

В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко, А.А. Кормнов

ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ОКРЕСТНОСТЯХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШУМОВЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ*

Представлено описание основных принципов аппаратного обеспечения контроля структуры породного массива ультразвуковым корреляционным и взаимно корреляционным методами. В основу метода положен принцип прозвучивания породного массива с использованием шумовых зондирующих сигналов. Сформулированы основные требования к составу и характеристикам такой аппаратуры. Разработаны аппаратные и программно-аппаратные подходы к созданию генераторов широкополосного шума. Приведено описание изготовленного портативного генератора широкополосного ультразвукового шума. Разработанный генератор позволяет производить излучение шумового сигнала в диапазоне от 10 до 500 кГц с амплитудой до 100 В. Проведено сравнение сигналов, полученных с помощью портативного генератора и математического моделирования. Предложены основные информативные параметры проведения контроля, такие как интервал корреляции сигнала и пространственный радиус корреляции. Обоснованы подходы к выбору пьезоэлектрических преобразователей для излучения и приема шумового сигнала с учетом их использования для натурных и лабораторных исследований структуры массива горных пород. Для стадии лабораторных исследований предложен вариант построения блока регистрации и анализа принятого шумового сигнала на основе современного осциллографа. Показаны преимущества предложенных автокорреляционных и взаимно корреляционных методов контроля структуры породного массива по сравнению с применяющимися на сегодняшний день импульсными ультразвуковыми методами.

Ключевые слова: массив горных пород, контроль, структура, корреляционный анализ, шумовой сигнал, ультразвук.

Прогноз динамических явлений в массиве и оценка устойчивости конструктивных элементов систем разработки полезных ископаемых являются приоритетными задачами прикладной геомеханики. При этом корректность прогнозов и оценок в значительной степени зависит от полноты и точности информации о массиве, получаемой с помощью экспериментальных методов.

Одним из наиболее универсальных методов оценки структуры и состоя-

ния массива можно считать ультразвуковой (УЗ) метод [1]. В классическом исполнении УЗ методы предполагают использование импульсных сигналов определенной частоты. Такого рода УЗ контроль позволяет измерять кинематические характеристики (например скорости продольных и поперечных волн в массиве), однако невысокая энергия сигналов не позволяет проводить контроль на больших базах, что критически важно при оценке крупноструктурных элементов массива.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ в рамках госзадания № 2014/97.

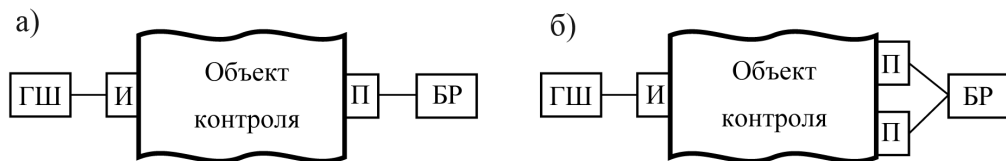


Рис. 1. Принципиальные схемы реализации автокорреляционного (а) и взаимно-корреляционного (б) методов геоконтроля

Одним из перспективных УЗ методов, позволяющих в значительной мере повысить информативность контроля и увеличить базы прозвучивания, является УЗ корреляционный метод с использованием шумовых зондирующих сигналов. В рамках такого метода излучаемый в массив шумовой сигнал, являющийся по сути своей случайным процессом, анализируется статистически путем построения корреляционных функций.

Суть УЗ корреляционного метода сводится к следующему. На противоположных сторонах объекта контроля размещаются излучатель (И) и приемник (П) УЗ сигналов. Излучатель (ГШ), подключенный к генератору, используемого для излучения в массив шумового сигнала в определенном частотном диапазоне. В зависимости от варианта применения метода могут использоваться как один приемный преобразователь, так и два. Данные с преобразователей поступают в блок регистрации и анализа информации (БР). Принципиальные схемы реализации метода представлены на рис. 1.

В случае использования одиночного приемника (рис. 1, а) в блоке анализа вычисляется автокорреляционная функция $B_{11}(\tau)$. При реализации взаимно корреляционного метода (рис. 1, б) используется два преобразователя и в блоке анализа вычисляется функция взаимной корреляции $B_{12}(\tau)$ [2]. Поскольку любые неоднородности в массиве приводят к декорреляции сигналов, метод позволяет оценивать степень нарушенности массива горных пород. В качестве основного

информативного параметра оценки степени декорреляции сигнала может выступать так называемый интервал корреляции $B_{11}(\tau_k)$, определяемый из

$$\tau_k = \frac{1}{B_{11}(0)} \int_0^{\infty} B_{11}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $B_{11}(0)$ – начальное значение автокорреляционной функции.

Наряду с интервалом корреляции сигнала в качестве информативного параметра контроля может выступать пространственный радиус корреляции, который в соответствии с [3] является расстоянием, на котором функция $B_{11}(\tau)$ уменьшается примерно вдвое по сравнению с дисперсией σ^2 . Таким образом, по уменьшению радиуса корреляции можно судить об увеличении степени неоднородности массива.

Описанный метод принципиально позволяет решать широкий спектр задач по контролю степени неоднородности и структуры массива, однако существенным ограничением на пути к практическому использованию такого метода является несовершенство существующего на сегодняшний день аппаратного обеспечения.

Источником электрического сигнала, возбуждающего излучающий преобразователь при реализации корреляционного метода является шумовой генератор. Принципиально можно выделить два подхода к созданию подобного устройства.

Первый подход является чисто аппаратным. Структурно такой генератор состоит из задающего генератора, предусилителя, ступенчатого attenuа-

Таблица 1

Технические характеристики генератора шума

Техническая характеристика	Значение
Рабочая полоса частот	10–500 кГц
Амплитуда шума	100 В
Аттенюатор	0 дБ – 6 дБ – 12 дБ
Питание	аккумулятор 15 В / 4 А-час
Время автономной работы	5–7 часов

тора, предназначенного для регулировки выходного напряжения и усилителя мощности. Подключение пьезопреобразователя к генератору осуществляется с помощью высокочастотного коаксиального кабеля. В качестве источника случайного шума в диапазоне частот от 10–500 кГц используется полупроводниковый стабилитрон. Принцип работы задающего генератора заключается в следующем. На анод шумового диода подается напряжение питания, близкое к напряжению отсечки. При таком режиме питания через шумовой диод протекает ток, величина которого меняется по случайному закону, т.к. диод открывается случайно из-за резкого перегиба вольт-амперной характеристики. На основе описанного выше принципа с использованием современной элементной базы был создан портативный шумовой генератор ГШ-1, основные технические характеристики которого представлены в табл. 1.

Основными достоинствами такого генератора можно считать высокое выходное напряжение, стабильность работы во всем частотном диапазоне и значительную продолжительность автономной работы.

Второй подход является программно-аппаратным. В этом случае форма сигнала задается программно путем математического моделирования в любом подходящем для этих целей программном пакете. Далее записанный в память сигнал ограниченной продолжительности подается на выход зву-

ковой карты устройства, подключенный к предварительному усилителю мощности. С выхода предусилителя сигнал поступает на пьезоэлектрический преобразователь. Наряду с очевидными достоинствами, связанными, в первую очередь, с широкими возможностями компьютерного моделирования различных типов шумов (например цветные и тональные шумы), существует и ряд недостатков. Одним из них можно считать ограниченную продолжительность записи сигнала, которая может негативно сказаться на длительных непрерывных испытаниях. Другой недостаток такого рода шумового генератора заключается в относительно низких частотах дискретизации большинства звуковых карт, редко превышающих значение 192 кГц. При этом, в соответствии с [4], рабочая частота такого генератора составит порядка 100 кГц, что вполне достаточно для работы в массиве на больших базах, но явно недостаточно для лабораторных исследований на относительно небольших образцах, где частоты прозвучивания должны достигать ~400 кГц.

На рис. 2 представлено сравнение сигналов и их спектров, полученных с помощью генератора ГШ-1 и компьютерного моделирования.

Как видно из рис. 2, компьютерное моделирование позволяет добиться более ровного спектрального состава, что делает перспективным программно-аппаратный подход создания шумового генератора, предназначенно-

го для решения определенного круга задач.

Отдельного внимания требует вопрос подбора пьезоэлектрических преобразователей. Большинство выпускаемых на сегодняшний день преобразователей являются резонансными, т.е. работают на относительно узкой полосе частот. Применительно к корреляционному методу контроля это приводит к тому, что из всей ширины спектра белого шума вырезается узкая область с явно преобладающей гармоникой на резонансной частоте. Это приводит к тому, что из случайного шумового, сигнал превращается в практически синусоидальный. При этом в значительной степени возрастает риск появления резонансных явлений в объекте контроля, которые могут привести к значительным искажениям принимаемого сигнала и, в конечном итоге, к невозможности проведения контроля. Исходя из этого, следует выбирать преобразователи с возможно большей полосой рабочих частот, которая гарантирует

сохранение случайной природы исходного шумового сигнала.

Важнейшим элементом аппаратного обеспечения корреляционного контроля является блок регистрации и анализа данных. Назначение такого блока – регистрация принимаемого сигнала и его анализ, заключающийся в построении авто- или взаимной корреляционной функции. Ранее были созданы экземпляры приборов, оснащенных корреляционными анализаторами [5], основой которых служили перестраиваемые вручную аналоговые линии задержки. Таким образом, для построения полной авто- или взаимной корреляционной функции требовалось произвести серию измерений с разной временной задержкой и по полученным данным отстроить коррелограммы, что являлось долгим и трудоемким процессом. На сегодняшний день более рациональным представляется подход, заключающийся в оцифровке принимаемого сигнала с помощью АЦП и дальнейшей его программной обработки.

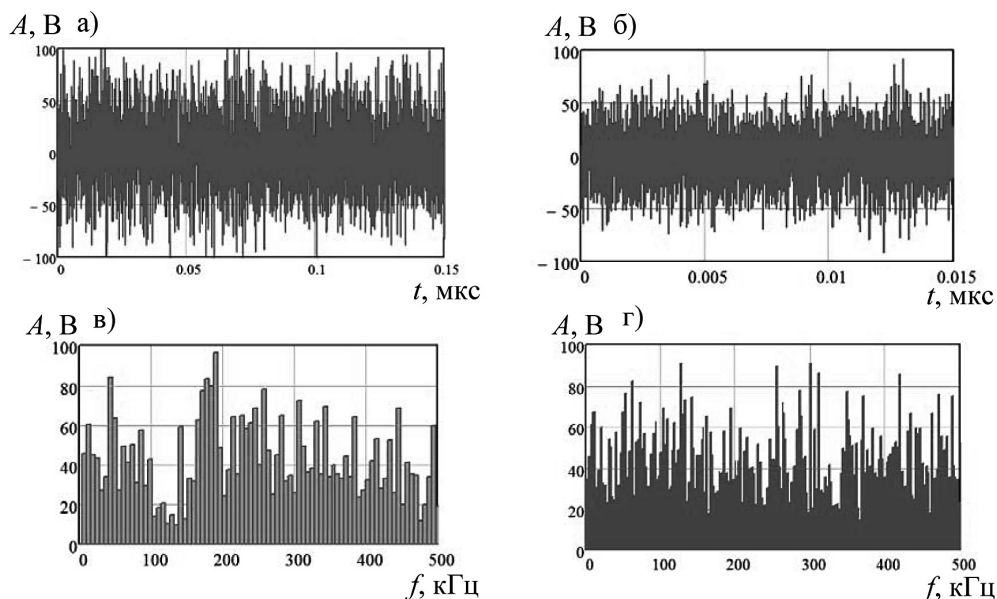


Рис. 2. Сравнение сигналов, полученных с помощью генератора шума ГШ-1 (а) и компьютерного моделирования (б), а также соответствующие им спектры (в) и (г)

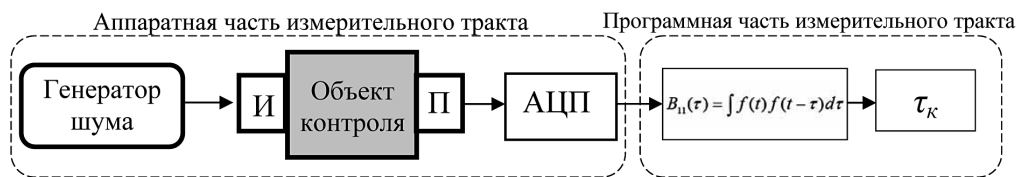


Рис. 3. Измерительный тракт аппаратуры для автокорреляционного метода контроля

Особое внимание стоит уделить выбору частоты дискретизации АЦП устройства анализа акустических сигналов, которая будет зависеть от максимальной частоты принимаемого акустического шумового сигнала. Такая частота, в свою очередь, будет зависеть от условий проведения измерений и от выбора параметров пьезопреобразователей. В лабораторных условиях некоторые измерения приходится производить на образцах, размеры которых весьма ограничены. Для формирования устойчивого сигнала в образце на базе измерений должно укладываться не менее трех длин волн λ , определяемых из соотношения

$$\lambda = C_p / f, \quad (2)$$

где C_p – скорость продольной волны в материале образца, f – максимальная частота излучаемого в образец акустического сигнала.

Из соотношения (2) видно, что при скорости $C_p = 3500$ м/с (характерной для горных пород) и базе измерений 5 см, максимальная частота излучаемого и принимаемого акустического сигнала должна превышать 220 кГц. С учетом теоремы Котельникова [6], минимальная частота дискретизации АЦП должна составлять ~500 кГц.

На стадии лабораторных исследований в качестве блока регистрации может выступать цифровой осциллограф, поддерживающий функцию записи сигналов в память и их экспорт. Получение готовых коррелограмм практически моментально в процессе проведения контроля позволяет зна-

чительно снизить погрешности, связанные с контактными условиями «преобразователь-массив», путем статистической обработки большого количества измерений.

На рис. 3. представлена схема измерительного тракта аппаратуры для автокорреляционного метода контроля.

Отличие аппаратуры для взаимного корреляционного метода будет заключаться только в присутствии второго приемного преобразователя, второго канала в АЦП и вычислении взаимной корреляционной функции вместо автокорреляционной.

В заключение стоит отметить, что корреляционно-шумовые методы оценки структурных неоднородностей в массиве остаются перспективным направлением развития активных УЗ методов контроля, как с точки зрения повышения баз прозвучивания и информативности контроля, так и с точки зрения потенциальной возможности создания искро- и взрывобезопасной аппаратуры для использования в угольных шахтах, опасных по газу и пыли (напряжения, подаваемые на преобразователь в корреляционном методе более чем на порядок меньше, чем в импульсном методе). Современная элементная база и развитие компьютерных технологий открывают новые горизонты развития корреляционных методов контроля в направлении повышения надежности и оперативности контроля, а также поиска новых информативных параметров при обработке и интерпретации получаемой информации.

1. Шкуратник В.Л. Горная геофизика. Ультразвуковые методы. – М.: МГИ, 1990. – 103 с.

2. Ямшиков В.С., Носов В.Н. Выбор информативных параметров при статистических методах дефектоскопии крупноструктурных материалов // Дефектоскопия. – 1974. – № 4. – С. 24–29.

3. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. Случайные процессы. – М.: Наука, Главная редакция физико-

математической литературы, 1978. – 463 с.

4. Вознесенский А.С. Средства передачи и обработки измерительной информации. – М.: МГТУ, 1999. – 268 с.

5. Ямшиков В.С., Носов В.Н. Аппаратура для ультразвуковой корреляционной дефектоскопии крупноструктурных материалов // Дефектоскопия. – 1975. – № 1. – С. 24–29.

6. Вознесенский А.С., Шкуратник В.Л. Электроника и измерительная техника. – М.: Горная книга, 2008. – 476 с. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Шкуратник Владимир Лазаревич – доктор технических наук, профессор,

Николенко Петр Владимирович – кандидат технических наук, доцент,

Кормнов Алексей Алексеевич – аспирант,

НИТУ «МИСиС», e-mail: ftkp@mail.ru.

UDC 622.02:539.2

CHARACTERISTICS OF INSTRUMENTAL SUPPORT OF STRUCTURAL HETEROGENEITY CONTROL AROUND MINING USING NOISE PROBING SIGNALS

Shkuratnik V.L.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,

Nikolenko P.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,

Kormnov A.A.¹, Graduate Student,

¹ National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia, e-mail: ftkp@mail.ru.

Description of basic principles of hardware support for rock mass structure control with use of ultrasonic correlation and cross-correlation methods is given. Method is based on principle of rock mass sounding using a noise probing signals. Basic requirements for characteristics and composition of such equipment are formulated. Hardware and software-hardware approaches for broadband noise generators creation are developed. The description of manufactured portable broadband ultrasonic noise generator is given. Designed generator allow to emit noise signals in a range from 10 to 500 kHz with an amplitude of up to 100 V. Comparison of signals received from a portable generator and mathematical modeling is carried out. Basic informative parameters of control, such as correlation interval of signal and spatial correlation radius are proposed. Approach to piezoelectric transducers for the transmission and reception of noise signal selection with regard to their use in field and laboratory studies of rock mass structure is substantiated. For laboratory research stage the option of building recording and analyzing unit for noise signal receiving on a basis of modern digital oscilloscope is offered. Advantages of proposed autocorrelation and cross-correlation methods of rock mass structure control in comparison with the applicable today pulsed ultrasonic methods are shown.

Key words: rock mass, control, structure, correlation analysis, the noise signal, ultrasound.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study has been supported by the Ministry of Education of the Russian Federation in the framework of the governmental assignment no. № 2014/97.

REFERENCES

1. Shkuratnik V.L. *Gornaya geofizika. Ul'trazvukovye metody* (Mining geophysics. Ultrasonic techniques), Moscow, MGI, 1990, 103 p.

2. Yamshchikov V.S., Nosov V.N. *Defektoskopiya*. 1974, no 4, pp. 24–29.

3. Rytov S.M. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Chast' 2. Sluchainye protsessy* (Introduction to statistical radio physics. Part 2. Random processes), Moscow, Nauka, 1978, 463 p.

4. Voznesenskii A.S. *Sredstva peredachi i obrabotki izmeritel'noi informatsii* (Measurement information transmission and processing media), Moscow, MGGU, 1999, 268 p.

5. Yamshchikov V.S., Nosov V.N. *Defektoskopiya*. 1975, no 1, pp. 24–29.

6. Voznesenskii A.S., Shkuratnik V.L. *Elektronika i izmeritel'naya tekhnika* (Electronics and instrumentation), Moscow, Gornaya kniga, 2008, 476 p.