

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.П. Фельдман.

**Владимиров Виктор Владимирович**

Государственная морская академия им. Ф.Ф. Ушакова.

E-mail: vev-71@mail.ru.

353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93.

Тел.: 88617232322.

**Звягинцев Николай Сергеевич**

Новороссийское морское пароходство.

E-mail: zns1@yandex.ru.

353918, г. Новороссийск, пр. Ленина 93.

Тел.: 88617601763.

**Vladimirov Victor Vladimirovich**

Novorossiysk State Marine Academy.

E-mail:vev-71@mail.ru.

93, Lenina Pr., Novorossiysk, 353918, Russia.

Phone: +78617232322.

**Zvyaginstev Nikolay Sergeevich**

Quality division, JSC Novoship.

E-mail: zns1@yandex.ru.

93, Lenina Pr., Novorossiysk, 353918, Russia.

Phone: +78617601763.

УДК 681.518.54

**С.Ю. Байдаров**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РАБОТЫ ДАТЧИКОВОЙ АППАРАТУРЫ**

*Статья посвящена неразрушающему контролю пьезоэлектрических интеллектуальных датчиков быстропеременных и акустических давлений на примере исследования виброчувствительного элемента с разделенными электродами. В качестве диагностики датчика с виброчувствительным элементом был использован прямой и обратный пьезоэффекты, а для анализа сигналов – вейвлет-преобразование, с последующим исследованием скейллограммы. Данный метод позволяет повысить информативность диагностики и контроля различных агрегатов и узлов специальной техники.*

*Вейвлет-преобразования; диагностика; неразрушающий контроль; датчик давления.*

**S.U. Baydarov**

**USING WAVELET TRANSFORM FOR DIAGNOSIS OF SENSOR EQUIPMENT**

*The article is devoted to the nondestructive testing of piezoelectric smart sensors rapidly and acoustic pressures at the example of research vibrochuvstvitelnogo element with separate electrodes. As a diagnostic sensor vibrochuvstvitelnym element was used direct and inverse piezoelectric effect, and for signal analysis – wavelet transform, followed by research skaylolgrammy. This method allows to increase the information content of the diagnosis and monitoring of various units and units of special equipment.*

*Wavelet transform; diagnosis; nondestructive testing; pressure sensor.*

Для неразрушающей диагностики датчиковой аппаратуры (ДА) широкое распространение получил пьезоэффект, благодаря которому для виброчувствитель-

ных элементов (ВЧЭ) может быть осуществлен контроль их механической целостности и работоспособности. Принцип диагностики пьезоэлемента основан на использовании обратного и прямого пьезоэффектов. Подавая на электроды пьезоэлемента переменное напряжение, а затем измеряя отклик, можно судить о его работоспособности. Для повышения достоверности контроля, в пьезоэлементе используется дополнительный электрод, служащий для подачи контролирующего переменного напряжения или импульсов (рис. 1). На выходе ВЧЭ фиксируется отклик (эхо-сигнал).

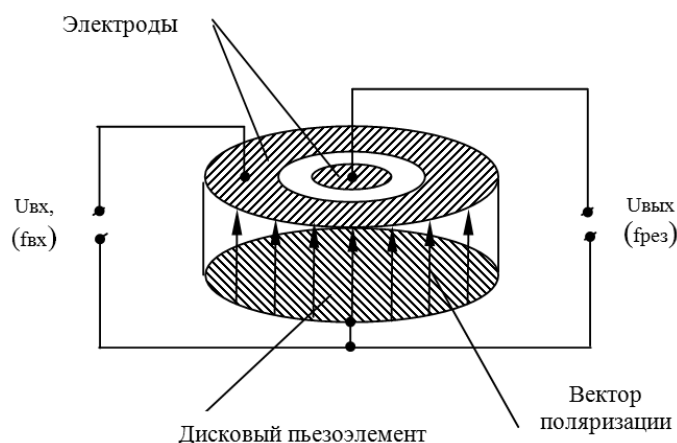


Рис. 1. Виброчувствительный элемент с разделенными электродами

Данная система работает как пьезоэлектрический трансформатор [1]. При подаче на вход напряжения с частотой, равной или кратной частоте механического резонанса, в пьезоэлементе образуется стоячая волна с максимальной амплитудой колебаний. На резонансной частоте коэффициент трансформации (1) достигает максимума и не зависит от геометрических размеров пьезоэлемента.

$$K_{тр} = U_{вых} / U_{вх} = 4Q_m \cdot g_{33} \cdot d_{33} \cdot E / \pi^2, \quad (1)$$

где  $Q_m$  – добротность ПЭ;  $g_{33}$  и  $d_{33}$  соответственно чувствительность по напряжению и пьезомодуль пьезокерамики;  $E$  – модуль Юнга.

Следует отметить, что «Эхо-сигнал», поступающий от ЧЭ или ИМ имеет сложный характер (рис. 2), как при пьезодиагностике с использованием обратного и прямого пьезоэффектов, так и при проведении диагностики ДА на вибростендах и ударных трубах.

Особо сложный характер имеют выходные сигналы с пьезоэлектрических датчиков пульсаций давления и акустических давлений, установленных на изделия ракетно-космической и летной техники. Это связано с тем, что количество связей, шумов, влияющих факторов и резонансных явлений в такой сложной технической системе, как «ЧЭ–ИМ–Датчик–агрегат ракеты-носителя» многократно увеличивается по сравнению со связями одиночных ЧЭ, ИМ и датчиков в целом [2, 3].

Наиболее популярным инструментом исследования процессов, протекающих в указанных сложных системах, является преобразование Фурье, в котором, как известно, в качестве базиса используются гармонические функции. К его недостаткам можно отнести локализованность отклика только в частотной области. Это ограничение не дает возможность использовать Фурье-преобразование при решении ряда задач диагностики, связанных с динамикой исследуемых процессов.

Кроме того, значительным недостатком Фурье-преобразования является то, что АЧХ-неисправностей в явном виде или недостаточно быстро выделяются или не выделяются вообще.

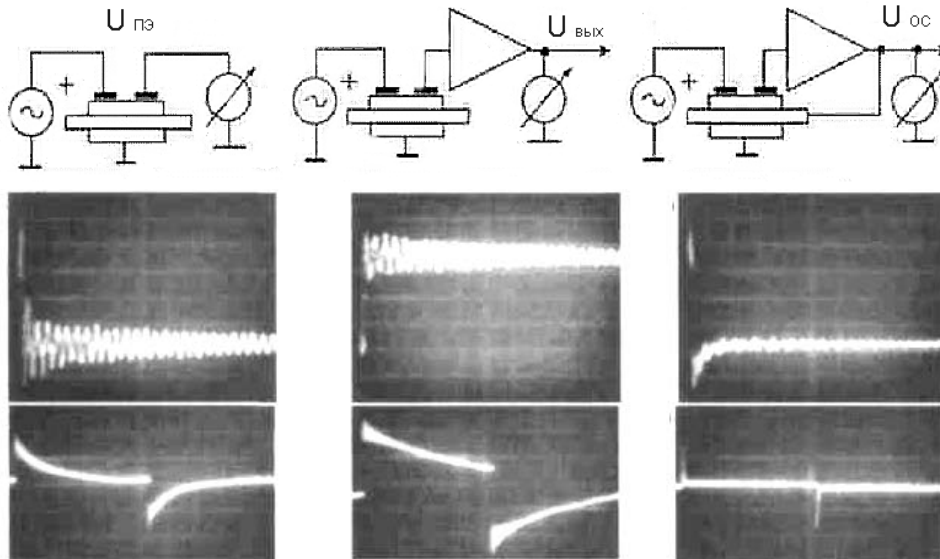


Рис. 2. Осциллограммы «Эхо-сигналов», получаемых при диагностике пьезоэлектрических чувствительных элементов, подключенных к элементам измерительной цепи

Альтернативой по отношению к Фурье-преобразованию являются ортогональные функции, такие как известные функции Уолша и сравнительно новые вейвлет-функции. Из них наиболее информативным, с позиций диагностики, является вейвлет-преобразование (ВП) [4, 5]. Это связано с тем, что спектральные компоненты ВП являются одновременно функциями двух переменных – масштаба и сдвига, что говорит о локализованности ВП как в частотной, так и во временной областях:

$$W_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{a,b} \cdot f(t) dt. \quad (2)$$

Данное выражение представляет собой свертку исходного сигнала  $f(t)$  с функцией  $\psi_{a,b}(t)$ , переводящую сигнал из временной в *wavelet*-область с базисными функциями:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (3)$$

где  $a$  и  $b$  представляют растяжение ( $a$ ) (масштаб) и сдвиг по времени ( $b$ ) функции  $\psi_{a,b}(t)$ , (материнской *wavelet*).

ВП обладает существенными преимуществами по сравнению с преобразованием Фурье, потому что оно позволяет судить не только о частотном спектре сигнала, но также о том, в какой момент времени появилась та или иная гармоника, которая может быть связана с неисправностью какого-либо агрегата РКТ, что позволяет [3]. Это, в конечном итоге, позволит выявить заражающийся дефект и предотвратить разрушение самого контролируемого агрегата, например ЖРД.

Вибрация, возбуждаемая в диагностируемых объектах, представляется как сигнал, спектр которого содержит большое количество составляющих (рис. 3), что затрудняет выбор и представление диагностических признаков, характеризующих состояние объекта и процессы, протекающие в нем. Аналитическое выражение спектра исследуемого сигнала может быть представлено в следующем виде:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(t) + Z(t), \quad (4)$$

где  $\varphi_i(t)$  – периодические сигналы;  $Z(t)$  – случайные составляющие.

Известно, что аналитически описать реальные связи колебаний объекта с параметрами вибрационного диагностического сигнала практически невозможно. Поэтому, наряду с математическими моделями исследуемого процесса, большой интерес представляет использование диагностических моделей.

Следует отметить, что использование диагностических моделей неизменно влечет за собой определенную идеализацию, что дает существенный выигрыш во времени.

Кроме того, ввиду постоянной смены режимов функционирования контролируемого объекта и высокой динамики быстропеременных процессов в системах «ЧЭ–ИМ–датчик–агрегат РКТ», построение единой универсальной диагностической модели представляется достаточно сложной задачей. Это связано с необходимостью учета характерных особенностей каждого режима работы модели, что приводит к ее неоправданному усложнению. Полученная модель будет описываться большим количеством параметров, что, в свою очередь, приведет к значительному увеличению времени и необходимой производительности вычислительной техники.

Одним из возможных способов решения указанных противоречий является использование нескольких моделей быстропеременных процессов (БПП), каждая из которых относится к конкретному диагностируемому состоянию (режиму работы объекта диагностики). Это дает возможность описания модели сравнительно небольшим количеством признаков  $n_i < n$  ( $i$  – номер модели). При этом анализ моделей объекта выполняется в два этапа, каждый из которых реализуется сравнительно простыми и быстрыми алгоритмами. На первом этапе оценивается вид модели, т.е. определяются глобальные параметры без детализации. На втором этапе оценивается полнота соответствия БПП принятой модели. Использование упрощенных моделей позволяет добиться того, что суммарное время анализа на двух этапах  $T_{a1} + T_{a2}$  будет меньше заданного времени  $T_3$ .

Модели, построенные на основе ВП, позволяют обнаруживать не только частоты, принадлежащие дефектам, но и время их появления. Используя ВП, можно обнаружить такие тонкие свойства ответного сигнала, которые другие преобразования пропускают или игнорируют. Следует отметить, что данное преобразование оперирует не непосредственно частотами, а масштабами. Поэтому информативность ВП гораздо выше, чем информативность Фурье-преобразования. Это связано с тем, что ВП  $W(x, a)$  является одновременно функцией двух переменных:

$$W(x, a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{\Psi} \left( \frac{t-x}{a} \right) f(t) dt, \quad (5)$$

где  $x$  – сдвиг;  $a$  – масштаб;  $t$  – время;  $\overline{\Psi}$  – вейвлет функция;  $f(t)$  – исследуемая функция.

При разработке алгоритмов ВП большое значение имеет специфика решаемой задачи. Так, при диагностировании датчиков быстропеременных давлений, функционирование которых связано с быстрым изменением рабочих параметров измеряемой среды и диагностируемого объекта, особое внимание должно уделяться под-

бору параметров ВП. Это относится и к подбору самой вейвлет-функции. Существует большое количество вейвлет-функций, самые известные из которых вейвлет Морле, Вейвлет Хаара (*HAAR*), *FHAT*-вейвлет, *MHAT*-вейвлет, *Wave*-вейвлет.

Одной из главных проблем ВП является интерпретация результатов. Это связано с тем, что при ВП используется две переменные: сдвиг ( $x$ ) и масштаб ( $a$ ). То есть при интерпретации необходимо обеспечить получение таких результатов ВП, чтобы можно было однозначно судить об изменении частотных свойств исследуемого сигнала и о времени этого изменения. Получение таких взаимосвязанных данных требует анализа большого объема диагностической информации, значительная часть которой относится к быстропеременным процессам (вибрации, пульсации давления, акустические шумы и проч.), несущим большую диагностическую информацию.

Скейлограмма позволяет по размерам и интенсивности серого цвета (рис. 3,в) достаточно быстро определить структуру исходного сигнала, которая представляет сумму четырех гармоник с разными амплитудами и частотами (рис. 3,а,б).

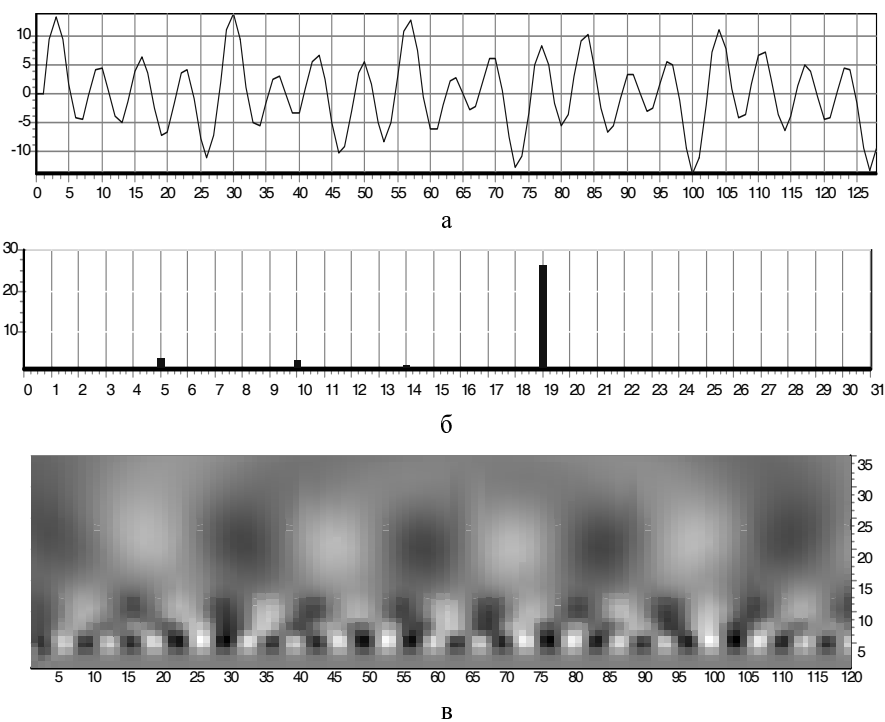


Рис. 3. Вид исходного вибросигнала (а), его частотный спектр (б) и скейлограмма (в)

В результате использования неразрушающих методов контроля, основанных на прямом и обратном пьезоэффекте и применения для анализа спектра вибросигналов вейвлет-преобразования, можно повысить информативность диагностики и контроля различных агрегатов и узлов специальной техники.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Карташов И.А. И.Б. Марченко.* Пьезоэлектрические трансформаторы. – Киев, 1978.
2. *Шарапов В.М., Мусяенко М.П., Шаранова Е.В.* Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.

3. Лихачев В.Я. Техническая диагностика пневмогидравлических систем ЖРД. – М.: Машиностроение, 1983. – 204 с.
4. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. СПб.: Изд-во ВУС, 1999. – 208 с
5. Новиков Л.В. Спектральный анализ сигналов в базисе вейвлетов // Научное приборостроение. – 2000. – Т. 10, № 3. – С. 57-64.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.

**Байдаров Сергей Юрьевич**

Федеральное государственное УП ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко».

E-mail: info@startatom.ru.

442960, Пензенская обл., г. Заречный, проспект Мира, д. 1.

Тел.: 88412582755; факс: 88412651758.

**Baydarov Sergey Urievich**

Federal State Unitary Enterprise Federal Research and Production Center Production Complex Start named after M.V. Protsenko.

E-mail: info@startatom.ru.

1, Mira Prospekt, Zarechny, Penza Region, 442960, Russia.

Phone: +78412582755; Fax: +78412651758.

УДК 681.3.06:681.323(519.6)

**А.Н. Голиков**

**КУСОЧНО-ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ФУНКЦИЙ ДВУХ ПЕРЕМЕННЫХ, ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ И ДВОЙНЫХ ИНТЕГРАЛОВ\***

*Излагается кусочно-полиномиальная схема аппроксимации действительных функций двух действительных переменных на основе интерполяционных полиномов Ньютона от двух переменных. Исходная прямоугольная область определения функции дробится на треугольные подобласти. На каждой подобласти строится соответствующий полином Ньютона степени минимальной для данного числа подобластей. Аппроксимирующий полином приводится к каноническому виду, после чего применяется для приближённого вычисления частных производных и двойных интегралов по прямоугольной области.*

*Кусочно-полиномиальная схема; интерполяция по Ньютону; аппроксимация частных производных; приближенное вычисление определённых интегралов.*

**A.N. Golikov**

**PIECEWISE-POLYNOMIAL APPROXIMATION FUNCTIONS OF TWO VARIABLES, PARTIAL DERIVATIVES AND DOUBLE INTEGRALS**

*Presents a piecewise polynomial approximation scheme of real functions of two real variables, based on Newton's interpolating polynomials of two variables. The original rectangular domain of the function is split into triangular sub-domains. On each sub-domain is constructed corresponding Newton polynomial of degree minimum for a given number of sub-domains. Approximating polynomial is to the canonical form, and then applies for an approximate calculation of partial derivatives and double integrals over a rectangular area.*

*Piecewise-polynomial scheme; according to Newton interpolation; approximation of partial; approximate calculation of definite integrals.*

---

\* Работа поддержана РФФИ, грант по проекту № 10-07-00178а за 2010 год.