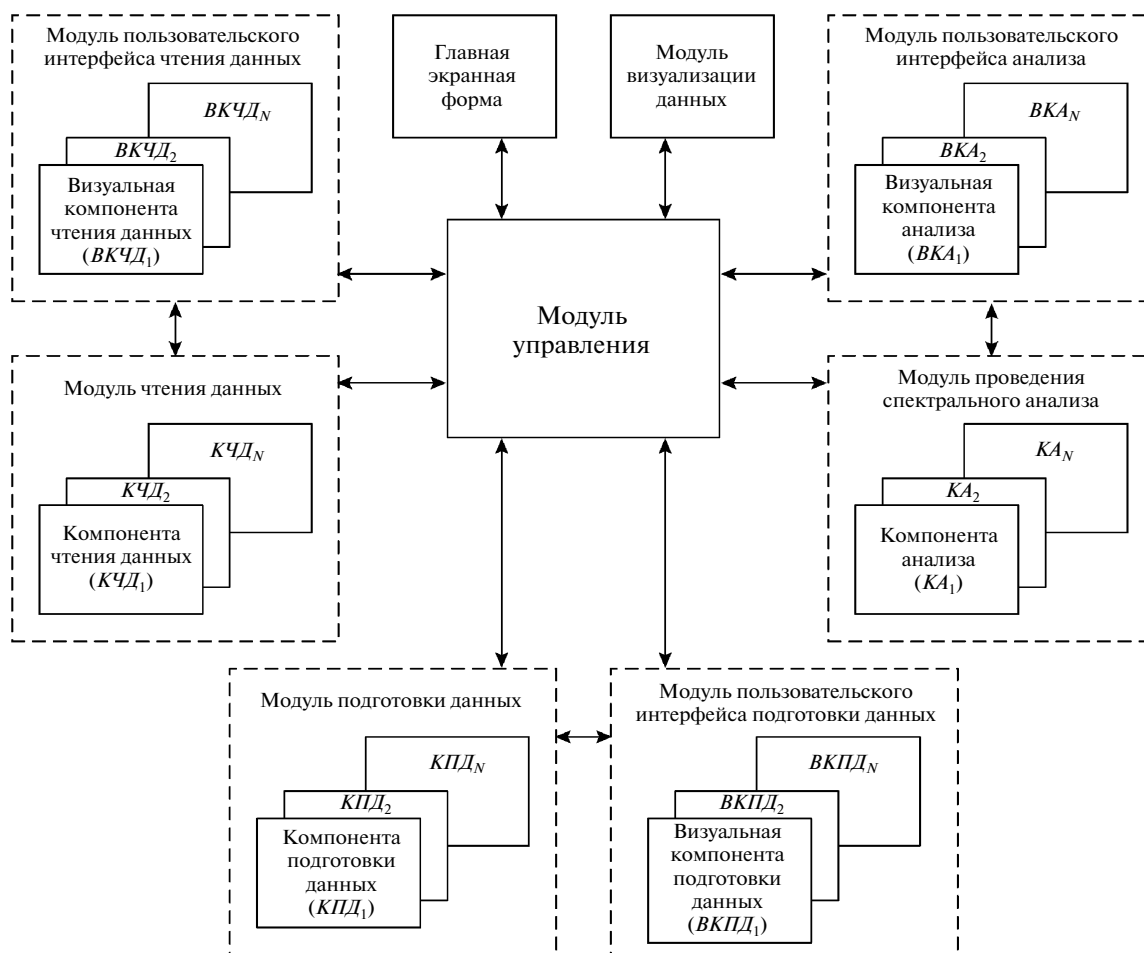


Рис. 2. Модульная организация программного обеспечения измерительной системы.

оценок амплитудного спектра и формирует выходные данные.

Основу программного обеспечения измерительной системы составляют девять модулей. Организация программного обеспечения и взаимодействие его модулей приведены на рис. 2.

Модуль управления (Core) является ядром программного обеспечения измерительной системы. Данный модуль предназначен для организации взаимодействия всех модулей программного обеспечения системы. Он загружает в память блока вычисления спектральных оценок исходные настройки системы, а также модули: чтения данных м.к.п. (Vibration process module), подготовки м.к.п. к анализу (Preparation module) и проведения спектрального анализа (Analysis module), и устанавливает их начальные параметры. При этом загрузка этих модулей осуществляется из динамически подключаемых библиотек, реализованных в виде DLL-файлов.

Модуль главной экранной формы (MainForm) представляет собой главную экранную форму си-

стемы, которая отображает компоненты пользовательского интерфейса всех модулей.

Модуль пользовательского интерфейса анализа (Analysis UI module) содержит визуальные программные компоненты пользовательского интерфейса анализа (Vibration process analysis UI) для ввода параметров проведения и управления спектральным анализом. С помощью этих компонент задаются или в случае необходимости корректируются частотные пределы, в которых будет осуществляться идентификация гармонических составляющих, и устанавливается продолжительность времени анализа.

Модуль проведения анализа (Analysis module) – модуль, который обеспечивает проведение спектрального анализа. Программные компоненты анализа (Vibration process analysis), входящие в состав этого модуля (рис. 2), непосредственно реализуют процедуры вычисления оценок амплитудного спектра. Команда на выполнение спектрального анализа подается через программные компоненты пользовательского интерфейса анализа. По завершении обработки данных знакового аналого-стохастиче-

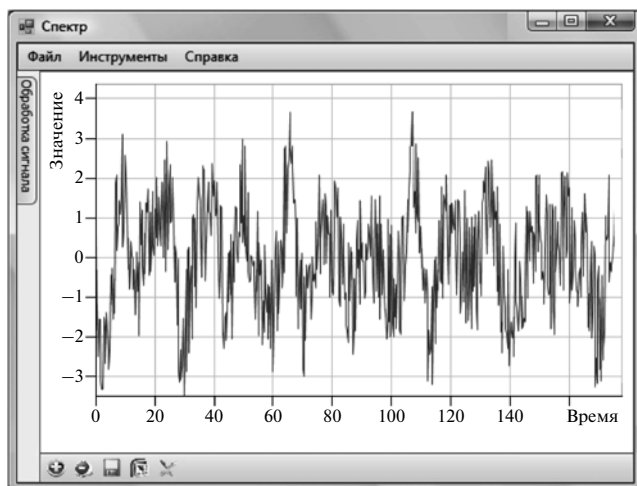


Рис. 3. Вид реализации модели м.к.п.

ского квантования модуль управления передает оценки амплитудного спектра в модуль визуализации данных (Chart). Данный модуль представляет собой графический интерфейс визуализации в табличной и графической формах результатов спектрального анализа.

В случае необходимости программное обеспечение измерительной системы позволяет осуществлять обработку массивов цифровых отсчетов м.к.п., полученных путем его классической регулярной дискретизации. С этой целью разработаны специальные программные модули: пользовательского интерфейса чтения данных (Vibration process UI module), чтения данных (Vibration process module), подготовки данных к анализу (Preparation module) и пользовательского интерфейса подготовки данных (Preparation UI module). Эти модули позволяют симитировать процедуру знакового аналого-стохастического квантования.

Модуль подготовки данных к анализу включает программные компоненты пользовательского интерфейса измерительной системы по управлению загрузкой массивов цифровых отсчетов м.к.п. в память блока вычисления спектральных оценок из файла Microsoft Excel или из текстового файла. В общем виде цифровые отсчеты м.к.п. состоят из двух числовых рядов: в первом ряду — отсчеты времени, в которые осуществляется дискретизация реализации м.к.п., во втором — значения реализации м.к.п., соответствующие отсчетам времени первого ряда. Непосредственно процедуры чтения массивов цифровых отсчетов м.к.п. реализуются программными компонентами чтения данных (Vibration process), которые управляются через визуальные компоненты чтения данных (Vibration process UI) (рис. 2), входящих в состав модуля чтения данных м.к.п.

По завершении загрузки массивов цифровых отсчетов м.к.п. осуществляется предварительный расчет оценок его статистических характеристик (математического ожидания, дисперсии, среднеквадратического отклонения, коэффициента вариации). Также определяются максимальное и минимальное значения загруженного массива. После этого компонента чтения данных (Vibration process) оповещает модуль управления (Core) о завершении загрузки и предварительной обработки цифровых отсчетов м.к.п. Далее модуль подготовки данных к анализу (Preparation module) обеспечивает формирование цифровых отсчетов моментов времени t_i^z путем программной имитации процедуры знакового аналого-стохастического квантования.

Программная компонента подготовки данных к анализу (Vibration process preparation) этого модуля (рис. 2), получив от модуля управления (Core) оповещение о завершении загрузки массива цифровых отсчетов м.к.п., автоматически пересчитывает параметры вспомогательного случайного процесса исходя из предварительно рассчитанных оценок статистических характеристик анализируемого м.к.п. Через компоненту пользовательского интерфейса подготовки данных (Vibration process preparation UI) в составе модуля пользовательского интерфейса подготовки данных (Preparation UI module) пользователь может скорректировать автоматически рассчитанные параметры вспомогательного случайного процесса. После задания параметров вспомогательного случайного процесса осуществляется процедура имитации знакового аналого-стохастического квантования. Полученные в результате выполнения этой процедуры цифровые отсчеты м.к.п. передаются в компоненту анализа (Vibration process analysis), осуществляющей оценку амплитудного спектра.

ЭКСПЕРИМЕНТ С МОДЕЛЬЮ М.К.П.

В процессе экспериментальных исследований параметры гармонических компонент модели (значения частот и амплитуд) подбирались таким образом, чтобы получаемые спектры имели ряд особенностей, по которым можно судить об эффективности работы измерительной системы. Для того чтобы получить представление о разрешающей способности и оценить эффект маскирования слабых гармонических компонент сильными, частоты гармонических компонент выбирались близкими друг к другу относительно ширины диапазона частот подлежащего оцениванию. При этом гармонические компоненты задавались с нормированными частотами $f_{ni} = f_i / F_{max}$, где f_i принадлежит $]0; F_{max}]$ и F_{max} — верхняя граничная частота диапазона, в пределах которого имитировалось вычисление спектральных оценок. Отметим, что независимо от значения верх-

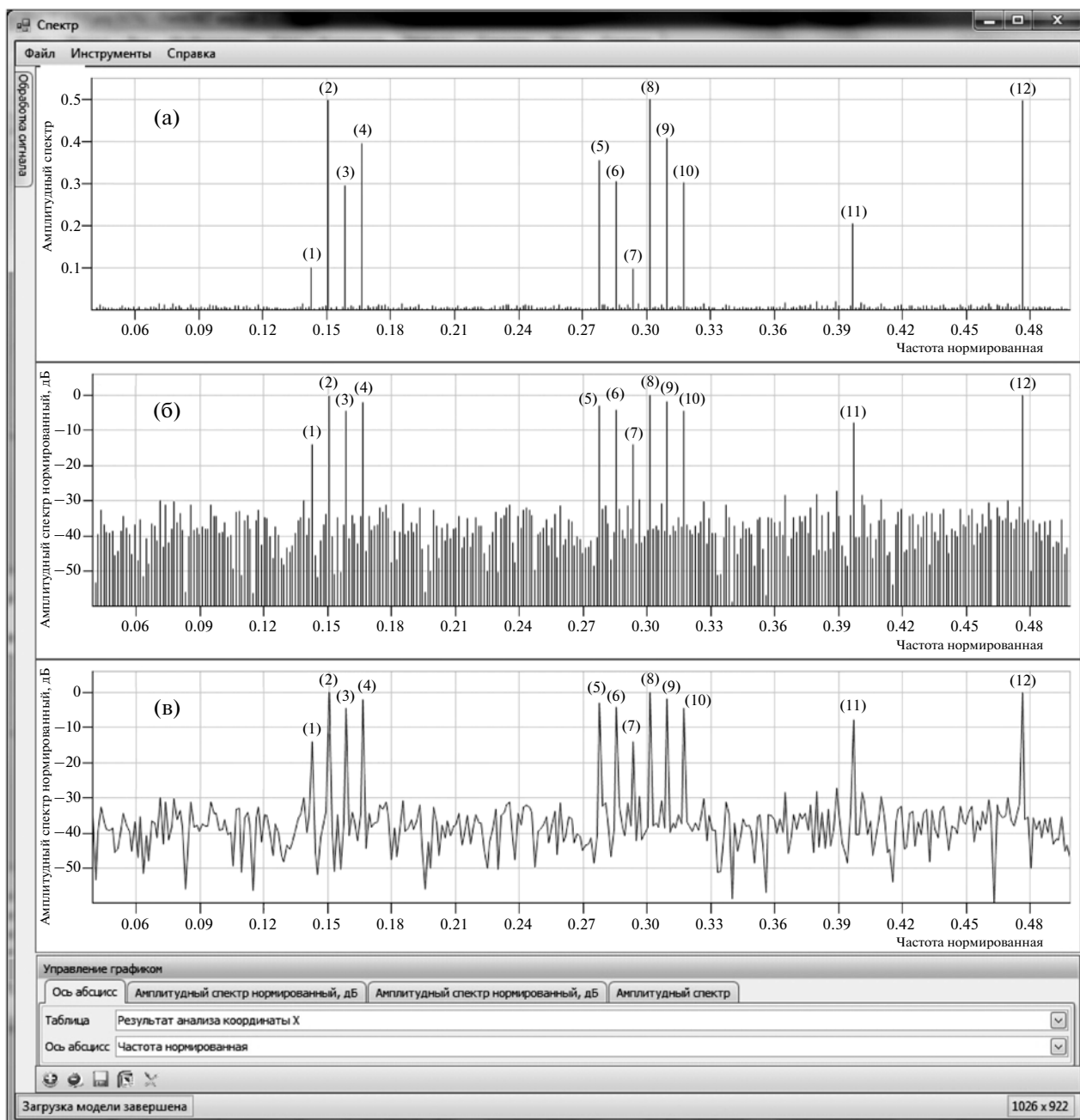


Рис. 4. Главное окно системы с результатом анализа модели реализации м.к.п.: **а** – оценки амплитудного спектра, **б** – нормированные оценки амплитудного спектра, **в** – огибающая амплитудного спектра. Цифрами в скобках обозначены номера гармонических компонент.

ней граничной частоты F_{\max} всегда будем иметь, что f_i принадлежит $[0; 0.5]$.

Фактически переход к нормированным частотам обеспечивает постоянство границ частотного диапазона, в пределах которого осуществляется оценивание амплитудного спектра. Начальные фазы φ_i гармонических компонент задавались равномерно распределенными в пределах их периода следования. В частности, модель м.к.п.

представляла собой смесь двенадцати гармонических компонент и равномерно распределенного белого шума с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. В таблице приведены параметры гармонических компонент.

Вид реализации модели м.к.п. представлен на рис. 3.

В результате анализа данной модели были получены оценки амплитудного спектра (рис. 4а).

№ п/п	Амплитуда	Нормированная частота
1	0.1	0.1428
2	0.5	0.1507
3	0.3	0.1587
4	0.4	0.1667
5	0.35	0.2777
6	0.3	0.2817
7	0.1	0.2857
8	0.5	0.2896
9	0.4	0.2936
10	0.3	0.3571
11	0.2	0.3968
12	0.5	0.4761

На рис. 4б, 4в представлены соответственно нормированный линейчатый амплитудный спектр и его огибающая в децибелах. Хорошо видно, что спектральные линии четко разрешимы по частоте и сильные гармонические компоненты не маскируют слабые. Особенно стоит обратить внимание на то, что даже при высоком уровне шума (его дисперсия равна единице) гармонические компоненты с амплитудой 0.1 (с номерами 1 и 7) четко различимы на фоне шума. При этом шум находится на уровне -30 дБ по сравнению с основными гармоническими компонентами анализируемой модели реализации м.к.п.

В реальных условиях работа измерительной системы была апробирована при исследовании вибрационного состояния газотурбинной установки ГТУ-12П на базе авиационного двигателя ПС-90А. Для примера на рис. 5 приведен амплитудный спектр, который был получен для сигнала виброускорения в штатной измерительной точке корпуса компрессора в осевом направлении в пределах диапазона частот до $F_{\max} = 8$ кГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена измерительная система для цифрового оценивания амплитудного спектра многокомпонентных процессов. Использование в этой системе в качестве первичного аналого-цифрового преобразования знакового аналого-стохастического квантования позволило свести вычисление спектральных оценок к выполнению только арифметических операций суммирования и вычитания фильтрующих функций \sin и \cos . Модульная структура аппаратно-программного обеспечения измерительной системы позволяет дополнять систему функциональными модулями и в случае необходимости модифицировать ее структуру. Измерительная система также обеспечивает обработку массивов цифровых отсчетов м.к.п., полученных путем классической регулярной дискретизации за счет программной имитации осуществления процедуры знакового аналого-стохастического квантования. Это обстоятельство расширяет функциональные возможности измерительной системы. Приведенные результаты экспериментальных исследований подтверждают, что рассматриваемая измерительная система обеспечивает высокое ка-

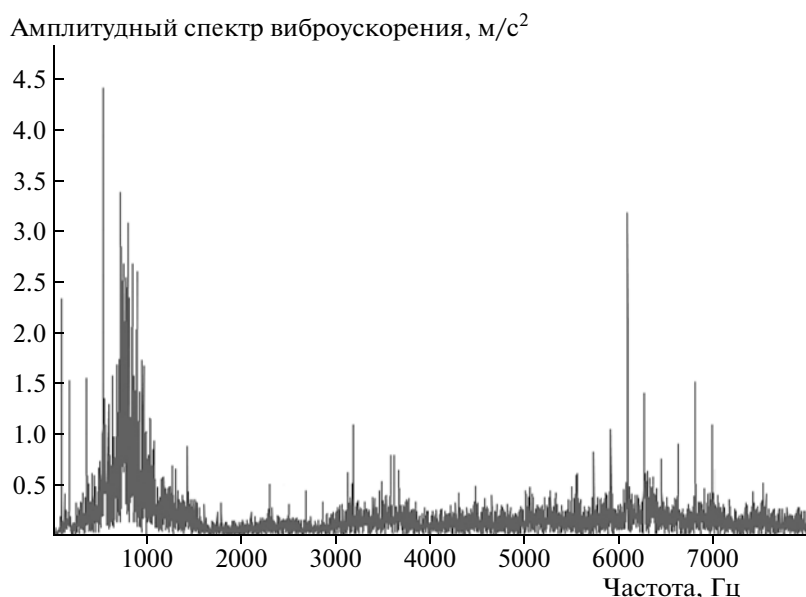


Рис. 5. Амплитудный спектр виброускорения в осевом направлении в штатной измерительной точке корпуса компрессора.

чество вычисления цифровых оценок амплитудного спектра. При этом в данной системе вычислительные процедуры в отличие от традиционных классических цифровых алгоритмов спектрального оценивания, требующих выполнение дискретных операций многоуровневого умножения, не связаны с реализацией подобного рода операций, что ведет к упрощению вычислительного процесса.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 10-08-00472-А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Максимов В.П., Егоров И.В., Карасев В.А.* Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах. М.: Машиностроение, 1987.
2. *Марпл-мл С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990.
3. *Якимов В.Н.* // Измер.техника. 2006. № 4. С. 22.
4. *Мирский Г.Я.* Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. М.: Энергия, 1972.
5. ГОСТ Р 8.596-2002. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.