

7. ТУ14-ЗР-55-2001. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – Введ. 2004-01-03. – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2004. – 91 с.

8. *Полищук С.М.* Анализ исследований эрозионно-коррозионного износа трубопроводов АЭС / С.М. Полищук, А.А. Манузин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – 1/3 (25). – С. 3 - 7.

9. *Крутасова Е.И.* О повреждаемости гибов паропроводных труб / Е.И. Крутасова, Н.И. Слободчикова, В.И. Брагина // Электрические станции. – 1976. – № 1. – С. 19 - 21.

10. Эрозионно-коррозионный износ оборудования атомных электростанций / В.И. Бараненко [и др.] // Атомная техника за рубежом. – 1995. – № 8. – С. 9 - 13.

11. *Бараненко В.И.* Эрозионно-коррозионный износ трубопроводов с однофазной и двухфазной средами при эксплуатации АЭС с ВВЭР / В.И. Бараненко, Ю.А. Янченко, М.С. Белов // Сб. науч. работ 6-й Междунар. науч.-практ. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» 26 - 29 мая 2009 г. – Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС» ВНИИАЭС, 2009. – С. 168 - 173.

12. *Петров Л.Н.* Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов / Л.Н. Петров, Н.Г. Сопрунюк. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с.

Надійшла до редакції 13.05.2013 р.  
Після доопрацювання 29.05.2013 р.

УДК 621.313.322-81-752:303.733.3

## **ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ АЭС**

**Н.Е. Сапожников<sup>1</sup>, Б.М. Демидюк<sup>2</sup>, О.Д. Чужикова-Проскурнина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности*

<sup>2</sup>*ЗАО «Укратомэнергострой», г. Киев*

В работе рассмотрено применение спектрального анализа в диагностике технического состояния турбогенераторов АЭС. Приведена методика его проведения с использованием дискретного преобразования Фурье, а также даны рекомендации по подготовке данных измерений к анализу.

### **Введение**

При диагностике технического состояния турбогенератора одним из наиболее информативных показателей является вибрация, поскольку она напрямую или косвенно отражает негативные процессы, протекающие в агрегате, и дефекты, их вызывающие. Поэтому измерение вибрации и тщательный анализ результатов является важной составляющей диагностики турбогенераторов.

Представление вибрации во временной области содержит большое количество информации, которая сложно поддается анализу. Часть этой информации приходится на очень слабые компоненты, величина которых может быть соизмерима с толщиной линии графика. Тем не менее, подобные слабые компоненты могут быть важны для выявления развивающихся неисправностей в машине, например, дефектов подшипников.

Сама суть диагностики и обслуживания по состоянию заключается в раннем обнаружении зарождающихся неисправностей, поэтому необходимо обращать внимание и на чрезвычайно малые уровни вибрационного сигнала [1].

Чтобы обойти ограничения анализа во временной области, применяется спектральный (частотный) анализ вибрационного сигнала [2].

Вибродиагностическими методами решаются две основные задачи диагностики эксплуатируемых агрегатов: распознавание состояния эксплуатируемого агрегата и выявление причин и условий, вызывающих неисправности, которые следует устранить [3].

Само по себе измерение вибрации может зафиксировать рост измеряемого параметра, но не даст ответ на главный вопрос: какова причина этого явления? Является ли этот процесс случайным сбоем или же следствием развивающегося дефекта?

Основной подход к решению поставленных задач состоит в следующем: применяется спектральный анализ, который позволяет выявить, на какой частоте появилась виброактивность, а затем при наличии экспериментальных данных о вибрации исправных и неисправных агрегатов, а также при различных режимах эксплуатации определяется причина ее появления.

В литературе, посвященной измерению вибрации и обработке результатов измерения, а также спектральному анализу, не систематизированы методики предварительной обработки данных, непосредственно спектрального анализа и последующей обработки результатов с представлением их в виде, удобном для проведения диагностики.

### **Постановка цели и задач исследования**

Целью работы является исследование использования спектрального анализа при измерении вибрации для диагностики технического состояния турбогенератора.

Цель исследования определяет задачи:

1. Систематизировать методики предварительной обработки результатов измерений, выполнения спектрального анализа на основе дискретного преобразования Фурье и последующей обработки результатов.
2. Рассмотреть спектры вибросмещения, виброскорости и виброускорения.

### **Предварительная обработка результатов измерений**

При выполнении спектрального анализа в каждом цикле обработки поступает массив дискретных значений исходного сигнала  $\{X_i\}$  ( $i = 0, \dots, N - 1$ ).

Вначале рекомендуется вычесть среднее из значений ряда и удалить тренд перед анализом. Иначе периодограмма и спектральная плотность будут иметь очень большое значение первого коэффициента при косинусе (с нулевой частотой), что усложнит анализ на других частотах с меньшей амплитудой. По существу среднее - это цикл нулевой частоты в единицу времени; то есть константа. Аналогично тренд также не представляет интереса, когда нужно выделить периодичность в ряде. Фактически оба этих эффекта могут заслонить более значимые периодичности в данных, поэтому и среднее, и тренд следует удалить из ряда перед анализом. Иногда также полезно сгладить данные перед анализом, чтобы убрать случайный шум, который может засорять существенные периодические циклы в периодограмме [4].

После предварительной обработки временного ряда применяется дискретное временное окно, то есть выполняются вычисления по формуле

$$X'_i = W_i \cdot X_i,$$

для всех  $i = 0, \dots, N - 1$ .

Наиболее часто применяются следующие временные окна [5, 6]:

- прямоугольное окно:  $W_i = 1$ ;
- треугольное окно (Бартлетта):  $W_i = 2 - 4 \cdot |t_i|$ ;
- окно Хеннинга:  $W_i = 1 + \cos(2 \cdot p \cdot t_i)$ ;
- окно Хемминга:  $W_i = 1.85 \cdot (0.54 + 0.46 \cdot \cos(2 \cdot p \cdot t_i))$ ;
- окно Натолла (взвешенные косинусы):

$$W_i = 2.75 \cdot \sum_{r=0}^3 a_r \cdot \cos(2 \cdot p \cdot r \cdot t_i),$$

при  $a[0] = 0.3635819$ ,  $a[1] = 0.4891775$ ,  $a[2] = 0.1365995$ ,  $a[3] = 0.0106411$ ;

- усеченное окно Гаусса ( $a = 2.5$ ):

$$W_i = 2.02 \cdot \text{Exp}\left(\frac{1}{2} \cdot (2 \cdot a \cdot t_i)^2\right);$$

для всех формул  $t_i = (i - [N - 1]/2)/(N - 1)$ ,  $\pi = 3.1415\dots$

На практике при анализе данных обычно не очень важно точно определять частоты основных функций синусов или косинусов. Скорее, так как значения периодограммы – объект существенного случайного колебания, можно столкнуться с проблемой многих хаотических пиков периодограммы. В этом случае хотелось бы найти частоты с большими спектральными плотностями, то есть частотные области, состоящие из многих близких частот, которые вносят наибольший вклад в периодическое поведение всего ряда. Это может быть достигнуто путем сглаживания значений периодограммы с помощью применения временного окна.

### **Выполнение спектрального анализа на основе дискретного преобразования Фурье**

После применения окна выполняется преобразование сигнала из временной области в частотную. Наиболее распространенным методом является дискретное преобразование Фурье [2, 5, 6]:

$$Y_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_i \cdot e^{-j2pki/N} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_i \cdot [\cos(2pki/N) - j \sin(2pki/N)],$$

где  $j$  – мнимая единица;  
 $\{Y_k\}$  ( $k = 0, \dots, N - 1$ ) – комплексные значения преобразования Фурье.

В качестве оценки спектра входной реализации используется квадрат модуля преобразования Фурье (периодограмма):

$$S_{xx}(k) = 2 \cdot |Y_k|^2 / N.$$

Периодограмма на график выдается в логарифмическом масштабе (дБ) или в линейном масштабе ( $B^2$ ).

В линейном масштабе используются непосредственно величины  $S_{xx}(k)$ , а при логарифмическом – применяется формула

$$G_{xx}(k) = 10 \cdot \lg(S_{xx}(k)/U_0^2),$$

где  $\lg()$  – десятичный логарифм;  
 $U_0$  – коэффициент нормировки (для вибросигналов он равен  $3E-4$ ).

На рис. 1 приведена периодограмма случайного сигнала в линейном (1, а) и логарифмическом (1, б) масштабе.

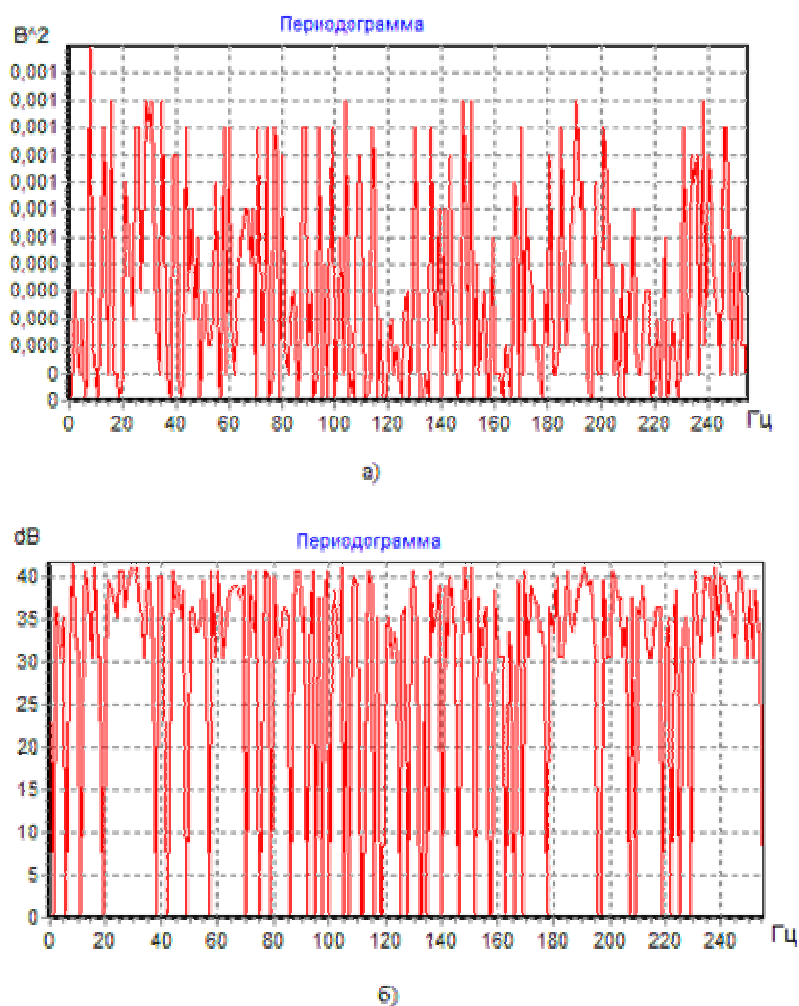


Рис. 1. Периодограмма случайного сигнала в линейном и логарифмическом масштабе

### Обработка результатов спектрального анализа

Значительное изменение амплитуды на соседних частотах делает спектр сложным для восприятия. Для устранения этого эффекта применяют сглаживание, позволяющее идентифицировать основные частотные области или спектральные плотности, которые существенно влияют на циклическое поведение ряда [4].

Сглаживание реализуется через усреднение, которое может быть линейным, экспоненциальным и сглаживанием по максимуму.

При линейном усреднении после вычисления очередного значения периодограммы  $S_{xx}(k)$  вычисляется среднее значение для  $i$ -го шага в линейном масштабе:

$$\bar{S}_i(k) = \left( (i-1) \cdot \bar{S}_{i-1}(k) + S_{xx}(k) \right) / i, \quad i = \overline{1; n},$$

где  $\bar{S}_{i-1}(k)$  – осредненное на предыдущем шаге значение;

$i$  – шаг усреднения;

$n$  – число усреднений.

При экспоненциальном усреднении процесс усреднения завершается только по достижении конца выбранного интервала обработки, а в качестве формулы усреднения используется следующее соотношение:

$$\bar{S}_i(k) = (1 - r) \cdot \bar{S}_{i-1}(k) + r \cdot S_{xx}(k),$$

где  $\rho$  – некоторый параметр  $0 < \rho < 1$ , определяющийся по выражению  $\rho = 1/n$ .

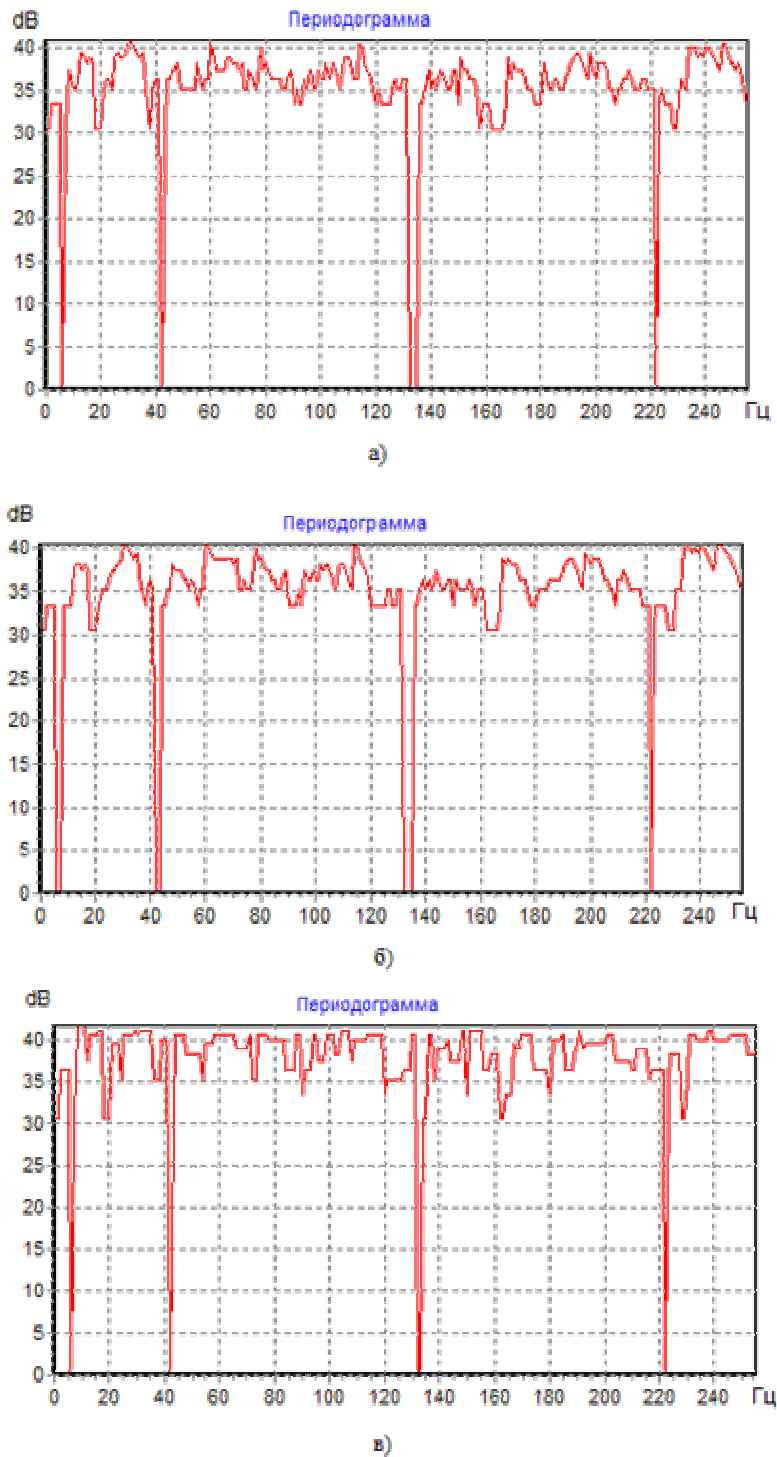


Рис. 2. Усредненный спектр в логарифмическом масштабе

При усреднении по максимуму формула усреднения выглядит так:

$$\bar{S}_i(k) = \max\{\bar{S}_{i-1}(k), S_{xx}(k)\},$$

где  $\max\{\}$  – максимальное из двух значений.

На рис. 2 приведена рассмотренная ранее периодограмма в логарифмическом масштабе, но после усреднения ( $n = 6$ ): линейного (см. рис. 2, а), экспоненциального (см. рис. 2, б) и усреднения по максимуму (см. рис. 2, в).

Возможна дополнительная обработка спектров:

– интегрирование:

$$y[i] = S_{xx}[i] / (4p^2 i^2 h^2)$$

где  $n$  – количество отсчетов;

$h$  – шаг по времени;

$S_{xx}[i]$  – значения периодограммы;

$y[i]$  – значения интеграла, выполняется для  $i$  от 1 до  $n-1$ ;

– дифференцирование:

$$y[i] = 4p^2 i^2 h^2 S_{xx}[i]$$

– двойное интегрирование;

– двойное дифференцирование.

### Спектры вибро смещения, вибро скорости и вибро ускорения

Как известно, вибрация может быть представлена одним из трех измеряемых параметров: вибро смещение, вибро скорость и вибро ускорение. Интегрирование и дифференцирование спектра позволяет нам переходить от одного параметра к другому.

На практике, однако, дифференцирование приводит к росту шумовой составляющей сигнала, и поэтому оно редко применяется. Интегрирование, напротив, может быть осуществлено с высокой точностью. Это является одной из причин, почему акселерометры сегодня стали основными датчиками вибрации: их выходной сигнал можно легко подвергнуть однократному или двукратному интегрированию и получить либо скорость, либо смещение. Интегрирование, однако, непригодно для сигналов с очень низкой частотой (ниже 1 Гц), так как в этой области уровни паразитного шума чрезвычайно увеличиваются, и точность интегрирования падает [1].

На рис. 3 представлены спектры вибро смещения (см. рис. 3, а), вибро скорости (см. рис. 3, б) и вибро ускорения (см. рис. 3, в).

Как видно на рис. 3, график смещения очень трудно анализировать на высоких частотах, зато высокие частоты хорошо видны на графике ускорения. Кривая скорости наиболее равномерна по частоте среди этих трех. Это типично для большинства роторных машин, однако в некоторых ситуациях самыми равномерными являются кривые смещения или ускорения. Лучше всего выбирать такие параметры измерения, для которых частотная кривая выглядит наиболее плоской: тем самым обеспечивается максимум визуальной информации для наблюдателя. Для обоснования выбора диагностических параметров в каждом конкретном случае необходимы экспериментальные исследования агрегатов в рабочем и неисправном состояниях [1].

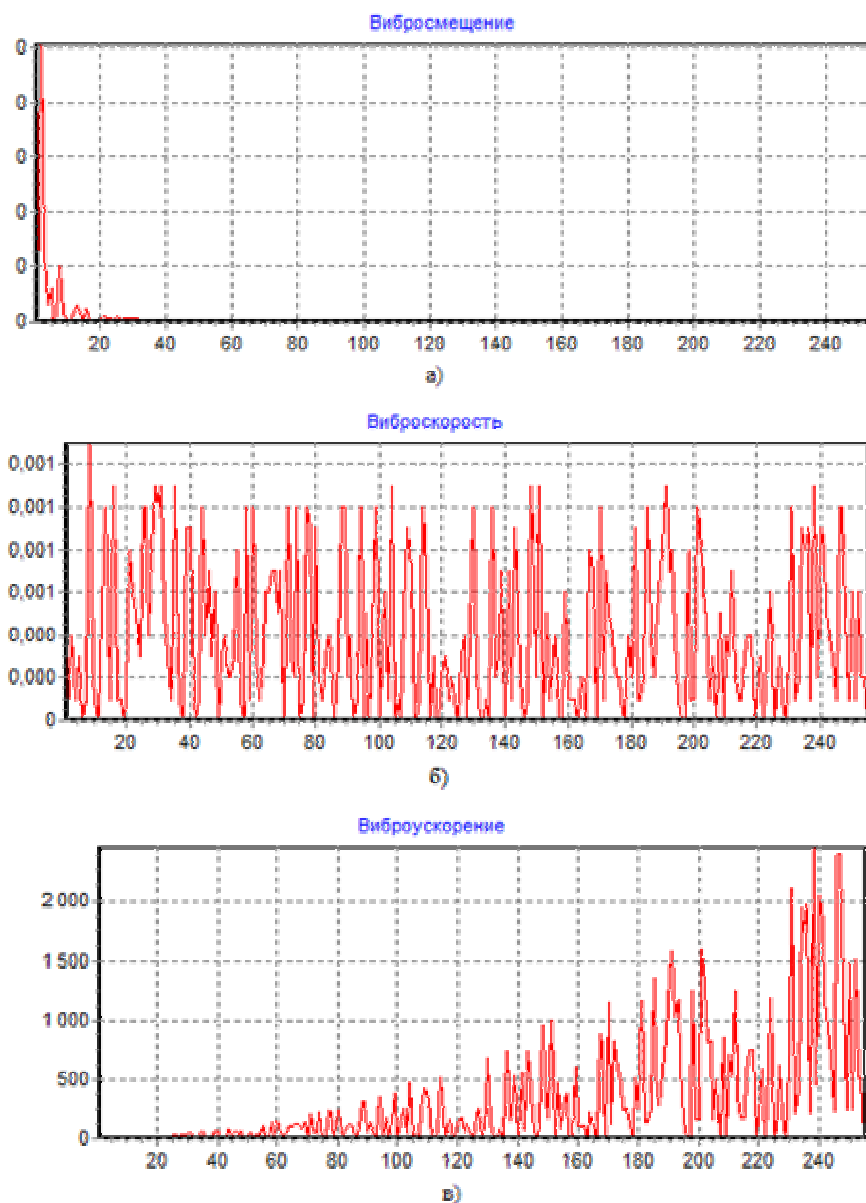


Рис. 3. Спектры вибросмещения, виброскорости и виброускорения одного вибросигнала

### Выводы

При проведении технической диагностики турбогенераторов АЭС особое внимание следует уделить вибрации, так как именно вибрация является информативной составляющей диагностики, поскольку косвенно отражает все изменения происходящие в агрегате. При правильном измерении и анализе вибрационных характеристик становится возможным выявить дефекты на этапе их зарождения. При этом невозможно обойтись без спектрального анализа. Однако применение спектрального анализа не принесет должного результата в случае, если не будут иметься эталонные данные поведения диагностируемого турбоагрегата в исправном и неисправном состоянии, а также при различных режимах работы.

## ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПРИ ДІАГНОСТИЦІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ АЕС

**М.Є. Сапожніков, Б.М. Демидюк, О.Д. Чужикова-Проскурніна**

Розглянуто використання спектрального аналізу в діагностиці технічного стану турбогенераторів АЕС. Приведена методика його проведення з використанням дискретного перетворення Фур'є, а також надані рекомендації щодо підготовки даних вимірювань до аналізу.

## SPECTRAL ANALYSIS USE in TECHNICAL STATE DIAGNOSTICS of NPP's TURBOGENERATORS

**N. Sapozhnikov, B. Demidyuk, O. Chuzhikova-Proskurnina**

Spectral analysis use in the technical state diagnostics of NPP's turbogenerators was examined. The method of such analysis using the discrete Fourier transform was described; recommendation concerning the measurement data processing for the analysis was also given.

### Список использованных источников

1. Основы измерения вибрации (по матер. фирмы DLI (под ред. В.А. Смирнова) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.vibration.ru/osn\\_vibracii.shtml](http://www.vibration.ru/osn_vibracii.shtml)
2. Белецкий А.Я. Детерминированные сигналы и спектры: учеб. пособие / А.Я. Белецкий, В.П. Бабак. – К.: КИТ, 2002. – 502 с.
3. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. – М.: Библиограф., 1996. – 276 с.
4. Анализ временных рядов: электрон. учебник комп. StatSoft, Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>
5. Глинченко А.С. Цифровая обработка сигналов: курс лекций / А.С. Глинченко [Электронный ресурс]. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 242 с. – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования: Intel Pentium (или аналогичный процессор другого производителя) 1 ГГц; 512 Мб оперативной памяти; 3 Мб свободного дискового пространства; привод DVD; операционная система Microsoft Windows 2000 SP4/XP SP2 /Vista/Seven; Adobe Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата pdf).
6. Давыдов А.В. Цифровая обработка сигналов: тематич. лекции / А.В. Давыдов. – Екатеринбург: УГГУ, 2007. – 228 с.

Надійшла до редакції 23.05.2013 р.