УДК 621.396.6.001.64+621.396.6.001.66

#### А.А. Бомбизов

# Способ спектрально-временного анализа электромагнитного излучения горных пород для обнаружения предвестников геодинамических событий

Описан способ анализа в спектрально-временном представлении низкочастотного электромагнитного излучения горных пород для выявления развития деструктивных процессов в задаче обеспечения безопасности шахтной выработки. Приводится последовательность действий по обнаружению на фоне белого шума и стационарной помехи импульсных сигналов, соответствующих предвестникам геодинамических событий, вызванных образованием трещин в рудном массиве.

Ключевые слова: статистический анализ, электромагнитное излучение горных пород, спектрально-временное представление, идентификация предвестников геодинамического события.

В настоящее время особый интерес представляют измерения электромагнитных сигналов, возникающих в ходе изменения напряженно-деформированного состояния горных пород [1]. Изучая пространственную структуру электромагнитного поля и амплитуду его спектральных составляющих, можно оценить напряженно-деформированное состояние породы и прогнозировать обрушения [2]. Описываемый в литературе мониторинг шахтных сооружений заключается в сборе статистических данных и сводится к регистрации показателей электромагнитного излучения горных пород, соответствующих как долгосрочным процессам, так и краткосрочным. В работе [3] установлено, что наибольшей информативностью обладает диапазон частот от 1 до 100 кГц. Долгосрочному процессу изменения геодинамического состояния в шахтных сооружениях соответствует создаваемое горной породой фоновое излучение, интенсивность которого может изменяться в течение длительного периода времени в зависимости от изменения напряженно-деформированного состояния толщи пород. По излучению коротких электромагнитных импульсов можно косвенно судить о появлении разломов и трещин, что является показателем краткосрочных (быстропротекающих) процессов. Интенсивность и частотное распределение электромагнитных импульсов может служить еще одним параметром при анализе состояния горной породы и прогнозировании обрушения [4].

В известных приборах для мониторинга горных пород [1] индикатором изменения геодинамического состояния принято считать изменение во времени математического ожидания амплитуд электромагнитного сигнала во всём исследуемом частотном диапазоне или в поддиапазонах. Дополнительным информативным источником является регистрация импульсов, амплитуда которых превышает заданный порог [3]. Определяя количество импульсов в единицу времени, можно косвенно судить об интенсивности появления трещин и разломов в рудном теле. Анализ работ показывает, что в приборах отсутствуют эффективные алгоритмы для повышения избирательности регистрации импульсных сигналов. Например, регистрация импульсов по уровню никак не защищена от влияния стационарной наводки.

В статье приводятся результаты моделирования низкочастотного электромагнитного излучения горных пород в диапазоне частот 1–100 кГц в шахтных выработках и последовательность действий для идентификации и получения частотного распределения импульсов, соответствующих предвестникам геодинамических событий, на фоне белого шума и стационарной помехи.

Проведено моделирование излучаемых в результате разлома горной породы электромагнитных импульсов с наложением белого шума и гармонического сигнала с амплитудной модуляцией, имитирующего стационарную помеху. Для этого выбрана описанная в [5] модель сигнала, созданная на основе параметризации излучаемых импульсов во время сжатия образцов горной породы. Модель описывает сигнал синусоидальной формы с экспоненциальным нарастанием и спадом:

$$S(t) = \begin{cases} A_0 \sin[\omega(t-t_0)] \left[ 1 - \exp(\frac{-(t-t_0)}{\tau} \right], & t < T, \\ A_0 \sin[\omega(t-t_0)] \left[ 1 - \exp(\frac{-(T-t_0)}{\tau} \right] \exp(\frac{-(t-T)}{\tau}), & t \ge T, \end{cases}$$
(1)

где  $A_0$  – амплитуда огибающей импульса;  $\omega$  – круговая частота импульса ( $\omega = 2\pi f$ );  $t_0$  – время начала импульсного сигнала;  $\tau$  – постоянная времени нарастания и спада импульса; T – момент времени, при котором огибающая импульса достигает максимума своей амплитуды.

Для моделирования процессов выделения импульсных сигналов на фоне белого шума и стационарной помехи был выбран интервал времени длительностью 500 мс. На этом интервале с помощью (1) были смоделированы два импульсных сигнала, которые отстояли от начала интервала на  $t_{01} = 64,5$  мс и  $t_{02} = 65$  мс соответственно. На рис. 1 изображена временная диаграмма длительностью 0,8 мс с изображенными в соответствии с выражением (1) двумя импульсными сигналами, которые имитируют возникновение двух геодинамических событий в горной породе. Выбраны следующие параметры сигналов: амплитуды сигналов A<sub>0</sub> = 2,5; для первого сигнала частота выбрана  $f = 80 \kappa \Gamma_{\rm U}$ ; постоянная времени  $\tau = 10$  мкс; время от начала максимального размаха  $T - t_0 = 12$  мкс; параметры второго сигнала соответственно f = 20 кГц;  $\tau = 20$  мкс;  $T - t_0 = 34$  мкс. Частоты выбраны из соображения проверки результатов моделирования для верхних и нижних частот регистрируемого диапазона 1-100 кГц.



Рис. 1. Формы двух импульсных сигналов на частотах 80 и 20 кГц

Влияние исследуемой среды создано добавлением к импульсному сигналу аддитивного белого шума с амплитудой, меньшей исходного сигнала на 10 дБ, и помехой, которая представляет собой сигнал синусоидальной формы с амплитудной модуляцией. Частота сигнала, имитирующего стационарную помеху, выбрана равной 3 кГц, частота несущей 40 кГц, глубина модуляции 100%. Амплитуда равна половине А<sub>0</sub>. На рис. 2 приведена временная диаграмма суммы сигналов. Пунктирными линиями изображены области нахождения первого и второго импульсных сигналов.



Рис. 2. Форма сигнала с добавлением белого шума и синусоидальной помехи

Идентификация импульсов может быть произведена различными способами, например, детектированием сигнала по уровню, вейвлет-анализом с использованием вейвлета, соответствующего модели [5]. Из рис. 2 видно, что детектирование по уровню не позволит определить первый импульсный сигнал. Более сложный подход с использованием вейвлет-преобразования не обеспечит равномерного разрешения по частоте и тесно связано с формой сигнала, заложенного в модель поиска. То есть если параметры импульсных сигналов (форма, длительность, время нарастания и спада) могут быть различные, то подход, в основе которого лежит операция свертки с известной моделью сигнала, не может являться достаточно универсальным. Другие способы для идентификации сигналов на фоне помех можно найти работах Б. Р. Левина, Дж. Бендата, А. Пирсола и др., где распознавание сигналов на фоне помех сводится к статистическому анализу стационарных процессов как во временном, так и спектрально-временном представлениях [6, 7]. Такой подход наиболее близок для анализа электромагнитного излучения горных пород и распознавания отклонений от стационарности в виде импульсных сигналов.

Для проведения статистического анализа в работе выполнено с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) спектрально-временное разложение суммарного сигнала, полученного в результате моделирования. Для оптимального соотношения между аналоговой фильтрацией для выделения полосы частот 1–100 кГц и вычислительными мощностями, используемыми для последующей цифровой обработки, частота дискретизации принята равной ~ 1 МГц. Ширина временного окна для БПФ составляет ~ 1 мс (1024 отсчета). При этом шаг по частоте равен 1 кГц. Такое соотношение между разрешением по частоте и времени является наиболее подходящим для спектрально-временного разложения сигнала. Быстрое преобразование Фурье на ограниченном временном интервале может вызывать эффект Гиббса, минимизация которого производится взвешиванием исходного сигнала окном Кайзера с коэффициентом 9. Взвешивание оконной функцией в отличие от прямоугольной вызывает потери в исходном сигнале, так как в результате обработки происходит уменьшение амплитуды сигнала вблизи с краями временного окна. Для устранения этих потерь при расчете спектрально-временного представления с использованием оконной функции быстрое преобразование Фурье выполняется с наложением 50%, т.е. с шагом 512 отсчетов.

При рассмотрении спектрально-временного представления сигнала сложно идентифицировать импульсные сигналы на фоне помех. Для наглядности спектр суммарного сигнала (рис. 2) изображен на рис. 3, где непрерывная линия соответствует спектру импульсного сигнала с частотой 80 кГц, взятого на интервале времени 64–65 мс, пунктирная – 20 кГц на интервале 64,5–65,5 мс. Малая длительность определяемых импульсных сигналов не даёт явно выраженных максимумов в спектре. Сильное влияние на спектр оказывают помеха на центральной частоте 40 кГц с боковыми гармониками, отступающими на 3 кГц от центральной, и всплески спектральных составляющих белого шума. Неравномерность спектра белого шума обусловлена малым временным окном анализа.



Рис. 3. Спектр исследуемого сигнала

На следующем этапе моделирования проведена статистическая обработка спектральновременного представления сигнала. Была рассчитана дисперсия спектральных плотностей сигнала амплитуд при помощи следующего выражения (исходная формула взята из [7]):

$$D(f,t) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (x(f,t+\Delta t \cdot i) - \bar{x}(f,t..(t+\Delta t \cdot N)))^2}{N},$$
(2)

где N – размер последовательности спектральных плотностей для расчета дисперсии;  $\Delta t$  – минимальный шаг в спектрально-временном представлении;  $x(f,t+\Delta t \cdot i)$  – спектральная плотность на частоте f на каждом шаге рассчитываемого временного интервала;  $x(f,t..(t+\Delta t \cdot N))$  – математическое ожидание спектральной плотности на частоте f на интервале времени от t до  $(t+\Delta t \cdot N)$ .

Для расчета дисперсии весь моделируемый интервал разделялся на подынтервалы, состоящие из 32 отсчетов (N = 32). Для каждого подынтервала по выражению (2) рассчитывалась дисперсия. Таким образом, объём данных дисперсии спектрально-временного представления был сокращен в 32 раза. На рис. 4 изображен график зависимости дисперсии спектральных плотностей амплитуд сигнала от частоты и времени D(f, t). Темные области соответствуют большим значениям дисперсии.



Рис. 4. Дисперсия частотных составляющих сигнала D(f, t)

Из рис. 4 можно получить представление о факте возникновения события в момент времени 64 мс от начала моделируемого интервала. Также можно наблюдать две ярко выраженные помехи на частотах 37 и 43 кГц. Для фильтрации импульсного сигнала от стационарных помех произведена оценка степени разброса дисперсии всех спектральных составляющих по среднеквадратическому отклонению (СКО) на исследуемом временном интервале 500 мс. Исключены из анализируемой исходной дисперсии значения ниже определенного порога, пропорционального СКО, согласно следующему выражению:

$$D_{1}(f,t) = \begin{cases} D(f,t), D(f,t) \ge k \cdot \sigma(f), \\ 0, D(f,t) < k \cdot \sigma(f), \end{cases}$$
(3)

где D(f, t) – исходная дисперсия сигнала, рассчитанная по (1); k – весовой коэффициент;  $\sigma(f)$  – среднеквадратическое отклонение дисперсии, рассчитанное на всем временном интервале моделирования, для каждой частотной составляющей.



Обработанные данные согласно выражению (3) изображены на рис. 5. Весовой коэффициент k равен 4,2 и был выбран таким образом, чтобы пороговое значение  $k \cdot \sigma(f)$  было выше дисперсии помех для получения более «чистой» характеристики.

Расчет СКО в проведенном моделировании выполнялся по всему временному интервалу. Но при обработке результатов измерений, соответствующих 2–3 сут, такой подход не целесообразен, так как фоновая интенсивность излучения может изменяться со временем. Поэтому в реальных задачах временной интервал для оценки по среднеквадратическому отклонению должен быть ограничен и выбираться в результате предварительной оценки фонового излучения окружающей среды и калибровки по месту.

Весовой коэффициент для расчета СКО выбирается в процессе калибровки на свободном от импульсных сигналов,

связанных с геодинамическими событиями, временном участке. Таким образом, пороговое значение  $k \cdot \sigma(f)$  должно быть таким, чтобы исключить все стационарные и квазистационарные помехи, но при этом быть максимально к ним приближенным, чтобы не отфильтровать полезный сигнал.

При проведении моделирования выбор амплитуды полезного сигнала по отношению к шуму осуществлялся из соображений максимальной вероятности обнаружения сигнала. Отсюда для сигналов с сопоставимыми с моделированием временными параметрами чувствительность представленного способа обработки составляет порядка 10 дБ.

Излучение импульсных сигналов является признаком отклонения от нормального состояния горного массива. Анализ степени отклонения может быть напрямую связан с прогнозированием готовящегося обрушения. Способ, описанный в статье, может служить как для сокращения выходного объема данных в задаче продолжительного мониторинга, так и для получения спектральновременного изображения электромагнитных импульсов, по анализу которого можно получить представление о развитии деструктивных процессов в рудном массиве.

# Литература

1. Наблюдения изменений напряженного состояния массива горных пород после массового взрыва по параметрам электромагнитной эмиссии / А.А. Беспалько, А.П. Суржиков, Л.В. Яворович и др. // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7, ч. 2. – С. 253–256.

2. Беспалько А.А. Вариации электромагнитной эмиссии при изменении напряженнодеформированного состояния массива горных пород после массового взрыва / А.А. Беспалько, Л.В. Яворович / Сб. докл. Междунар. конф. «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений». – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2004. – 456 с.

3. Механоэлектрические преобразования в горных породах Таштагольского железорудного месторождения / А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, П.И. Федотов, Е.В. Виитман // Геодинамика. – 2008. – № 1 (7). – С. 54–60.

4. Кулаков Г.И. Прогноз разрушения горных пород на основе особенностей спектральновременных характеристик сигналов электромагнитного излучения / Г.И. Кулаков, Г.Е. Яковицкая // ПМГФ. – 1995. – № 6. – С. 153–157.

5. Rabinovitch A. Parameterization of Electromagnetic radiation pulses obtained by triaxial fracture in granite samples / A. Rabinovitch, V. Frid, D. Bahat // Philos. mag. lett. – 1998. – 77 (5). – P. 289–293.

6. Левин Б.Р. Теоретические основы статической радиотехники. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

7. Бенхат Дж. Прикладной анализ случайных данных: пер. с анг. / Дж. Бенхат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

8. Разработка прибора для мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород по косвенным признакам электромагнитного и акустического излучения / А.А. Бомбизов, А.А. Беспалько, А.Г. Лощилов, А.В. Филатов // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радио-электроники. – 2012. – № 2 (26), ч. 1. – С. 141–143.

# Бомбизов Александр Александрович

Мл. науч. сотрудник СКБ «Смена» ТУСУРа Тел: +7-903-951-15-24 Эл. почта: unclelab@gmail.com

# Bombizov A.A. Way of analyzing electromagnetic radiation of rocks to detect precursors of geodynamic events

The article presents a method for analyzing low-frequency electromagnetic radiation of rocks to identify the development of destructive processes in the task of ensuring the safety of mine workings. We describe the sequence of detection in white noise and stationary noise pulse signals corresponding to precursors of geodynamic events caused by cracks in the rock ore.

**Keywords:** rock, statistical analysis of the electromagnetic radiation, spectral-time representation, identification of geodynamic events.