

УДК 622:331, 622.4

В.К. Ушаков

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассмотрена проблема аэрологической безопасности горного производства. Выполнен анализ стохастической динамики структуры и параметров шахтных вентиляционных систем (ШВС). Проведена классификация случайных изменений ШВС по характеру их проявления во времени. Предложен метод стохастического моделирования постепенных случайных изменений ШВС, вызванных аэродинамическим старением ее элементов и описываемых нестационарными негауссовыми случайными процессами. Использование разработанного метода позволяет адекватно отражать аэродинамическое старение ШВС при имитации аэрологического риска на стадии планирования горных работ.

Ключевые слова: стохастическое моделирование, аэрологический фактор, аэродинамическое старение.

Аэрологическая безопасность горного производства обеспечивается надежным и эффективным функционированием шахтной вентиляционной системы (ШВС) [1]. ШВС функционирует в условиях воздействия многообразной совокупности природных, технологических и технических факторов, большинство из которых носят случайный характер. Результатом действия этих факторов является стохастическая динамика структуры и параметров ШВС, вследствие чего возникают ее отказы. Если это не учитывать на стадии планирования горных работ, то впоследствии следует ожидать частые нарушения вентиляции шахты вплоть до аварий по аэрологическому фактору. Поэтому особую актуальность приобретает разработка методов моделирования стохастической динамики ШВС.

Случайные изменения ШВС по характеру их проявления во времени можно разделить на два вида. Постепенные изменения происходят непрерывно во времени, например, аэродинамическое старение горных выработок или вентсооружений. Внезапные изменения имеют место только в некоторые дискретные моменты времени, например, вывалы горных выработок или разрушения вентсооружений.

В настоящей работе рассматривается задача стохастического моделирования постепенных случайных изменений ШВС, т.е. случайных процессов динамики аэродинамических сопротивлений $r(t)$ горных выработок или вентсооружений вследствие их старения.

Модель случайного процесса должна позволять формировать его дискретные реализации. Для формирования дискретных реализаций стационарных гауссовых (т.е. нормально распределенных) случайных процессов применяются специальные моделирующие алгоритмы, т.н. линейные дис-

кретные формирующие фильтры. Они основаны на линейном преобразовании стационарной последовательности $\{x(t_j)\}$ независимых нормальных случайных чисел (т.н. дискретного «белого гауссова шума») в последовательность $\{r(t_j)\}$, имеющую заданный коэффициент корреляции $K(\tau)$. Оператор линейного преобразования представляет собой рекуррентную зависимость, которая по заданному виду коэффициента корреляции $K(\tau)$, значениям $m(t_j)$ и $\sigma(t_j)$, а также значениям процесса в предыдущие моменты времени $r(t_{j-k})$ определяет «постаревшее» значение (одно из возможных) процесса в следующий момент времени $r(t_j)$.

Однако статистические данные о случайных процессах аэродинамического старения горных выработок [2] и вентсооружений [3] свидетельствуют о том, что они являются нестационарными негауссовыми случайными процессами. Случайные процессы аэродинамического старения горных выработок и вентсооружений являются нестационарными в широком смысле (т.е. относительно математического ожидания и корреляционной функции), а также логарифмически-нормально распределенными (возможные значения параметра положительны и асимметрично распределены). Ниже излагается метод статистического моделирования этих случайных процессов.

Пусть постепенное изменение во времени аэродинамического сопротивления элемента ШВС вследствие его старения представляет собой некоторый случайный процесс $r(t)$. Характеристиками случайного процесса являются его закон распределения, математическое ожидание $m(t)$, дисперсия $\sigma^2(t)$ и коэффициент корреляции $K(\tau)$. Пусть случайный процесс старения $r(t)$ имеет логарифмически-нормальный (логнормальный) закон распределения, т.е. величина $r^*(t) = \ln(r(t))$ распределена по нормальному закону с параметрами $a = a(t)$ и $\sigma_0 = \sigma_0(t)$. При этом математическое ожидание $m(t)$ и дисперсия $\sigma^2(t)$ случайного процесса $r(t)$ выражаются через параметры $a(t)$ и $\sigma_0^2(t)$ следующим образом:

$$m = \exp(a + \sigma_0^2 / 2); \quad \sigma^2 = \exp(2a + \sigma_0^2) \cdot (\exp(\sigma_0^2) - 1). \quad (1)$$

Для формирования дискретных реализаций логнормального случайного процесса $r(t)$ следует сначала смоделировать нормированный нормальный стационарный случайный процесс $r^*(t)$ (т.е. процесс с $a(t) = 0$, $\sigma_0(t) = 1$) с коэффициентом корреляции $K(\tau)$ исходного логнормального процесса $r(t)$.

Случайные процессы аэродинамического старения элементов ШВС $r(t)$ имеют экспоненциально-косинусный коэффициент корреляции вида:

$$K(\tau) = \exp(-A \cdot \tau) \cdot \cos(B \cdot \tau). \quad (2)$$

Для моделирования процесса с коэффициентом корреляции вида (2) наиболее удобным и адекватным оказывается применение следующего рекуррентного уравнения:

$$r^*(t_j) = b_1 \cdot r^*(t_{j-1}) + b_2 \cdot r^*(t_{j-2}) + a_0 \cdot x(t_j) + a_1 \cdot x(t_{j-1}), \quad (3)$$

где $x(t_j)$ — дискретный «белый гауссов шум»;

$$a_0 = ((\alpha_1 + (\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_0^2)^{0.5}) / 2)^{0.5}; a_1 = \alpha_0 / a_0; b_1 = 2 \cdot \rho \cdot \cos B; b_2 = -\rho^2;$$

$$\alpha_0 = \rho \cdot (\rho^2 - 1) \cdot \cos B; \alpha_1 = 1 - \rho^4; \rho = \exp(-A).$$

Затем получаем значение логнормального процесса $r'(t_j) = \exp(r^*(t_j))$. При этом, учитывая, что в (1) $a=0$, $\sigma_0=1$, имеем для процесса $r'(t)$:

$$m = e^{0.5}, \sigma = (e \cdot (e-1))^{0.5}. \quad (4)$$

Далее получаем значение нормированного логнормального процесса $r''(t)$ (т.е. $m''=0$, $\sigma''=1$)

$$r''(t_j) = (r'(t_j) - e^{0.5}) / (e \cdot (e-1))^{0.5}. \quad (5)$$

Окончательно определяем значение исходного логнормального процесса $r(t)$ с заданными $m(t)$ и $\sigma(t)$, т.е. самого процесса старения:

$$r(t_j) = r''(t_j) \cdot \sigma(t_j) + m(t_j), \quad (6)$$

или

$$r(t_j) = (\exp(r^*(t_j)) - e^{0.5}) \cdot \sigma(t_j) / (e \cdot (e-1))^{0.5} + m(t_j). \quad (7)$$

Таким образом, соотношения (3) и (7) представляют собой модель случайных процессов аэродинамического старения элементов ШВС.

Полученные результаты позволяют моделировать нестационарные негауссовы случайные процессы и учитывать описываемое ими аэродинамическое старение ШВС при имитации ее отказов на стадии планирования горных работ с целью обеспечения аэрологической безопасности горного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков В.К., Борисова А.А. Проблема аэрологического риска в горнодобывающей промышленности. — М.: МГУ, ГИАБ, Тематическое приложение «Безопасность», 2005 г. — С. 139-146.

2. Ушаков В.К., Скопинцева О.В. Аэродинамическое старение горных выработок и учет его влияния на надежность вентиляции. — «Интенсивная и безотходная технология разработки угольных и сланцевых месторо-

ждений». Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. — М., МГИ, 1989 г. — С. 116-117.

3. Ушаков В.К., Капышев В.Н. Обоснование критерия надежности шлюзовых устройств по факторам аэродинамического старения и внезапных разрушений. — «Региональная подготовка угольных месторождений к эффективной и безопасной разработке». — М., МГИ, 1991 г. — С. 84-86. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Ушаков Владимир Кимович — доктор технических наук, чл.-корр. РАЕН, Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru

