

УДК 622.8+550.34

Головко Ю.Н., канд. физ.-мат. наук, доцент
(ГВУЗ «НГУ»)

**ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ ТЕКУЩЕМ ПРОГНОЗЕ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ШАХТАХ**

Головко Ю.М., канд. физ.-мат. наук, доцент
(ДВНЗ «НГУ»)

**ОЦІНКА СПЕКТРАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ СЕЙСМОАКУСТИЧНИХ
СИГНАЛІВ ПРИ ПОТОЧНОМУ ПРОГНОЗІ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ
У ШАХТАХ**

Golovko Yu.N., Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor
(SHEI "NMU")

**ESTIMATION OF SEISMOACOUSTIC SIGNAL SPECTRAL
PARAMETERS UNDER THE CURRENT PREDICTION OF
GASODYNAMIC PHENOMENA IN MINES**

Аннотация. При текущем прогнозе внезапных газодинамических явлений в угольных шахтах используются амплитудно-частотные спектры регистрируемых сейсмоакустических сигналов. Соответствующие нормативно установленные прогностические показатели были определены на основе многочисленных исследований. При этом, в большинстве случаев, в качестве датчиков использовались электродинамические велосиметры и применялся аналоговый спектральный анализ. В статье рассматриваются особенности, обусловленные переходом к применению пьезоэлектрических акселерометров и числовых методов анализа. Принимается, что регистрируемые акустические сигналы являются эргодическими стационарными случайными функциями. Предложено использовать в качестве прогностического показателя для газодинамического явления отношение «высокочастотной» и «низкочастотной» составляющих спектральной плотности мощности для зависимости скорости колебаний от времени. Такое отношение имеет ясный физический смысл и характеризует соотношение средних мощностей колебаний на соответствующих частотах. Рассмотрены особенности определения прогностического показателя и выполнена оценка его критических значений. Основываясь на известных эмпирических данных, показано, что можно ограничиться спектральным оцениванием. Получены оценки значений параметров цифрового спектрального анализа, позволяющих вычислять прогностический показатель с принятой точностью.

Ключевые слова: газодинамические явления, прогностический показатель, сейсмоакустический, спектральный анализ.

Введение. С увеличением глубины и интенсивности разработок угля опасность неожиданных газодинамических явлений (ГДЯ) постоянно возрастает, что, соответственно, повышает требования к методам их прогноза.

Различают зональные, локальные и текущие методы прогноза. Текущие методы прогноза применяются при проведении подготовительных выработок и ведении очистных работ и, согласно отраслевому стандарту [1], предусматри-

вают использование следующих способов оценки состояния около выработанного пространства:

- по начальной скорости газовыделения;
- по крепости угольного пласта;
- по акустической эмиссии (АЭ) угольного массива;
- по параметрам акустического сигнала;
- по амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ) акустического сигнала.

Последние три способа являются сейсмоакустическими и в наибольшей степени отвечают требованию непрерывности процесса контроля состояния выработок. Все они предусматривают регистрацию и анализ колебаний, распространяющихся в горной породе. При этом во всех случаях используются:

- шпуровой сейсмоприёмник-геофон (преобразует колебания породы в электрический сигнал);
- линия передачи сигнала;
- наземный блок (обеспечивает регистрацию и экспресс-анализ сигнала).

Можно указать на следующие различия способов (в соответствии с [1]):

- по АЭ. Регистрируются колебания, спонтанно возникающие в горном массиве при перераспределении напряжений в процессе ведения горных работ. Сигналы существенно нестационарные, имеют вид импульсов или волновых пакетов. Состояние массива оценивается исходя из количества импульсов, зарегистрированных в единицу времени. Используется аппаратура ЗУА;

- по АЧХ. Регистрируются колебания в породе, возбуждаемые при работе очистных, проходческих или буровых машин. Сигналы имеют вид случайных процессов. Анализируется частотная форма сигналов. Амплитуды «низкочастотной» и «высокочастотной» составляющих спектра сигнала определяются с помощью аналоговых высоко- и низкочастотных фильтров. Анализ сигналов и прогноз осуществляется на аппаратуре АК-1. В качестве подземного блока используется подземный блок аппаратуры ЗУА;

- по параметрам акустического сигнала. Регистрируются колебания в породе, возбуждаемые при работе очистных, проходческих или буровых машин. Переданный на поверхность аналоговый сигнал, имеющий вид случайного процесса, преобразуется в дискретный временной ряд, спектр которого и является основой для заключений о состоянии массива. Используется аппаратура АПСС.

Следует заметить, что каждый из сейсмоакустических способов достаточно жёстко привязан к определённому виду аппаратуры и даже к конкретному производителю данной аппаратуры, так как «сфера и условия применения, параметры и алгоритмы способов прогноза могут уточняться разработчиками этих способов» [1, п.6.1.5]. По-видимому, этим можно объяснить отсутствие в [1] каких-либо требований к точности определяемых параметров, рекомендуемым типам датчиков и даже указаний о том колебания какой именно механической величины (смещения, скорости, ускорения или резкости) регистрируются и анализируются. Последнее замечание особенно существенно для прогноза по АЧХ и прогноза по параметрам акустического сигнала, где

прогностические показатели формируются по параметрам соответствующих спектров. Простейший и наиболее широко применяемый показатель имеет вид отношения амплитуд «высокочастотной» (A_B) и «низкочастотной» (A_H) составляющих:

$$K_B = \frac{A_B}{A_H}. \quad (1)$$

Особенности применения частотного анализа для прогноза ГДЯ и являются предметом данной статьи.

Изменение спектральных характеристик акустических сигналов при изменении состояния пород около выработанного пространства отмечалось многими исследователями, но использование отношения (1) в качестве прогностического показателя, вычисленного для сигнала, генерируемого работающими механизмами, было впервые предложено в работе [Мирер С.В., Хмара О.И., Масленников Е.В., 1987]. Критические значения прогностического параметра (K_B^*), то есть такие значения при превышении которых состояние пласта следует рассматривать как опасное, по результатам наблюдений на ряде шахт Донбасса, было предложено в [Мирер С.В., Хмара О.И., Масленников Е.В., 1988]. Это удалось сделать, благодаря тому, что в процессе наблюдений произошёл ряд ГДЯ. Причём критические значения для разных условий оказались существенно разными: для очистного забоя при выемке комбайном $K_B^* = 3$; при выемке отбойным молотком $K_B^* = 1,5$; для забоя подготовительной выработки $K_B^* = 3,5$. Кроме того, сразу стало ясно, что спектральные характеристики существенно варьируются и прогностические параметры следует усреднять по достаточно большим временным промежуткам (не менее 3 секунд). Следует заметить, что во всех этих случаях использовались электродинамические датчики, интегрирование или дифференцирование сигналов не проводилось и, следовательно, исходный сигнал представлял собой зависимость скорости колебаний от времени.

Большинство исследований, послуживших основой для методов частотного анализа в шахтной акустике были получены именно на аналоговом оборудовании. В настоящее время наиболее широко применяются пьезоэлектрические акселерометры и цифровые методы анализа [2, 3]. При этом полученные ранее данные не всегда могут быть формально использованы. Изучение особенностей их применения является одной из целей данной работы.

Критическое значение прогностического параметра, вероятно, следует признать наиболее слабым местом рассматриваемого способа прогноза и контроля. Значение K_B^* должно быть установлено тем или иным способом для каждого разрабатываемого пласта. Согласно [1, п.6.1.7] критические значения должны быть получены в результате разведывательных наблюдений «в

безопасных по выбросам угля и газа зонах и вне зон геологических нарушений и повышенного горного давления». Но таким образом можно получить только безопасное значение прогностического параметра (обозначим его K_B^0), а не требуемое максимально допустимое значение, которое, естественно, должно быть больше абсолютно безопасного. Определение K_B^* , как среднего по результатам полученным в безопасных зонах неизбежно приведёт к высокому значению ошибок прогноза типа «ложная тревога» («false positive»). Таким образом, значение K_B^* должно устанавливаться как $K_B^* = k_B K_B^0$, где $k_B > 0$ и не может быть получено только на основании наблюдений в безопасной зоне. Величина k_B фактически определяется как обобщение наблюдений в условиях произошедших ГДЯ, возможно в существенно отличных от данного пласта условиях. Поэтому, в частности, крайне желательно чтобы используемый прогностический параметр имел ясный физический смысл.

Основная часть. Методы исследования сигналов в частотной области в значительной мере определяются свойствами исходных временных сигналов. Для их анализа существенно, что регистрируемые сигналы (реализации или выборочные функции) имеют вид случайных функций. Наиболее разработаны и обоснованы методы исследований стационарных случайных функций, поэтому было бы крайне удобно, если бы можно было считать регистрируемые сигналы стационарными случайными. Так как, сама генерация сигналов связана с разрушением породы, то получить несколько реализаций процесса в одних и тех же условиях принципиально невозможно, а, следовательно, и доказать, что имеет место стационарный случайный процесс согласно классического определения стационарности нельзя. Остаётся возможность допустить, что получаемые реализации представляют эргодический стационарный процесс, то есть считать, что по одной достаточно длинной реализации можно судить о характеристиках процесса также, как и по любому количеству реализаций. Теоретически длина реализации при этом должна быть бесконечной, но практически данная модель принимается если различия характеристик, определённых на конечных интервалах одной реализации, не превосходят выборочной изменчивости статистических оценок с приемлемым уровнем значимости [Bendat J.S., Piersol A.G, 1986]. Выбор длины конечных интервалов не является тривиальной задачей и определяется как видом сигнала, так и вычисляемой характеристикой. Строго говоря, так как источник колебаний перемещается, свойства породы в зоне разрушения изменяются, то сигналы априори являются нестационарными. Однако, если длины временных отрезков сравнительно короткие и при принятом уровне значимости можно ограничиться их небольшим количеством, то «нестационарность может не проявиться». Однозначно оценить правомерность допущения об эргодичности можно только по результатам расчётов для конкретного сигнала.

Следует заметить, что неявно допущение об эргодичности процесса принималось изначально при исследовании сейсмоакустических сигналов, регистрируемых в шахтных условиях при работе добычных механизмов. Так

многочисленные исследования, послужившие основой для формулировки критерия по параметру (1), были проведены следующим образом: звуковой сигнал, воспринятый геофоном и переданный на поверхность, записывался на магнитную ленту, затем запись пропусклась через узкополосный фильтр, а полученное на выходе фильтра напряжение определялось стрелочным вольтметром. Если обозначить через $x(t, \nu, \nu_k, B)$ реализацию на выходе фильтра с центральной частотой ν_k и полосой пропускания B , а время установления показаний вольтметра τ_V , то получаемое таким образом показание вольтметра $U(\nu_k, B)$ следует интерпретировать с точностью до постоянного множителя как усреднённую по времени и интегральную по полосе пропускания истинную одностороннюю амплитудную спектральную плотность скорости колебаний $G(t, \nu)$:

$$U(\nu_k, B) \propto \frac{1}{\tau_V} \int_0^{\tau_V} dt \int_{\nu_k - \frac{B}{2}}^{\nu_k + \frac{B}{2}} x(t, \nu, \nu_k, B) d\nu = \frac{1}{\tau_V} \int_0^{\tau_V} dt \int_{\nu_k - \frac{B}{2}}^{\nu_k + \frac{B}{2}} G(t, \nu) d\nu \quad (2)$$

Для используемых, например, в работе [4] избирательного усилителя ИГУ-60 и стрелочного милливольтметра ВЗ-33 значения B и τ_V составляли 30 Hz и 4 с соответственно. Учитывая достаточно большое значение τ_V , можно считать, что оценка (2), а следовательно, и построенные на основе таким образом оцениваемых спектральных функций критерии получены в допущении, что сигналы являются эргодическими случайными функциями. Кроме того, можно обратить внимание на широкий интервал усреднения по частоте.

Хотя аналоговые методы имеют определённые достоинства [5], в настоящее время развитие вычислительной техники и эффективных методов вычислений определило почти повсеместный переход к цифровым методам анализа сигналов. Поэтому далее будем считать, что генерируемые датчиком аналоговые сигналы $x(t)$ могут быть корректно преобразованы в дискретные временные ряды $x[j]$ с постоянным шагом дискретизации Δt . Кроме того, примем, что значения функции $x(t)$ с точностью до постоянного множителя равны соответствующим значениям скорости или ускорения в «точке» установки геофона.

В случае наличия единственной реализации сигнала $x(t)$ несложно получить спектральное представление для отрезка конечной длины T . Для детерминированного эргодического сигнала спектр является пределом при неограниченном увеличении T . Но $x(t)$ является случайной функцией, поэтому увеличение длины выборки не приводит к какой либо стабилизации значений спектральной плотности. Это объясняется тем, что случайный характер изменений амплитуд, частот и фаз, противоречит предположению Фурье-

анализа об их постоянстве [Jenkins G.M., Watts D.G., 1969]. Флуктуации спектральной плотности при увеличении T имеют порядок её средних значений, что делает непосредственное применение спектра сигнала для оценивания частотных составляющих бесполезным.

Для эргодических стационарных в широком смысле сигналов среднее значение и автоковариационная функция, вычисленная как

$$R(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(\tau)x(\tau+t)d\tau \quad (3)$$

не зависит от выбора начала отсчёта и является неслучайной функцией. В то же время $R(t)$ содержит информацию о колебательных составляющих сигнала, поэтому для частотного анализа следует использовать спектральное представление автоковариационной функции, а не исходного сигнала.

Связь между $R(t)$ и её спектральной плотностью $S(\nu)$ выражается формулами Винера-Хинчина:

$$S(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} R(t)e^{-i2\pi\nu t} dt ; \quad R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\nu)e^{i2\pi\nu t} d\nu \quad (4)$$

и, следовательно,

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(\nu)d\nu = R(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(\tau)d\tau, \quad (5)$$

то есть $S(\nu)$ представляет собой распределение по частоте средней величины квадрата реализации.

При этом доказано (см., например[Bendat J.S., Piersol A.G, 1986]), что состоятельная оценка $S(\nu)$ может быть вычислена по формуле:

$$S(\nu) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E[|X(\nu)|^2], \quad (6)$$

где $X(\nu)$ - спектральная плотность $x(t)$.

При реальных расчётах T всегда конечно, а вместо математического ожидания $E[]$ всегда берётся среднее по конечному ансамблю отрезков. Для действительных $x(t)$ выполняются равенства

$$R(-t) = R(t); \quad S(-\nu) = S^*(\nu) = S(\nu); \quad X(-\nu) = X^*(\nu); \quad |X(-\nu)| = |X(\nu)|$$

(* - знак комплексного сопряжения) и удобно ввести одностороннюю спектральную плотность, определённую, в отличии от $S(\nu)$ только для неотрицательных значений частоты:

$$G(\nu) = \begin{cases} 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E[|X(\nu)|^2] & \nu > 0 \\ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E[|X(0)|^2] & \nu = 0 \end{cases}$$

Часто, основываясь на электротехнической аналогии ($x(t)$ - ток или напряжение), $S(\nu)$ и $G(\nu)$ называют спектральными плотностями мощности не зависимо от природы исходного сигнала $x(t)$. В общем случае понятия энергии и мощности сигналов не являются физическими характеристиками измеряемых величин. Однако, очевидно, предпочтительно анализировать сигналы такой природы, для которых возможна энергетическая интерпретация соответствующих спектров.

При сейсмоакустических исследованиях существует определённая возможность выбора типа датчика преобразования механических колебаний в электрические. При этом физический смысл первичных сигналов будет различным. Наиболее распространёнными являются электродинамические (велосиметры) и пьезоэлектрические (акселерометры) датчики. В первом случае сигнал пропорционален скорости перемещения, а во втором ускорению в точке наблюдения.

Построение прогностического показателя, основываясь на скорости колебаний имеет преимущества, обусловленные очевидным физическим смыслом. Кинетическая энергия единицы объёма, ассоциированного с точкой наблюдения, в направлении регистрируемой скорости прямо пропорциональна квадрату скорости. А в рамках модели идеально упругой среды при волновом распространении возмущений, то есть, когда перемещение

$$\xi(\bar{r}, t) = f\left(t - \frac{\bar{r} \cdot \bar{n}}{c}\right),$$

и, следовательно,

$$\frac{\partial \xi}{\partial \ell} = -\frac{\bar{n} \cdot \bar{n}_\ell}{c} \frac{\partial \xi}{\partial t},$$

где \bar{r} - радиус-вектор произвольной точки волнового поля; \bar{n} - единичная нормаль к фронту волны; c - модуль скорости волны; $f(z)$ - произвольная функция; ℓ - произвольное направление с единичным направляющим вектором \bar{n}_ℓ , и полная энергия равна квадрату скорости с точностью до постоянного множителя. Поэтому, когда $x(t)$ - скорость, то $G(\nu)$ - распределение мощности

колебаний по частоте ν и отношение «высокочастотной» G_B и «низкочастотной» G_H составляющих $G(\nu)$

$$K_W = \frac{G_B}{G_H} \quad (7)$$

представляет собой отношение мощностей колебаний для разных частот или частотных интервалов. Далее будем называть спектральную плотность корреляционной функции для скорости колебаний спектральной плотностью мощности колебаний (СПМК), оставив традиционное понятие спектральной плотности мощности (СПМ) для сигнала любой природы.

Если (1) построено по зависимости скорости от времени, то K_W и K_B связаны однозначно $K_W = K_B^2$. Напомним, что именно электродинамические датчики скорости использовались при проведении исследований, послуживших основой для формулировки прогностического показателя в виде (1).

Критические значения для K_B во многих случаях лежат в интервале (3;3,5). Тогда, соответствующее критическое значение для K_W будет примерно равно 10, то есть в случае выбросоопасной ситуации мощность «высокочастотных» составляющих на порядок больше мощности «низкочастотных» составляющих.

Когда применяется пьезоэлектрический датчик, то первичный сигнал пропорционален ускорению в «точке» установки и столь ясная физическая интерпретация отсутствует. Чтобы получить СПМК, можно до всех вычислений проинтегрировать исходный сигнал датчика или после получения СПМ для сигнала-ускорения (обозначим его $G_A(\nu)$) пересчитать полученные значения по формуле:

$$G(\nu) = \frac{G_A(\nu)}{(2\pi\nu)^2}, \quad (\nu > 0). \quad (8)$$

Отношение «высокочастотной» G_{AB} и «низкочастотной» G_{AH} составляющих СПМ сигнала-ускорения $K_{AW} = \frac{G_{AB}}{G_{AH}}$ будет связано с K_B и K_W соотношениями:

$$K_{AW} = \left(\frac{\nu_B}{\nu_H} \right)^2 K_W = \left(\frac{\nu_B}{\nu_H} K_B \right)^2,$$

где ν_B, ν_H - частоты, ассоциированные с G_{AB} и G_{AH} .

Если исходить из как-либо установленного критического значения K_B^* и принять обычно выполняемое соотношение $\nu_B = (3-4)\nu_H$, то из последнего равенства для критического значения K_{AW} следует $K_{AW}^* \approx 10(K_B^*)^2$.

Использованные понятия «высокочастотная» и «низкочастотная» составляющие практически относятся не к значениям в точке, а представляют собой интегралы от спектральных кривых по некоторым конечным, во многих случаях достаточно большим, интервалам частоты. Тогда, если такие составляющие определяются по СПМК, то их отношение имеет смысл отношения энергий. Данное обстоятельство является дополнительным аргументом в пользу вычисления прогностического показателя при применении акселерометров по (8), а в случае применения велосиметров по (7).

До вычисления какого-либо спектрального прогностического параметра необходимо получить оценку спектральной плотности сигнала.

Рассмотрим некоторые особенности, связанные с вычислениями спектральных оценок по дискретному временному ряду длиной N с шагом дискретизации Δt и соответствующей длительностью $T = N\Delta t$. Предполагается применение быстрого преобразования Фурье (БПФ), позволяющего в случае использования (6) радикально сократить число требуемых операций по сравнению с (4).

Для получения состоятельной оценки спектральной плотности мощности, как было сказано выше, необходимо разбить весь ряд на сегменты, для каждого сегмента получить спектры, построить осреднённый спектр и оценить его изменчивость.

Пусть из исходного ряда получено R сегментов, каждый длиной $n < N$ с прежним шагом Δt и соответственной временной длительностью $T_R = n\Delta t$. Тогда для каждого k -го сегмента применяя БПФ можно получить ряд значений спектральной плотности $X_k[j]$ и СПМ

$$G_k[j] = \frac{2}{n\Delta t} |X_k[j]|^2 \quad (j = 0, 1, \dots, \frac{n}{2} + 1)$$

с шагом по частоте $\Delta \nu = \frac{1}{n\Delta t}$ и максимальной частотой $\nu_{\max} = \nu_{\frac{n}{2}+1} = \frac{1}{2\Delta t}$.

Для вычисленной затем по выборке $G_1[j], G_2[j], \dots, G_{Ns}[j]$ сглаженной оценки СПМ

$$G[j] = \frac{1}{R} \sum_{k=1}^R G_k[j] \quad (9)$$

точность, как и для выборки любой случайной величины, можно характеризовать средним квадратом отклонения от истинного значения $\underline{G}[j]$:

$$E[(G[j] - \underline{G}[j])^2].$$

Квадрат отклонения, в свою очередь, можно представить в виде суммы

$$E\left[(G[j]-\underline{G}[j])^2\right] = \sigma^2[j] + b^2[j] \quad (10)$$

где $\sigma^2[j] = E(G^2[j]) - E^2(G[j])$ - дисперсия оценки ; $b^2[j] = E\left\{\left(E(G[j]) - \underline{G}[j]\right)^2\right\}$ - квадрат смещения оценки.

В работе [Bendat J.S., Piersol A.G, 1986] для оценки СПМ $G(\nu)$, получаемой пропусканием сигнала в течении τ_ν через фильтр с полосой B и центральной частотой ν , предложено приближённое выражение для нормированного среднего квадрата ошибки:

$$\varepsilon^2(\nu) = \frac{E\left[(G(\nu) - \underline{G}(\nu))^2\right]}{\underline{G}^2(\nu)} \approx \frac{1}{B\tau_\nu} + \left(\frac{B^2}{24}\right)^2 \left(\frac{\underline{G}''(\nu)}{\underline{G}(\nu)}\right)^2 \quad (11)$$

Первые слагаемые в правых частях (10) и (11) является характеристиками случайности в величине ошибки, а вторые определяется систематическим отклонением.

Из (11) в частности следует, что увеличение полосы пропускания B приводит с одной стороны к уменьшению ошибки, обусловленной случайностью (первое слагаемое), а с другой к увеличению ошибки смещения (второе слагаемое). Особенно сложно в общем случае оценить влияние второго слагаемого. Однако элементарный анализ показывает, что ошибка смещения всегда ведёт к уменьшению колебаний кривой СПМ (занижению максимумов и увеличению минимумов), а в рамках модели одномерного осциллятора с небольшим затуханием систематической ошибкой можно пренебречь. Последнее утверждение также верно и в том случае, если спектр сигнала после фильтра мало меняется с частотой, что тем справедливее чем меньше B . Тогда пренебрегая вторым слагаемым в (11) можно оценить нормированную среднюю ошибку для полученных в [Мирер С.В., Хмара О.И., Масленников Е.В., 1987 и 1988] и в [2] спектров (заметим, не зависящую от частоты):

$$\varepsilon \approx \frac{1}{\sqrt{B\tau_\nu}} = \left\{ \begin{array}{l} B = 30 \text{ Hz;} \\ \tau_\nu = 3,5 \end{array} \right\} \approx 0,1 \quad (12)$$

Приближённо вычислить ошибку оценки $G[j]$ (9) до проведения экспериментов можно предположив, что исходный сигнал подчиняется нормальному распределению. Тогда действительная и мнимая части $X_k[j]$ являются выборками нормальных некоррелированных случайных величин с одинаковыми дисперсиями и каждое слагаемое в правой части (9) представляет собой сумму их квадратов. Используя далее выражения для математического ожидания и дисперсии хи-квадрат распределённой случайной величины, случайную погрешность $G[j]$ (9) можно представить в виде:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{4R}}{2R} = \frac{1}{\sqrt{R}} \quad (13)$$

Если сегменты выбираются без перекрытия, то для получения оценки с точностью ε требуется ряд состоящий из nR членов, которому соответствует временной интервал длиной $T = nR\Delta t$. При этом шаг дискретизации по частоте составит $\Delta\nu = \frac{1}{n\Delta t} = \frac{1}{T_R} = \frac{R}{T}$, а максимальная частота $\frac{1}{2\Delta t}$.

Значение T не может быть выбрано сколь угодно большим, так как значительное увеличение временной длины реализации неизбежно приведёт к «проявлению нестационарности», то есть следует стремиться к меньшему значению T . Уменьшение же T (при постоянстве числа сегментов R) приводит к ухудшению разрешающей способности спектра. Противоречивость условий обеспечивающих малую ошибку и высокое разрешение является общей проблемой спектрального анализа случайных сигналов. Ситуация несколько упрощается если различать задачи спектрального оценивания и оценивания параметров [Marple, Jr S.L., 1987]. Это можно сделать исходя из целей применения вычисляемых спектров. Рассматриваемые прогностические показатели можно рассматривать как энергетическое отношение для колебаний в определённых интервалах частот, а точное выявление частот гармонических составляющих, даже если они присутствуют в сигнале, вообще говоря, не требуется. Можно также заметить, что при использовании БПФ вычисляемые значения спектральной плотности $X_k[j]$ являются усреднёнными величинами по частотному отрезку длиной порядка $\Delta\nu$. Поэтому в данном контексте задачей рассматриваемого анализа следует считать спектральное оценивание.

Спектральное оценивание отдаёт предпочтение точности оценок возможно в ущерб спектральному разрешению. При использовании окон, по-видимому, ширина главного лепестка может быть сравнительно большой, а ограничивать по возможности следует боковые лепестки, ответственные за просачивание на соседние частоты. Последнее замечание важно, в частности, и потому, что в спектре возмущений, прошедших вдоль угольного пласта, окружённого более плотными породами, обычно ярко выражены составляющие со «средней» частотой близкой к критической частоте первой распространяющейся моды, то есть ярко выражены составляющие «не участвующие» в прогностическом показателе (1). Просачивание приводит к не контролируемому «перетеканию энергии» (в рассчитанном спектре) в «низкочастотную» и «высокочастотную» части спектра. Поэтому, желательно чтобы максимальный уровень боковых лепестков и скорость их спада были как можно ниже. В качестве таких окон можно использовать, например, окна Хана, Хемминга, Наттола для которых максимальные уровни боковых лепестков составляют -31,5; -43 и -98 Db, а скорость спадания лепестков -18; -6; -6 Db/октаву соответственно. При этом

нужно учитывать, что минимальный уровень дискретизированного сигнала составляет при 8-ми битовом слове -48,1 Db, а при 16-и битовом -96,3 Db.

Для оценки возможного компромисса между точностью и частотным разрешением, выражающемся при фиксированной длине реализации в выборе числа сегментов разбиения, можно исходить из данных полученных в указанных выше работах для аналоговых сигналов.

Требую, чтобы ошибки в случае выполнения анализа по временному ряду и в цитированных работах (формулы (13) и (12) соответственно) были примерно равны, получаем, что число сегментов должно быть около 100. Полагая $\Delta\nu = 30\text{Hz}$, получаем, что временная длина реализации T должна составлять около 3 с, а временная длина сегмента T_R около 0,03 с. При этом шаг дискретизации Δt ограничивается только требованием гарантированного отсутствия в сигнале составляющих с частотами более $k_c f_c$, где $f_c = \frac{1}{2\Delta t}$ -

частота Найквиста, $k_c = 0,5...0,8$ - коэффициент запаса. Данное условие, исключающее появление ошибок маскировки частот, можно обеспечить либо применением аналогового низкочастотного фильтра перед дискретизацией, либо, если дискретизация уже проведена, передискретизацией цифрового сигнала. Как правило, сигнал, прошедший дискретизацию на звуковой карте компьютера, требует проведения децимации. Перед проведением децимации нужно, используя цифровой фильтр, удалить составляющие с частотой, превышающей частоту децимации.

Конечно приведенные числовые значения, да и сами расчётные формулы, являются ориентировочными и ошибки вычисляемых оценок СПМ нужно находить для каждой исследуемой реализации. Основываясь на полученных таким образом данных следует корректировать значения параметров, влияющих на спектральные оценки, добиваясь тем самым требуемой точности оценок и вычисляемых по ним прогностических показателей.

Выводы.

1. Предложено использовать в качестве прогностического показателя ГДЯ отношения «высокочастотной» и «низкочастотной» составляющих спектральной плотности мощности. Данное отношение, когда сигналом является скорость механических колебаний в исследуемой «точке» породного массива, имеет ясный физический смысл и представляет собой отношение средних мощностей колебаний на соответствующих частотах.

Показана связь между предложенным показателем и известным показателем, построенным по амплитудно-частотной характеристике регистрируемого сигнала.

2. Приведены формулы, позволяющие вычислить предложенный прогностический показатель, когда колебания в породном массиве регистрируются акселерометром.

Выполнена количественная оценка критических значений показателя, основываясь на известных эмпирических данных.

3. Рассмотрены основные особенности спектрального анализа сигналов при прогнозе ГДЯ. Выполнены оценки значений параметров цифрового спектрального анализа, позволяющих вычислять прогностический показатель с принятой точностью.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила ведення гірничих робіт на пластах схильних до газодинамічних явищ: СОУ 10.1.00174088.011–2005. – [Чинний від 2005–12–30] / О.А. Брюханов, О.А. Агафонов, А.В. Анциферов [та ін.]. – Офіц. вид. – К. : Мінвуглепром України, 2005. – 224 с. – (Нормативний документ Мінвуглепрому України. Стандарт).
2. Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers. Theory and Application Handbook. Briel&Kiar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bksv.com/doc/bb0694.pdf> - Загл. с экрана.
3. Steven W. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, Second Edition, 1999, California Technical Publishing, P.O. Box 502407, San Diego, CA 92150 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.dspguide.com> - Загл. с экрана.
4. Масленников Евгений Владимирович. Обоснование параметров прогноза выбросоопасности в угольных шахтах на основе анализа акустического сигнала: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.11 / Масленников Евгений Владимирович. – Днепропетровск: НГУ, 2002. - 140 с.- Библиогр.: с. 126-136.
5. Agilent Spectrum Analysis Basics. Agilent Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/5952-0292EN.pdf - Загл. с экрана.

REFERENCES

1. Ukraine Ministry of Coal Industry (2005), 10.1.00174088.011–2005. *Pravyla vedennya hirnychykh robit na plastakh, shcho skhyl'ni do hazodynamichnykh yavysch: Normatyvnyy dokument Minvuhlepromu Ukrainy. Standart* [10.1.00174088.011–2005. Rules for conducting mining operations on strata that are prone to gasdynamic phenomena: Regulatory Document Coal Industry of Ukraine. Standard], Ukraine Ministry of Coal Industry, Kiev, Ukraine.
2. Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers, Theory and Application Handbook (2017), Briel&Kiar, available at: <https://www.bksv.com/doc/bb0694.pdf> (Accessed 19 September 2017).
3. Steven W. Smith (1999), The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, Second Edition, California Technical Publishing, P.O. Box 502407, San Diego, CA 92150, available at: <http://www.dspguide.com> (Accessed 19 September 2017).
4. Maslennikov, E.V. (2002), Substantiation of the emission forecast parameters in the coal mines on the basis of the analysis of the acoustic signal, Ph.D. (Tech.) Thesis, SHEI "National Mining University", Dnepropetrovsk, Ukraine.
5. Agilent Spectrum Analysis Basics (2017), Agilent Technologies, available at: http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/5952-0292EN.pdf (Accessed 19 September 2017).

Об авторах

Головко Юрий Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГВУЗ «НГУ»), Днепр, Украина, yngolovko@gmail.com

About the authors

Golovko Yuriy Nikolayevich, Candidate of Physics and Mathematics (Ph.D), Associate Professor, Associate Professor in Department of High Mathematics, State Higher Educational Institution «National Mining University» (SHEI «NMU»), Dnepr, Ukraine, yngolovko@gmail.com

Анотація. При поточному прогнозі раптових газодинамічних явищ у вугільних шахтах використовуються амплітудно-частотні спектри зареєстрованих сейсмоакустичних сигналів. Відповідні нормативно встановлені прогностичні показники були визначені за чисельними дослідженнями. При цьому, в більшості випадків, як датчики використовувалися електродинамічні велосиметри і застосовувався аналоговий спектральний аналіз. У статті розглядаються особливості, зумовлені переходом до застосування п'єзоелектричних

акселерометрів і числових методів аналізу. Приймається, що акустичні сигнали є ергодичними стаціонарними випадковими функціями. Запропоновано використовувати як прогностичний показник для газодинамічного явища відношення «високочастотної» та «низькочастотної» складових спектральної щільності потужності для залежності швидкості коливань від часу. Таке відношення має ясний фізичний зміст і характеризує співвідношення середніх потужностей коливань на відповідних частотах. Розглянуто особливості визначення прогностичного показника і виконано оцінку його критичних значень. Ґрунтуючись на відомих емпіричних даних, показано, що можна обмежитися спектральним оцінюванням. Отримано оцінки значень параметрів цифрового спектрального аналізу, що дозволяють обчислювати прогностичний показник з прийнятною точністю.

Ключові слова: газодинамічні явища, прогностичний показник, сейсмоакустичний, спектральний аналіз

Abstract. Amplitude-frequency spectra of the seismoacoustic signals are used for the current forecasts of sudden gasdynamic phenomena in coal mines. Relevant normative forecast indicators were determined on the basis of numerous studies. In most cases, electrodynamic velocimeters were used as sensors and analog spectral analysis was used. The author considers specific features caused by transition to the use of piezoelectric accelerometers and numerical methods of analysis. The investigations were based on the assumption that the signals were the ergodic stationary random functions. It was suggested that ratio between "high-frequency" and "low-frequency" components of the spectral power density of the oscillation speed could be the forecast indicator. This ratio has a clear physical essence and characterizes ratio of average oscillation powers at corresponding frequencies. Specificity of determining the forecast index was considered, and the index critical values were estimated. Basing on known empirical data, it is shown that the estimation can be confined by spectral analysis. Parameters of the digital spectral analysis were obtained, which help calculating of the forecast index with the accepted precision.

Keywords: Gasdynamic phenomena, prognostic index, seismoacoustic, spectral analysis

Стаття поступила в редакцію 18.07. 2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.П. Минеевым