

**КОРРЕКЦИЯ РАЗМЕРОВ ОБЛАСТИ ПРАВИЛ НЕЧЕТКОГО КЛАССИФИКАТОРА
ПО ВЕЛИЧИНЕ ДИСПЕРСИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ**

Изложен метод повышения точности определения типа перерабатываемой руды на основе субтрактивной кластеризации ее признаков с коррекцией размеров области нечетких правил по результатам оценки дисперсии интенсивности высокочастотных объемных ультразвуковых колебаний, прошедших фиксированное расстояние в контролируемом объеме пульпы

Ключевые слова: субтрактивная кластеризация, нечеткие правила, ультразвук, дисперсия, пульпа

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Повышение точности метода нечеткой классификации признаков объекта исследований позволяет улучшить качество информационного обеспечения при формировании управления организационно-техническими системами и за счет этого снизить затраты на производство и повысить качество выпускаемой продукции.

Анализ исследований и публикаций. Функция `genfis2` в пакете Matlab 7 генерирует систему нечеткого логического вывода типа Сугэно из данных с использованием субтрактивной кластеризации [1,2]. При использовании данных только с одной выходной переменной, результат выполнения функции `genfis2` может рассматриваться как исходная система для обучения посредством технологии ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) [1]. Экстракция правил из данных в функции `genfis2` происходит в два этапа. Вначале используется функция `subclust` для определения количества правил и мощностей терм-множеств выходных переменных. Затем с помощью метода наименьших квадратов определяется "then" часть каждого правила. В результате этого получается система нечеткого логического вывода с базой правил, покрывающих всю моделируемую область.

Функция `genfis2` может иметь до пяти входных аргументов, первые три из которых обязательны:

$$\text{fis} = \text{genfis2}(\text{Xin}, \text{Xout}, \text{radii}, \text{xBounds}, \text{options}) \quad (1)$$

Одним из входных параметров функции является параметр `radii` - вектор, определяющий размеры области правил по каждой координате. Значения координат вектора `radii` должны находиться в диапазоне [0, 1] в связи с тем, что во время выполнения функции `subclust` данные масштабируются на единичный гиперкуб. Если значение `radii` задано скаляром, тогда все координаты считаются равнозначными [1,2]. Обычно малые значения радиусов приводят к нахождению множества мелких кластеров, и, следовательно, к очень детализированной базе нечетких правил. Большие значения радиусов приводят к нахождению всего нескольких крупных кластеров и тем самым обеспечивают компактную базу знаний. Однако при этом можно упустить некоторые особенности моделируемой зависимости.

Цель исследований. Целью выполненной работы является решение задачи повышения точности метода нечеткой классификации признаков объекта на основе алгоритма субтрактивной кластеризации путем оптимизации и оперативной коррекции вектора `radii`, определяющего размеры области правил по каждой координате.

Изложение материала и результаты. Рассмотрим процедуру настройки и коррекции размеров области правил субтрактивной кластеризации по величине дисперсии результатов наблюдений на примере измерений параметров импульса ультразвуковых колебаний, прошедшего через контролируемый объем пульпы.

Как известно, функция, описывающая гармоническую волну, распространяющуюся в бездисперсионной среде, записывается в виде [3]

$$u(x,t) = A \cos(kx - \omega t), \quad (2)$$

где $k=2\pi/\lambda$ - волновой вектор; $\omega=2\pi/T$ - круговая частота; T - период волны.

Анализ выражения (1) показывает, что можно ввести фазовую функцию косинусоидальной бегущей волны, распространяющейся в положительном направлении оси OX , как аргумент волновой функции $\cos\phi(\omega t - kx)$

$$\phi(x, t) = \omega t - kx. \quad (3)$$

Для слежения за каким-либо гребнем волны (максимум $\cos\phi(x, t)$) или за ее впадиной (минимум $\cos\phi(x, t)$), по мере увеличения времени необходимо переходить к все большим значениям x так, чтобы фаза $\phi(x, t)$ была постоянной. Условие постоянства фазы с математической точки зрения означает, что полный дифференциал функции $\phi(x, t)$, имеющий вид

$$d\phi = \left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)dt + \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)dx = \omega dt - kdx, \quad (4)$$

равен нулю. Приравнявая (4) нулю, находим условие постоянства фазы

$$\frac{dx}{dt} = v_f = \frac{\omega}{k}, \quad (5)$$

где v_f - фазовая скорость волны.

Выражение (5) устанавливает связь между фазовой скоростью волны, частотой волны и волновым вектором. Условия распространения волны определяются свойствами среды. При этом ω , а, следовательно, и фазовая скорость, зависят от волнового вектора k . Диспергирующая волна, представляющая собой суперпозицию бегущих волн с различными волновыми числами, меняет свою форму по мере распространения в пространстве, так как составляющие с различными длинами волн распространяются с различными скоростями.

Рассмотрим движение ультразвукового импульса в среде с дисперсией, под которым будем понимать некоторую синусоидальную волну, имеющую конечную протяженность в пространстве и во времени. Решение данной задачи основано на представлении волнового пакета в виде суперпозиции гармонических функций (метод Фурье) [3,4].

На рис. 1,2 приведены электрическая схема формирования ультразвукового сигнала и схема его ввода в измерительный сосуд с контролируемой пульпой [5].

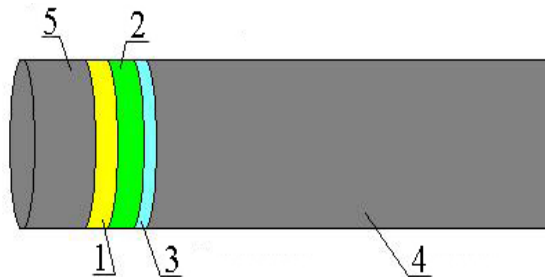
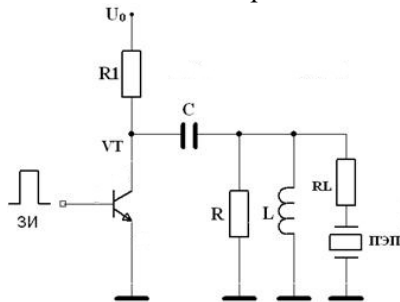


Рис. 1. Электрическая схема формирования ультразвукового сигнала: ПЭП - пьезоэлектрический преобразователь; ЗИ - запускающий импульс

Рис. 2. Схема ввода ультразвукового сигнала в измерительный сосуд: 1 - пьезопреобразователь; 2 - волновод; 3 - стенка измерительного сосуда; 4 - пульпа в измерительном сосуде; 5 - демпфер

На рис. 3 приведена осциллограмма ультразвукового сигнала, сформированного устройствами, схемы которых приведены на рис. 1,2. Цифровые обозначения структуры измерительного канала соответствуют рис. 2.

Обозначим интенсивность ультразвукового сигнала при прохождении им фиксированного расстояния z в пульпе через

$$I_z = I_0 \exp\left\{-\frac{1}{V} \sum_{i=1}^k \sigma(r_i) z\right\}, \quad (6)$$

где $\sigma(r_i)$ - сечение погашения ультразвука частицами радиуса r_i .

Дисперсия этой величины определится выражением

$$DI_z = M(I_z - \langle I_z \rangle)^2 = MI_z^2 - \langle I_z \rangle^2. \quad (7)$$

Для фиксированного числа частиц измельченного материала в контролируемом объеме V [4]

$$M(I_z^2) = I_o^2 \exp \left\{ -nV \left(1 - \int_0^\infty e^{-\frac{2}{V} \sigma(r)z} F(r) dr \right) \right\}. \quad (8)$$

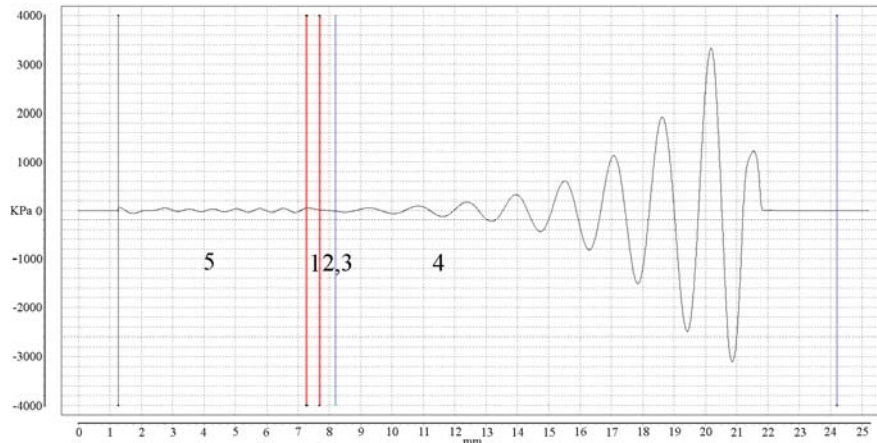


Рис. 3. Изменение амплитуды механического напряжения

Пусть

$$\psi = \exp \left\{ \frac{nz^2}{V} \int_0^\infty \sigma^2(r) F(r) dr \right\}. \quad (9)$$

Тогда

$$DI_z = I_o^2 \exp \left\{ 2nz \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right\} [\psi^2 - \psi]. \quad (10)$$

Будем определять относительную величину

$$\frac{\sqrt{DI_z}}{\langle I_z \rangle} = \frac{I_o \exp \left\{ -nz \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right\} \sqrt{\psi^2 - \psi}}{I_o \exp \left\{ -nz \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right\} \sqrt{\psi}} = \sqrt{\psi - 1}. \quad (11)$$

$$\ln \frac{I_o}{\langle I_z \rangle} = z \phi_s \frac{\int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr}{\int_0^\infty 4/3 \pi r^3 F(r) dr}. \quad (12)$$

Определим характеристическую функцию

$$S_D = \frac{\ln \psi}{\ln I_o / \langle I_z \rangle} = \frac{z \int_0^\infty \sigma^2(r) F(r) dr}{\int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr}. \quad (13)$$

Из последнего выражения видно, что величина S_D , определяемая дисперсией DI_z интенсивности ультразвукового сигнала, прошедшего фиксированное расстояние z в контролируемой среде, является функцией крупности частиц измельченной руды и не зависит от концентрации ее твердой фазы.

Пусть функция, описывающая бегущую волну в точке $x = 0$, имеет известную зависимость от времени $f(t)$

$$f(t) = u(0, t). \quad (14)$$

Будем полагать, что волновой пакет локализован во времени, т.е. огибающая пакета является функцией достаточно быстро стремящейся к нулю при $t \rightarrow \infty$. Сделанное предположение позволяет представить функцию $f(t)$ в виде интеграла Фурье [3]

$$f(t) = \int_0^\infty A(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (15)$$

где

$$A(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (16)$$

Каждая гармоника определяет собственную гармоническую бегущую волну с волновым числом k , значение которого определяется из дисперсионного соотношения

$$k = k(\omega). \quad (17)$$

Здесь каждая частотная составляющая бегущей волны распространяется с фазовой скоростью

$$v_f = \frac{\omega}{k(\omega)}. \quad (18)$$

Искомая функция $u(x,t)$, описывающая бегущую волну, является суперпозицией данных гармонических бегущих волн. Это означает, что найти $u(x,t)$ можно заменой ωt на $(\omega)(k)t - kx$ в каждой гармонической составляющей суперпозиции (16)

$$u(x,t) = \int_0^{\infty} A(\omega) e^{i(\omega t - k(\omega)x)} d\omega. \quad (19)$$

Следует отметить, что вычисление интегралов в (15), (16), (19) необходимо проводить на временных интервалах конечной длительности T , т.е. выполнять разложение функции в ряд Фурье, используя следующие выражения

$$f(t) = \sum_{n=0}^{N-1} A(n) e^{i(2\pi/T)nt}, \quad (20)$$

$$A(n) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-i(2\pi/T)nt} dt, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (21)$$

$$u(x,t) = \sum_{n=0}^N A(n) e^{i[(2\pi/T)nt - k((2\pi/T)n)x]}, \quad (22)$$

где N – число значений функции $f(x)$.

Для ускорения вычислений коэффициентов $A(n)$ можно использовать быстрое преобразование Фурье (БПФ).

Таким образом численное решение задачи о движении волнового пакета в среде с дисперсионным соотношением вида $(\omega)(k) = k + \alpha k^2$ находится в соответствие со следующим алгоритмом:

задать функцию $f(t)$, описывающей начальное возмущение при $t = 0$;

задать функцию $k = k(\omega)$ (при невозможности аналитического обращения дисперсионного соотношения $\omega = \omega(k)$, следует для каждого заданного значения частоты $\omega_s = 2\pi s/T, s = 1, \dots, N$ соответствующее значение волнового числа находить численно, как корень уравнения $\omega_s = \omega(k)$);

задать границы временного интервала, на котором ищется решение задачи.

задать число узлов временной сетки;

вычислить значения функции $f(t)$, в узлах временной сетки;

вычислить коэффициенты разложения функции $f(t)$ в ряд Фурье;

вычислить значения функции $u(x,t)$ в заданный момент времени в соответствие с (22).

На рис. 4 приведены мнимая и действительная части первоначального импульса, а на рис. 5 огибающие волнового пакета в различных точках x измерительного сосуда, которые были определены в соответствии с приведенным выше алгоритмом.

Анализ результатов, представленных на рис. 4,5 показывает, что волновой пакет локализован на отрезке [18,62]. Как следует из рис. 6, спектр первоначального ультразвукового импульса имеет максимальное значение при $\omega_m = 0.9$, ширина спектра $\Delta\omega \approx 1.0$. В процессе движения меняется форма волнового пакета: происходит уменьшение высоты огибающей пакета при одновременном увеличении его ширины (расползание волнового пакета в пространстве, вызванное дисперсионными свойствами среды - вариациями гранулометрической характеристики измельченной руды в пульпе).

Оценка дисперсионных свойств пульпы при распространении в ней высокочастотных объемных ультразвуковых колебаний использовалась для определения типа перерабатываемой руды на основе субтрактивной кластеризации ее признаков. С этой целью формировались обу-

чающая и тестовая выборки наблюдений, принималось минимальное значение параметра $radii$ (0.05) и формировался соответствующий массив радиусов. Нечеткая модель типа Сугэно синтезировалась с помощью функции *genfis2* на тренировочной выборке с радиусом кластеризации $radii$. При помощи функции *anfis* системы Matlab данная модель обучалась за одну эпоху и проверялась на тестовой выборке путем определения значение корня квадратного из средней квадратической невязки.

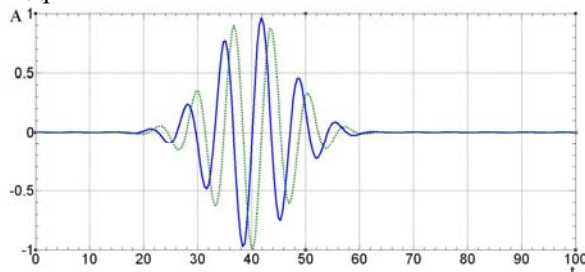


Рис. 4. Мнимая и действительная части первоначального ультразвукового импульса

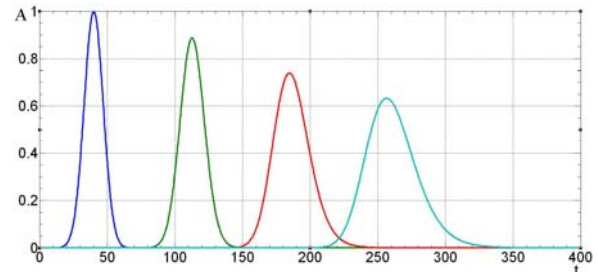


Рис. 5. Огибающие волнового пакета в различные моменты времени

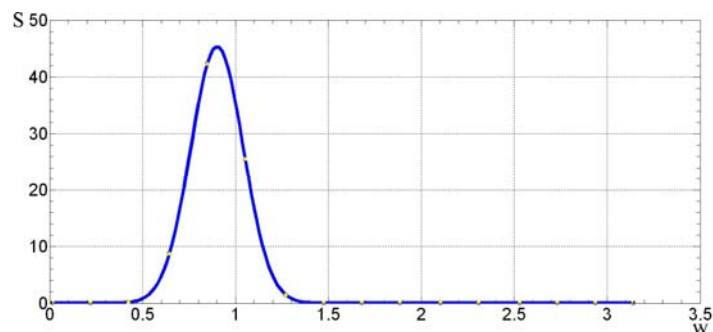


Рис. 6. Спектр первоначального ультразвукового импульса

Затем параметр $radii$ увеличивался на шаг 0.05 и цикл повторялся до значения $radii < 1$. По окончанию цикла выбирался радиус с наименьшим показателем ошибки [6].

Коррекция текущих значений $radii$ выполнялась в соответствии с выражением

$$k_{radii} = \gamma_0 + \gamma_1 S_D + \gamma_2 S_D^2 \quad (23)$$

Среднеквадратичные ошибки результатов определения типа перерабатываемой руды при помощи системы нечеткого вывода с использованием функций *genfis1*, *genfis2* и *genfis2* с оптимизацией радиуса кластеризации составили соответственно: 1.13; 0.94 и 0.77.

Выводы. Впервые предложен и успешно прошел практическую апробацию метод повышения точности определения типа перерабатываемой руды на основе субтрактивной кластеризации ее признаков с коррекцией размеров области нечетких правил по результатам оценки дисперсии интенсивности высокочастотных объемных ультразвуковых колебаний, прошедших фиксированное расстояние в контролируемом объеме пульпы.

Список литературы

1. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. – Режим доступа: http://www.library.vstu.edu.ru/elib/matlab_ru/fuzzylogic/book1.
2. Yager R., Filev D. Essentials of Fuzzy Modeling and Control. – USA: John Wiley & Sons, 1984. – 387 p.
3. Поршнева С.В. Фурье-анализ волновых пакетов, движущихся в среде с дисперсией, в пакете MATLAB. Режим доступа: http://www.exponenta.ru/educat/systemat/porshnev/wave_packet/main.asp.
4. Моркун В.С., Поганов В.Н., Моркун Н.В., Подгородецкий Н.С. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов в АСУ ТП обогатительного производства. - Кривой Рог: Изд. центр КТУ, 2007. - 283 с.
5. Программа моделирования прямого ультразвукового преобразователя, работающего совместно с генератором зондирующих импульсов. Режим доступа: http://fprbor.ru/uploadedFiles/files/ElectroMech_Example
6. Глебов А.А. Синтез нейро-нечеткой модели типа Сугэно. Поиск оптимального вектора радиуса субтрактивной кластеризации// А.А. Глебов// Электронный журнал Камской государственной инженерно-экономической академии

Рукопись поступила в редакцию 26.02.12

УДК 622.235.2: 544.454

О.Ю. ТЕТЕРЯ, аспирантка, ДВНЗ «Криворізький національний університет»

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНОВАГИ ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПИЛО-ГАЗОВІЙ ХМАРІ ПІСЛЯ ВИБУХУ ТА МОЖЛИВОСТІ ВПЛИВУ НА ЗМЕНШЕННЯ КІЛЬКОСТІ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН У ПРОДУКТАХ ВИБУХУ

Досліджено можливість впливу на склад продуктів вибуху при проходженні вторинних реакцій в пило газівій хмарі для швидкого досягнення стану рівноваги.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Широке використання промислових вибухових речовин (ВР) для підривання гірничої маси в гірничовидобувній промисловості обумовило проведення чисельних теоретичних та експериментальних досліджень сутності фізичних, фізико-хімічних та хімічних процесів, які відбуваються під час вибуху. Серед головних напрямків досліджень процесів вибуху - дослідження термодинаміки хімічних реакцій вибуху, процесів виникнення і розвитку детонації ВР, кінетики вторинних реакцій вибуху, які відбуваються в пилогазовій хмарі (ПГХ) у перші секунди після детонації ВР.

Головні проблеми, розв'язання яких вимагає виробництво, це збільшення коефіцієнту корисної дії ВР при руйнуванні гірських порід та зменшення шкідливих викидів в атмосферу. При розв'язанні першої задачі зусилля дослідників спрямовуються на пошуки композицій ВР, які мають відповідну теплоту вибуху та роботоздатність вибухової речовини, оптимізовані відносно їх використання при підриванні ґрунтів чи скельних порід. Зменшення забруднення оточуючого середовища шкідливими речовинами (пил, моно оксидкарбону, оксиди нітрогену та інші) регулюється розробкою композицій ВР з нульовим кисневим балансом, при якому хімічні реакції при максимальному тепловому ефекті повинні повністю перетворюватись в кінцеві продукти (CO_2 , H_2O , N_2 та ін.).

Аналіз досліджень та публікацій. Головними факторами впливу допоміжних матеріалів на склад ПГХ є порушення кисневого балансу ВР, що обумовлює необхідність вносити корективи в композицію ВР у відповідності зі ступенем участі допоміжних речовин у вторинних реакціях вибуху[1,2]. Важливо при цьому враховувати і властивості складових частин композиції ВР. В цьому плані слід відзначити, що за останні 10 років на кар'єрах Кривбасу майже повністю перейшли на використання без тротилових ВР. Тим не менше, не зважаючи на зниження у цей період викидів забруднюючих речовин на 61 тис. т, у тому числі SO_2 - на 48 %, NO_2 - на 17 %, H_2S - на 50 %, NH_3 - на 57 %, проблема забруднення повітря регіону залишається достатньо гострою, а вміст шкідливих газів на межі санітарної зони після вибуху значно перевищує ГДК.

Мета роботи - дослідити вплив на склад продуктів вибуху не тільки допоміжних матеріалів [1,2], але і можливість впливу на склад кінцевих продуктів вибуху при проходженні вторинних реакцій в ПГХ.

Викладення матеріалу та результати. Як особливу складність при використанні розрахункових методів для прогнозування концентрації шкідливих речовин в продуктах вибуху слід вважати неможливість прямих замірів температури, яка в точці Чепмена-Жуге для різних типів вибухових речовин може сягати 2700-4200 °К, та тиску, який в цій же точці може досягати величин від 0,1 до 10 ГПа. Тому для одержання таких характеристик використовують розрахункові методи.

За відповідними рівняннями хімічних реакцій розраховують теплоту вибуху використовуючи приведені у відповідних довідниках [3] дані про ентропію, ентальпію, вільну енергію Гіббса та дані хімічних аналізів про кінцевий склад продуктів вибуху.

Найбільш важливими рівноважними процесами після завершення детонації, які впливають на склад продуктів вибуху слід вважати наступні хімічні реакції:

a - реакція утворення водяного газу

