

АНАЛИЗ СВОЙСТВА СТАЦИОНАРНОСТИ ЗОНДИРУЮЩЕГО УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА

Рассматривается задача, суть которой состоит в исследовании и анализе свойства стационарности реализаций виброакустического информационного сигнала, излучаемого при технологическом воздействии рабочих частей режущего инструмента на угольный забой очистной выработки.

Розглянута задача, суттю якої є дослідження та аналіз властивості стаціонарності реалізацій віброакустичного інформаційного сигналу, який випромінюється під час технологічної взаємодії робочих деталей ріжучого інструменту на вугільний вибій очистної виробки.

Vibroacoustic signal emitted while cutting tool impact on coal face are studied. Stationary properties of signal realization are analyzed.

Ведение. Постановка задачи. Формулировка предмета и цели исследований. Внезапные выбросы угля и газа в угольных шахтах, являются наиболее сложными и опасными из всех проявлений горного давления. Проблема исследования этого явления приобретает все большее значение в связи с интенсификацией горных работ и увеличением глубины шахт. Этими факторами обусловлен неослабевающий интерес к исследованиям газодинамических проявлений горного давления во многих странах, особенно в США, Индии, Китае, Великобритании, Польше, Германии. Особое внимание уделяется разработке надежных методов непрерывного прогноза газодинамических явлений.

Известно [1], что информацию о параметрах напряженного состояния газонасыщенного угленосного массива можно получить, исследуя функцию вариации частот ω энергетического спектра $S(\omega, t)$ виброакустического информационного сигнала $s(t)$, который излучается при технологическом воздействии рабочих частей режущего инструмента на забой выработки. Современный аналоговый метод анализа [2,3] функции вариации $S(\omega, t)$ основан на непрерывном исследовании спектральных характеристик реализаций информационного сигнала $s(t)$ в соответствии с классическим [3] выражением

$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt$, которое для применяемого метода преобразуется к математической модели статистической оценки спектральных характеристик:

$$\langle S(\omega, t) \rangle = \int_0^{T_p} \langle s(t) \rangle e^{-j\omega_i t} dt, \quad (1)$$

$$t \in T_p, i \in n$$

где: $\langle \dots \rangle$ – операция статистического усреднения по ансамблю реализации; T_p – время усреднения, равное постоянной времени фильтра; i – количество анали-

зируемых частотных составляющих. Строгая адекватность спектральной модели (1) обеспечивается при наличии свойства стационарности реализации информационного сигнала $s(t)$ на интервале времени T_p . Современный аналоговый метод анализа спектральных характеристик $\langle S(\omega, t) \rangle$ предполагает подтверждение гипотезы о стационарности, однако результатов исследования и анализа этой гипотезы для виброакустического информационного сигнала, излучаемого при технологическом воздействии рабочих частей режущего инструмента на забой выработки, нами не обнаружено. Нами были проведены экспериментальные исследования спектра информационного сигнала, однако в них не были учтены параметры свойства его стационарности.

Решение **задачи**, суть которой состоит в исследовании и анализе свойства стационарности реализаций виброакустического информационного сигнала, излучаемого при технологическом воздействии рабочих частей режущего инструмента на забой выработки, является **целью исследований** настоящей статьи. Цель исследований достигается разработкой метода и методики исследований с последующим анализом их результатов. **Объектом исследований** являются реализации виброакустического сигнала, излучаемого при технологическом воздействии рабочих частей режущего инструмента на угольный пласт выработки, снятые в забое шахты «Краснолиманская» в период с 22 октября по 4 декабря 2009 г. **Предмет исследований** – характеристические параметры и функции гипотезы стационарности реализаций информационного сигнала.

Основная часть. Анализ оценки свойства стационарности сигнала горного давления. В основе спектральной математической модели анализа информационного сигнала лежит метод обратимых преобразований по системе ортогональных функций. Главное достоинство таких преобразований состоит в том, что они позволяют представить анализируемый сигнал $s(t)$ в виде конечной суммы k независимых детерминированных составляющих $s(t) = \sum_k a_k \psi_k(t)$.

Под спектральным излучением информационного сигнала $s(t)$ понимается процесс генерирования рабочими частями режущего инструмента детерминированных ортогональных составляющих $a_k \psi_k(t)$ с их пространственным суммированием по длине канала связи между источником и виброакустическим датчиком приемника-анализатора. Количество k ортогональных составляющих и значения их весовых коэффициентов a_k аутентифицируют информационную составляющую сигнала $s(t)$. Под спектральным анализом, соответственно, понимается процесс информационного разложения приемником сигнала $s(t)$ на ортогональные составляющие $a_k \psi_k(t)$ с их последующей информационной обработкой.

Анализ характеристик и параметров адекватности спектральной математической модели. В пространстве функций, заданных на конечном интервале $[0, T_p]$, норма, как наиболее общая числовая характеристика произвольной функции $s(t)$, по определению вычисляется как корень квадратный из скаляр-

ного произведения функции. В общем случае, для комплексных функций, квадрат нормы (энергия сигнала) соответствует выражению $\|s(t)\|^2 = \int_0^{Tp} s(t)s^*(t)dt$,

где $s^*(t)$ – функция, комплексно сопряженная с $s(t)$. Для информационного сигнала норма функции имеет конечное значение (интеграл сходится) и можно говорить, что функция принадлежит пространству функций $L^2[t], t = [0, Tp]$, интегрируемых с квадратом (пространство Гильберта), и имеет конечную энергию. В пространстве Гильберта на основе совокупности ортогональных функций с нулевым скалярным произведением всегда может быть создана система ортонормированных «осей» (базис пространства), при этом любой сигнал, принадлежащий этому пространству, может быть представлен в виде весовой суммы проекций сигнала на эти «оси» – базисных векторов. Базис пространства $L^2[t], t = [0, Tp]$ может быть образован любой ортогональной системой функций.

Наибольшее применение в спектральном анализе получила система комплексных экспоненциальных функций, которые определяются выражением (1). При известных выражениях базисных функций $\psi_k(t) = \exp(-j\omega t)$ сигнал $s(t)$ однозначно определяется совокупностью коэффициентов a_k и может быть абсолютно точно восстановлен по этим коэффициентам. Таким образом, любая функция Гильбертова пространства может быть представлена в виде комплексного ряда Фурье, который лежит в основе спектральной модели. При практических применениях ряд Фурье ограничивается определенным количеством членов k . Ограничение числа членов ряда означает аппроксимацию бесконечномерного сигнала k – мерной системой базисных функций спектра сигнала с определенной методической погрешности в зависимости от фактического спектра сигнала. Ограничение интервала интегрирования $t \in [Tp]$ временем «квазистационарности» параметров приводит к методическим (в сумме с вышеуказанной) погрешностям, которые влияют на информационную адекватность. Кроме того, тригонометрические (и связанные с ними комплексно-экспоненциальные) функции являются собственными (детерминированными на интервале интегрирования Tp) функциями и поэтому пригодны для описания сигналов, у которых изменения параметров во времени отсутствуют, т.е. стационарных.

Частичным выходом из ситуации квазистационарности сигнала является оконное спектральное преобразование с движущейся по сигналу оконной функцией $w(t), t \in [Tp]$. Временной интервал Tp сигнала $s(t)$, при его большой длительности, разделяется на подинтервалы $Tw < Tp$, и преобразование Фурье выполняется последовательно для каждого подинтервала в отдельности. Тем самым осуществляется переход к частотно-временному представлению информационного сигнала, при этом в пределах каждого подинтервала Tw сигнал $s(t)$ должен быть стационарным. Результатом оконного преобразования является семейство спектров, которым отображается изменение спектра сигнала по интервалам сдвига окна преобразования. Это в какой-то мере позволяет выделять на координатной оси и анализировать особенности нестационарных на ин-

тервале Tp сигналов. Размер оконной функции $w(t)$ обычно устанавливается соизмеримым с интервалом стационарности сигнала. По существу, таким преобразованием один нелокализованный базис разбивается на определенное количество базисов, локализованных в пределах функции $w(t)$, что позволяет представлять результат преобразования в виде функции двух переменных: частоты и временного положения окна. При этом интервал стационарности Tw сигнала $s(t)$ необходимо знать априори.

Оконное преобразование выполняется в соответствии с выражением:

$$S(\omega, t) = f \left[\int_{\omega} s(t) w(Tw - \tau\omega) \exp(-j\omega t) d\omega \right], \quad (2)$$

$$t \in [\tau w] \in [Tw] \in [Tp], \omega \in [\Delta\Omega]$$

$w(Tw - \tau\omega)$ представляет собой функцию (в общем случае – комплексную) окна сдвига преобразования по координате Tw , где параметром $\tau\omega$ задаются фиксированные значения сдвига. Эффективная ширина оконной функции сохраняется постоянной по всему времени Tp анализа сигнала. Координатная разрешающая способность оконного преобразования определяется шириной оконной функции Tw и обратно пропорциональна частотной $\Delta\omega$ разрешающей способности. При ширине оконной функции, равной Tw , частотная разрешающая способность определяется значением $\Delta\omega = \frac{2\pi}{Tw}$. Для оконного преобразования Фурье вышеперечисленные требования и ограничения являются принципиальными.

Частотно-временное оконное преобразование применяется для анализа нестационарных сигналов, если их частотный состав изменяется во времени. Функция оконного преобразования (2) может быть переведена в трехмерный вариант с независимыми переменными и по времени τ , и по частоте ω :

$$S(\omega, t) = f \left[\int_{\tau} s(t - \tau) w(\tau) \exp(-j\omega t) d\tau \right], \quad (3)$$

$$t \in [\tau], \omega \in [\Delta\Omega]$$

Как видно, адекватность спектрального метода анализа информационного сигнала полностью определяется его стационарностью на анализируемых временных интервалах.

В последующих экспериментальных исследованиях будем определять основные характеристики и параметры стационарности сигнала $s(t, \Delta t)$ [5] как случайного процесса, т.е. представим информационный сигнал в виде числового ряда, отражающего значения функции $s(t, \Delta t)$ через детерминированные дискретные интервалы времени $\Delta t \ll Tp$. Строгое определение стационарности случайного процесса подразумевает неизменность функции распределения плотности вероятностей (ФРПВ) его значений

$wp_n[s(t, \Delta t)], t \in (\Delta t), t \in (Tp), \Delta t \in (Tp)$ произвольного порядка n на любых временных интервалах его реализаций $t \in [Tp]$, в частном случае одномерная $wp_1[s(t)]$ ФРПВ

$$wp_1[s(t, \Delta t)] = \frac{\partial F[s(t, \Delta t)]}{\partial s(t, \Delta t)}, \quad (4)$$

где $F[s(t, \Delta t)] = p[s(t, \Delta t) < x]$ – интегральная функция распределения вероятностей.

Неизменность ФРПВ определяет постоянство моментов этих реализаций: среднего

$$m[s(t, \Delta t)] = \int_0^{Tp} s(t) wp_1[s(t, \Delta t)] ds$$

и дисперсии

$$D[s(t, \Delta t)] = m\{[s(t, \Delta t) - m[s(t, \Delta t)]]^2\},$$

необходимых, но недостаточных условий стационарности. Менее строго (в широком смысле по А.Я. Хинчину) стационарность характеризует неизменность автокорреляционных функций (АКФ)

$$R_{ss}(t, \Delta t, \tau) = \int_0^{Tw} [s(t, \Delta t), s(t, \tau)] d\tau, \tau \in (Tw). \quad (5)$$

Таким образом, аргументированным требованием, ограничивающим применение спектральных методов как инструмента параметрического информационного анализа, является строгое требование стационарности функции $s(t)$ на исследуемом временном интервале Tp , либо оконных интервалах Tw . Ранжируем порядок требований метода исследования стационарности оконных реализаций: среднее и дисперсия, АКФ (5), ФРПВ (4).

Методика и результаты экспериментальных исследований свойства стационарности реализаций информационного сигнала. В качестве исследуемых реализаций информационного сигнала $s(t)$ возьмем два сигнала: $s_1(t)$ – снятый во время безопасной работы технологического оборудования и $s_2(t)$ – снятый перед выбросом. Исследования требований будем проводить в среде пакета *MatLab* методом расчета функций характеристических параметров, определенных в предыдущем подразделе. Параметры аналого-цифрового преобразования определим в соответствии с методикой [6]. Частота дискретизации $f_d \geq 1/\Delta t > 22000\text{Hz}$, количество уровней квантования – 16. Интервал анализа Tp имеет ограничения: он должен обеспечивать анализ минимальной частоты $f_{\min} = 15\text{Hz}$ информационного сигнала, т.о. $Tp_{\max} \leq 100\text{ms}$, минимальное значение ограничено временем одного оборота режущего инструмента (2000 об/мин) $Tp_{\min} \geq 33\text{ms}$, причем, желательно чтобы $Tp_{\max} = kTp_{\min}$, где k – целое

неотрицательное число. Выберем $T_p = T_w \approx 99ms$. Параметр времени перекрытия интервалов анализа (3) выберем $\tau = 0.5T_p$.

Результаты исследований сигнала $s_1(t)$ приведены на рис. 1 и 2. Результаты исследований сигнала $s_2(t)$ приведены на рис. 3 и 4.

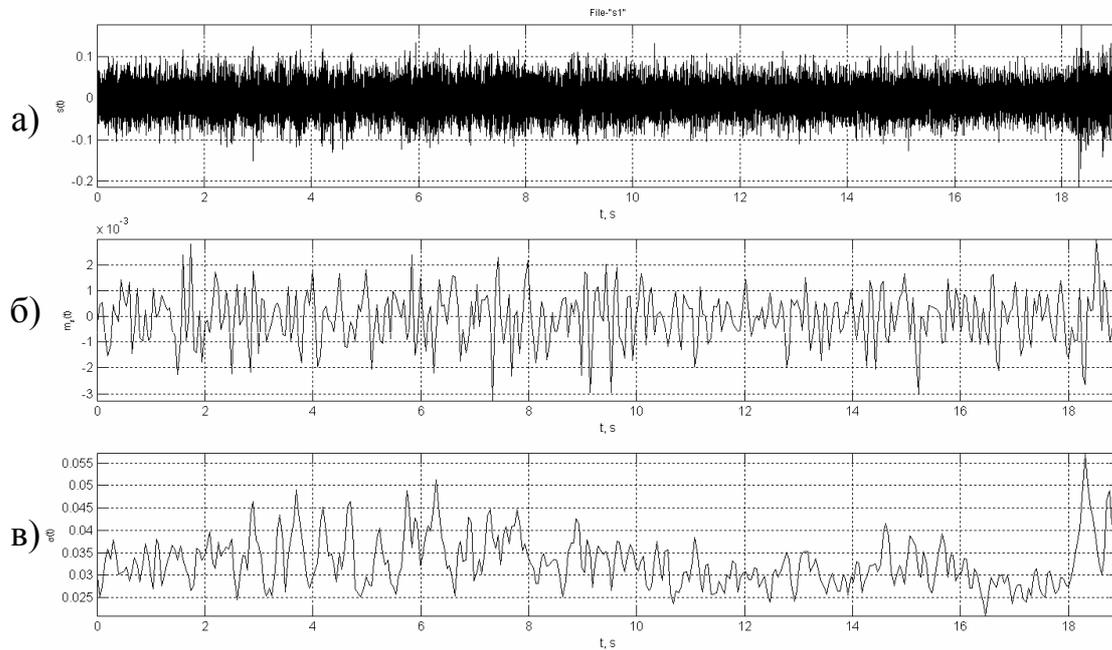


Рис. 1. Исследование параметров свойства стационарности реализаций сигнала $s_1(t)$: а) временная реализация; б) функция математического ожидания; в) функция среднеквадратического отклонения

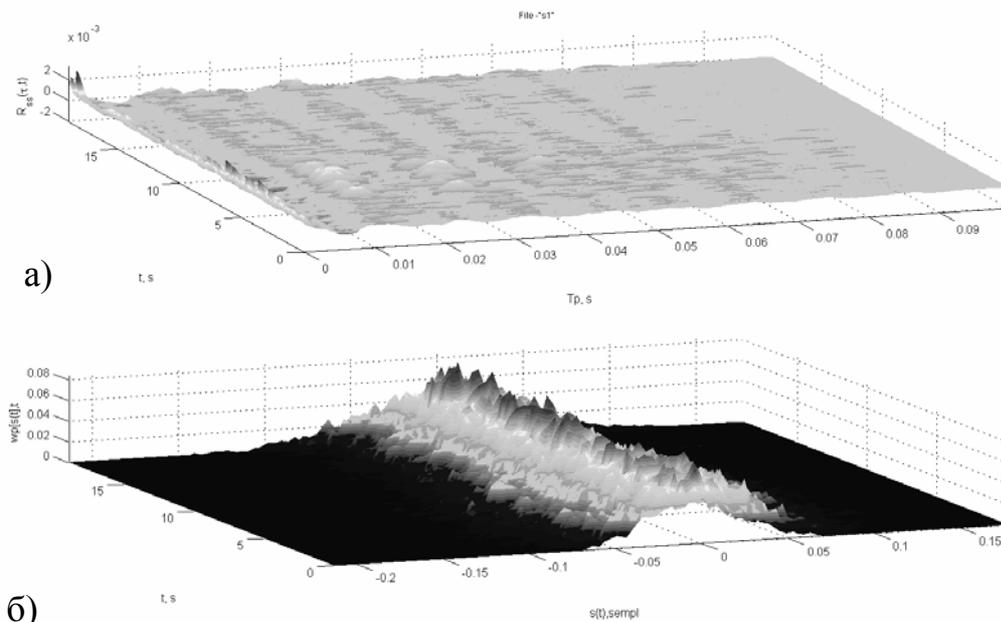


Рис. 2. Исследование параметров свойства стационарности реализаций сигнала $s_1(t)$: а) АКФ; б) ФРПВ

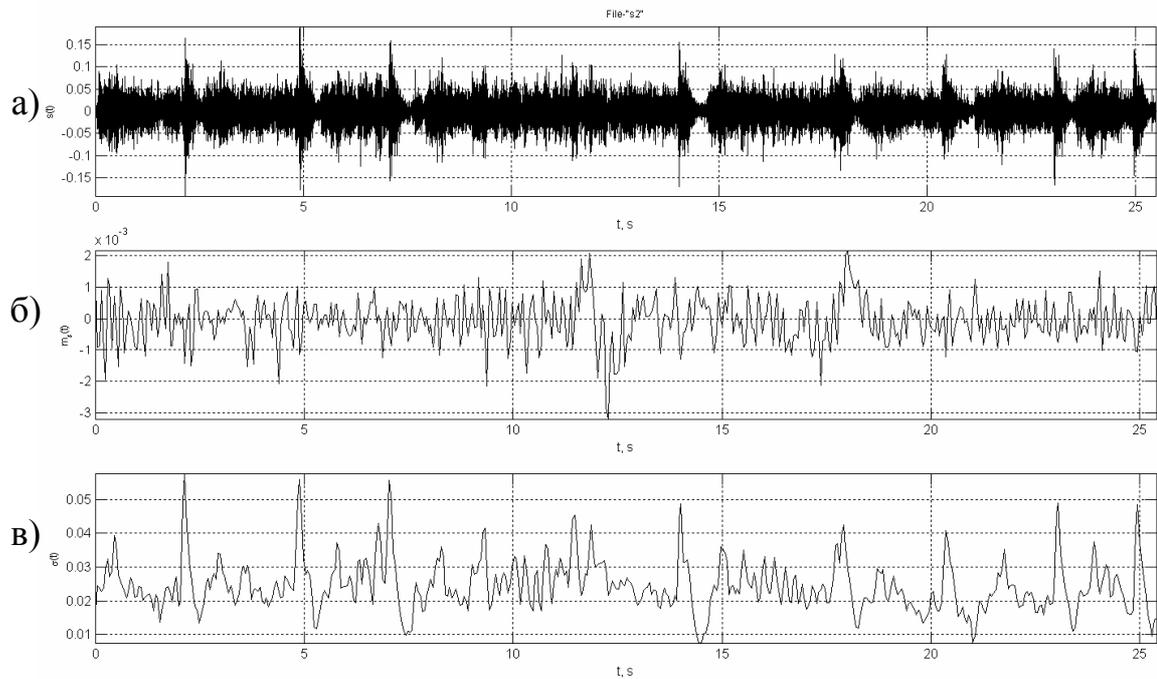


Рис. 3 Исследование параметров свойства стационарности реализаций сигнала $s_2(t)$: а) временная реализация; б) функция математического ожидания; в) функция среднеквадратического отклонения

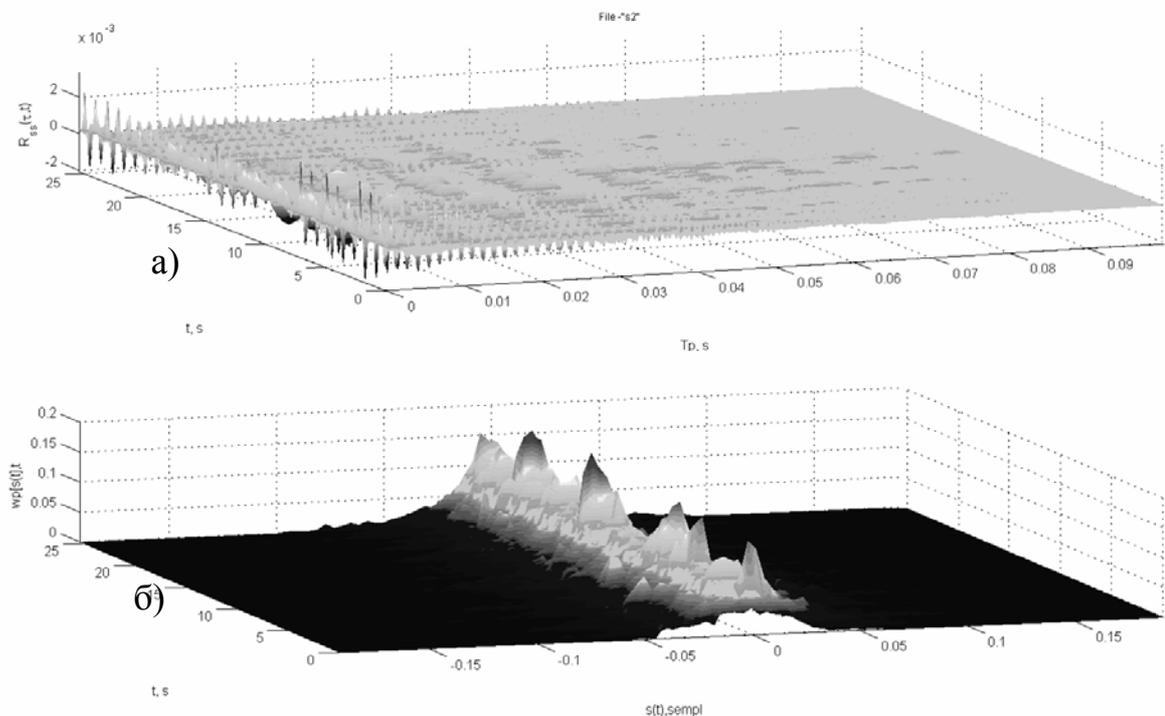


Рис. 4. Исследование параметров свойства стационарности реализаций сигнала $s_2(t)$: а) АКФ; б) ФРПВ

Проведём информационный анализ результатов исследований, принимая в качестве прикладной целевой функции – идентификацию момента выброса.

Анализ функций параметров математического ожидания (девиация до 2% от максимального значения сигнала) и среднеквадратического отклонения (девиация до 40%) обоих сигналов показывает, что квазистационарность этих параметров не влияет на целевую функцию. Визуальный анализ АКФ и ФРПВ показывает: оба сигнала нельзя считать строго стационарными даже в широком смысле; существенные различия в форме реализаций являются информационными с позиции целевой функции. Эти различия можно, в общем случае, характеризовать информационным расстоянием $H_R = Q(R_{s_1}, R_{s_2})$ для АКФ и $H_{wp} = Q(wp_{s_1}, wp_{s_2})$ для ФРПВ, где $Q(\cdot)$ – оператор анализа расстояния между идентифицируемыми признаками информационного сигнала.

Адекватность применения математической модели спектральных преобразований может определяться после доказательства её инвариантности к локальной параметрической квазистационарности информационного сигнала.

Выводы. Направления дальнейших исследований. Проведенные теоретические исследования и экспериментальный анализ параметра стационарности информационного сигнала излучаемого при технологическом воздействии рабочих частей режущего инструмента на забой выработки позволяет сделать следующие выводы.

1. Анализ реальных виброакустических сигналов, полученных на разных временных интервалах по отношению к моменту выброса нельзя считать стационарными даже в широком смысле. Адекватность применения математической модели спектральных преобразований, в части анализа целевой функции, может определяться после доказательства инвариантности модели к локальной параметрической квазистационарности информационного сигнала.

2. Отличие в девиации параметров АКФ и ФРПВ для исследуемых информационных сигналов (рис. 2,4) служат основанием дальнейших исследований информационного расстояния H между ними.

Список литературы

1. Анцыферов М.С. Сейсмоакустические исследования в угольных шахтах. [Текст] / М.С. Анцыферов, А.Г. Константинова, Л.Б. Переверзев – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 104 с.
2. Шашенко О.М. Спосіб діагностики гірського масиву [Текст] / (Патент на винахід № 43239А Україна, МКИ Е 21 F5/00 / О.М. Шашенко, Є.В. Масленников, заявл. 24.04.2001, опубл. 15.11.2001, бюл.№10. – I-II с.).
3. Масленников Е.В. Оценка возможностей способов прогноза динамических явлений на угольных пластах, опасных по внезапным выбросам угля и газа [Текст] / Е.В. Масленников // Науковий вісник НГА України. – 1999. – № 5. – С. 60–61.
4. Френкс Л. Теория сигналов [Текст] / Л Френкс – М.: Радио и связь, 1974. – 344 с.
5. Брандт З. Статистические методы анализа наблюдений. [Текст] / З. Брандт – М.: Мир, 1975. – 312 с.
6. Журавлев В.Н. Анализ влияния частоты дискретизации на точность цифровой обработки речевых сигналов в системах биометрической идентификации. [Текст] / В.Н. Журавлев Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – 2005. – № 10. – С. 51-57.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Шашенком О.М.
Надійшла до редакції 08.04.10*