

АРАКЕЛЯН Г.А.,  
СЕРГІСНКО А.М.

## ВИЗНАЧЕННЯ ЗОЛЬНОСТІ ВУГІЛЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛЬОВАНОГО ВІДПАЛЮВАННЯ

В статті описан способ определения зольности угля на основе косвенных измерений. Благодаря тому, что поиск интерполяционной функции от спектра измеренного сигнала выполняется методом моделируемого отжига, получена точность измерений до 7%.

A method for the coal quality estimation is described which is based on indirect measurements. The estimation consists in the Fourier spectrum analysis of the acoustic transducer signal using unlinear interpolation formula. The formula coefficients are searched by the simulated annealing method. The resulting formula provides the 7% precision of the coal ashes measurement.

### Вступ

У складних технічних системах багато параметрів доводиться визначати непрямими методами. При цьому часто неможливо визначити аналітичні залежності, які пов'язують параметри системи з їх зовнішніми проявами чи навіть побудувати приблизну математичну модель системи. У цьому випадку можуть мати успіх такі методи, як методи нейронної мережі та модельованого відпалювання. Але для успішного використання цих методів необхідно використовувати доволі довгі навчальні послідовності [1,2].

У цій статті описано досвід використання методу модельованого відпалювання для визначення зольності паливного вугілля за непрямими вимірами. Таке визначення необхідне, наприклад, для відбракування вагонів з неякісним вугіллем, що приходять на теплові електростанції. При цьому вміст золи у вугіллі, що визначається прямим стандартним методом, стає відомим лише через добу, коли неякісне вугілля вже поступило на склад електростанції. Оскільки кількість вимірів при цьому не перевищує кількості вагонів, то навчальна послідовність для непрямих методів, які передбачаються для використання, є суттєво обмеженою.

### 1. Спосіб визначення вмісту золи у вугіллі

Розроблений на факультеті інформатики та обчислювальної техніки НТУУ "КПІ" спосіб визначення вмісту золи у вугіллі призначений для визначення якості вугілля, що перевозиться у вагонах залізничного транспорту. Згідно зі способом, у вугілля, яке знаходиться у вагоні, занурюють акустичний датчик, а у об'ємі вагона збуджуються акустичні коливання. Сигнал з датчика записується та аналізується за допомогою ПЕОМ.

Дослідним шляхом встановлено, що існує стійкий зв'язок між спектральним складом сигналу з датчика та якістю вугілля, а саме – з процентним складом золи у ньому. Цей зв'язок визначається за допомогою функції:

$$x_i = \xi(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_N, S_1, S_2, \dots, S_N) + \Delta_i, \quad (1)$$

де  $x_i$  – фактичний вміст золи у вугіллі;  $\xi$  – інтерполяційна функція;  $S_1, S_2, \dots, S_N$  – значення амплітуди спектру сигналу в  $N$  частотних смугах;  $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_N$  – коефіцієнти функції  $\xi$ ,  $N \geq N$ ;  $\Delta_i$  – похибка вимірювання.

Даний спосіб вимірювання відноситься до непрямих способів [3]. Пошук інтерполяційної функції  $\xi$  є одним із найважливіших етапів розробки і впровадження способу. Складність цього пошуку полягає з одного боку, в трудомістському накопиченні вимірювальних даних  $S_1, S_2, \dots, S_N$ , з іншого боку, у визначенні якнайбільш підходящої функції  $\xi$ , яка б давала мінімізоване значення величини  $\Delta_i$ . Причому, ця функція не є сталою, тому що весь час нові виміри складу вугілля можуть сприяти до більш кращої її інтерполяції.

Аналіз вимірних даних і визначення вмісту золи у вугіллі за допомогою ПЕОМ виконує розроблена програма Spectr. Ця програма виконує ввід даних, обчислення швидкого перетворення Фур'є, відображення спектру сигналу, виділення смуг  $S_1, S_2, \dots, S_N$ , обчислення функції (1) та відображення результату. На рис. 1. показано вікно цієї програми з відображеним спектром.

На етапі навчання вимірюють параметри  $S_1, S_2, \dots, S_N$  для проб вугілля, процентний склад яких відомий завдяки стандартним вимірюванням. На основі серії вимірювань обчислюють функцію  $\xi$ , яку потім вбудовують в програму Spectr.

На етапі перевірки вимірюють процентний склад золи у вугіллі в пробах з наперед невідомим складом і порівнюють результати з ре-

зультатами стандартних вимірювань. За результатами перевірки обчислюють середню похибку вимірювання  $\Delta$  і приймають рішення про прийняття обчисленої функції  $\xi$ .

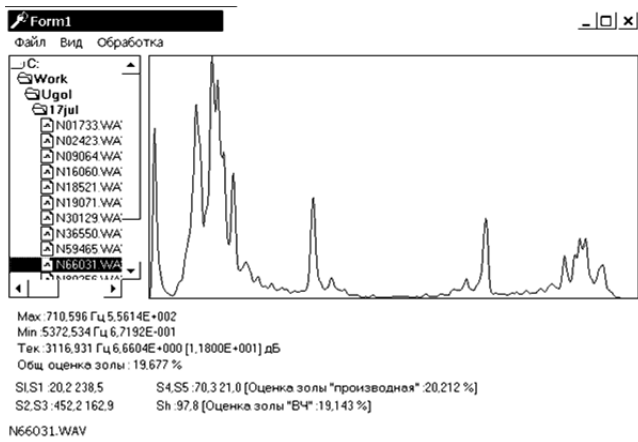


Рис.1. Вікно програми Spectr

## 2. Пошук інтерполяційної функції

З урахуванням похибок вимірювань зв'язок між результатами вимірювань і невідомими у (1) описується наступною фундаментальною системою рівнянь:

$$\begin{cases} \xi(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N'}, S_{1,1}, S_{2,1}, \dots, S_{N,1}) + \Delta_1 = x_1, \\ \xi(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N'}, S_{1,2}, S_{2,2}, \dots, S_{N,2}) + \Delta_2 = x_2, \\ \xi(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N'}, S_{1,n}, S_{2,n}, \dots, S_{N,n}) + \Delta_n = x_n, \end{cases} \quad (2)$$

де  $n > N$  – число вимірювань на етапі навчання системи.

При цьому за функцію  $\xi$  використовують наперед задану функцію, вид якої є підходящим як для опису фізичного явища, так і за складністю обчислень, наприклад, лінійну чи степеневу функцію. Неспівпадання істинної та прийнятої функціональної залежності  $\xi$  є джерелом похибок, які не залежать від якості вимірювальної апаратури і які вважають похибками моделі [3].

Під час пошуку функції (1) за мінімумом даних у системі рівнянь (2) залишають  $N'$  рівнянь, яких досить для однозначного визначення невідомих параметрів. Спочатку знаходять деяке початкове вирішення  $\Theta^0_1, \Theta^0_2, \dots, \Theta^0_{N'}$ . Тоді припускають, що між малими змінами параметрів  $\delta\Theta_i = \Theta_i - \Theta^0_i$  та невеликими змінами функції  $\delta\xi = \xi - \xi(\Theta^0_1, \dots, \Theta^0_{N'})$  є взаємозв'язок:

$$\delta\xi = \delta\Theta_1 \partial \xi / \partial \Theta_1 + \delta\Theta_2 \partial \xi / \partial \Theta_2 + \dots + \delta\Theta_{N'} \partial \xi / \partial \Theta_{N'}.$$

Шукають поправки  $\delta\Theta_1, \delta\Theta_2, \dots, \delta\Theta_{N'}$  до початкового наближення, припускаючи, що існує лінійний зв'язок між приростами вимірних величин  $\delta x = x - \xi(\Theta^0_1, \Theta^0_2, \dots, \Theta^0_{N'})$  і поправками  $\delta\Theta_i$ .

Слід відзначити, що обробка вимірів за мінімумом даних пов'язана зі специфічними фізичними особливостями задачі, які в даному випадку є невідомими. З іншого боку, обробка надлишкових вимірів при наявності вдалого початкового приближення  $\Theta^0_1, \Theta^0_2, \dots, \Theta^0_{N'}$  є універсальною і мало залежить від фізичної суті задачі [3].

Знайдена апроксимація функції  $\xi$  за мінімумом даних для оцінки якості вугілля дає похибку  $\Delta > 20\%$ . Отже, обробка вимірів за цим методом є непринятною. Позитивним результатом цього методу є лише те, що знайдені початкові наближення  $\Theta^0_1, \Theta^0_2, \dots, \Theta^0_{N'}$ , використовуються у подальшій оптимізації.

Оцінками, що одержані за методом найменших квадратів, називаються такі набори,  $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N'}$ , що призводять до мінімуму зважену суму:

$$\begin{aligned} \Phi(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N'}) &= \\ &= \sum_{i=1}^n p_i (x_i - \xi(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N'}, S_{1,i}, S_{2,i}, \dots, S_{N,i}))^2, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $p_i$  – коефіцієнт важливості  $i$ -го виміру. Цей коефіцієнт приймає максимальне значення для найбільш достовірних вимірів.

Недоліком методу найменших квадратів є те, що він чутливий до непопадань, тобто вимірів  $S_{1,i}, S_{2,i}, \dots, S_{N,i}$  або  $x_i$ , що дають надмірно велике значення похибки  $\Delta$ . А таке явище є доволі ймовірним при вимірюванні складу вугілля.

У випадку пошуку інтерполяційної функції вмісту золи в вугіллі вигляд функції  $\xi$  є наперед невідомим.  $\Phi$ , ймовірно, є нелінійною функцією, яка має декілька екстремумів. Це пов'язане з тим, що проби вугілля з однаковим вмістом золи можуть мати різний спектр  $S_{1,i}, S_{2,i}, \dots, S_{N,i}$ . Крім того, в процесі оптимізації функції вона може змінювати вигляд, що тягне за собою зміну системи вирішуваних рівнянь. Тому метод найменших квадратів для даної задачі є неприйнятним.

Існуючі методи випадкового пошуку розроблені для знаходження глобального екстремума функції  $\Phi$ . Більшість з них умовно розділяють на два класи: клас "незалежних" методів та клас "блукаючих" методів пошуку [4]. До першого класу відносяться методи в яких спроби встановлення величини вектору  $(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N'})$  виконуються у відповідності з деякою щільністю розподілення ймовірності його складових та

припущення, що вони не пов'язані між собою. Насправді, між вимірними частотними значеннями  $\Theta_i$  є велика кореляція, що призводить до відмови від "незалежних" методів.

Другий клас складається з методів, що імітують блукання у просторі параметрів  $(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N'})$  з метою пошуку екстремуму  $\Phi$ . Більшість з цих методів використовують похідні  $\partial\Phi/\partial\Theta_i$  функції якості для прискорення пошуку. При цьому імітується процес дифузії молекули, координати якої дорівнюють  $(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N'})$ . Оскільки пошук цих похідних представляє додаткову складну роботу, то такі методи для даного випадку є неприйнятними.

В роботі [1] було запропоновано комбінований метод, що вбирає в себе якості вищезазначених класів методів. Згідно з ним, моделюється процес броунівського руху молекули з координатами  $(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N'})$  у фізичному тілі, що було нагріте до температури початку відпалювання і з часом остигає. Тому він був названий методом модельованого відпалювання (simulated annealing). Дія цього метода не залежить від фізичної природи об'єкта, що оптимізується, дає ефективні рішення і тому він використовується у даній роботі.

В роботі [1] показано, як моделювання остигання речовини перекласти на задачі оптимізації технічних об'єктів. При цьому прийняті наступні аналогії: стан речовини – вектор рішення  $S = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N'})$ ; енергія – функція оптимальності  $\Phi$ ; зміна стану – перехід до наступного рішення  $S_n$ ; температура – окремий параметр, що змінюється в процесі оптимізації; кінцева температура  $t_{min}$  – точка останову оптимізації.

Узагальнений алгоритм модельованого відпалювання виглядає наступним чином:

Вибрати початкові рішення  $S_n$ , температуру  $t$  і коефіцієнт остигання  $a$ ;

```

repeat
за випадковим законом вибрати рішення
   $S$ , яке є сусіднім до  $S_n$ ;
знайти приріст енергії  $\Delta\Phi = \Phi(S) - \Phi(S_n)$ ;
if  $\Delta\Phi < 0$  then
   $S_n = S$ ;
else
генерація випадкового числа  $p$ 
if  $p < \exp(\Delta\Phi/t)$  then
   $S_n = S$ ;
end if;
end if;
 $t = t * a$ ;
until  $t < t_{min}$ ;
    
```

Цей алгоритм був реалізований в програмі UGOL\_KRIT, що знаходить оптимізоване значення  $S = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N'})$ .

Програма пошуку коефіцієнтів інтерполяційної функції UGOL\_KRIT написана мовою VHDL, яка є зручною для експериментального моделювання методу відпалювання. В програмі функція  $\xi$  обчислюється за формулою:

$$\xi = 1 - \exp\left(-\frac{\Theta_{N'-1}}{\left|\sum_{i=1}^N \Theta_i S_i \div \sqrt{\sum_{i=1}^N S_i^2} + \Theta_{N'}\right|}\right),$$

$$N' = N + 2.$$

### 3. Методика пошуку коефіцієнтів інтерполяційної функції

Була розроблена наступна методика пошуку коефіцієнтів інтерполяційної функції. За допомогою вимірювального стенда, що реалізує спосіб визначення складу золи у вугіллі, виконують серію вимірювань характеристик вугілля. При цьому беруть проби вугілля, процентний склад яких відомий завдяки еталонним вимірюванням. Можливе також визначення складу вугілля за документами поставника вугілля, або навіть за суб'єктивними оцінками експертів. Виміряні дані з датчика реєструють в ПЕОМ. Одночасно реєструють процентний склад вугілля і ступінь ймовірності (коефіцієнт важливості) виміру.

За допомогою програми SPECTR виконують спектральний аналіз вимірних даних. Таблицю параметрів  $S_1, S_2, \dots, S_N$  з процентним складом вугілля і коефіцієнтом важливості заносять у програму пошуку коефіцієнтів інтерполяційної функції UGOL\_KRIT. При цьому коефіцієнт важливості виміру задають за Табл.1.

**Таблиця 1 Коефіцієнт важливості**

Джерело інформації про склад вугілля	$p$
стандартне вимірювання для одного вагона	8
стандартне вимірювання для партії вагонів	3
склад за сертифікатом вугілля, уточнений експертом	2
склад за сертифікатом вугілля експертна оцінка	1,5
склад за сертифікатом, але дані неправдоподібні	0,1

Ця програма знаходить оптимізоване значення коефіцієнтів  $S = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{N'})$  для інтер-

поляційної функції (1). При цьому спочатку за допомогою програми знаходять початкове наближення коефіцієнтів  $\Theta^0_1, \Theta^0_2, \dots, \Theta^0_N$  методом інтерполяції за мінімумом даних. Потім ці коефіцієнти заносять в ту саму програму і знаходять остаточне вирішення задачі інтерполяції.

На етапі перевірки вимірюють процентний склад золи у вугіллі в пробах з наперед невідомим складом і порівнюють результати з результатами стандартних вимірювань. За результатами перевірки обчислюють середню похибку вимірювання  $\Delta$  і приймають рішення про прийняття обчислених функцій  $\xi_1$  і  $\xi_2$ .

З появою нових серій достовірних вимірів складу вугілля цими вимірами доповнюють таблицю в програмі пошуку коефіцієнтів і розраховують коефіцієнти для більш точної інтерполяційної функції  $\xi$  і знову виконують етап перевірки.

#### 4. Експериментальні результати

Експериментальна установка, що вимірює вміст золи у вугіллі, була випробувана у червні 2003 р. на Трипільській ДРЕС. Було зібрано більше 40 вимірів, що складаються з  $S_1, S_2, \dots, S_N$ ,  $x$ , і  $p$ . Виміри були вставлені в програму UGOL\_KRIT. У результаті першого запуску програми було одержане початкове наближення

$$S = (-19.0, 2.0, 6.0, 3.0, 8.0, -24.0, 10.0).$$

Після інших запусків експериментальним шляхом були вибрані такі початкова температура та коефіцієнт застигання, щоб процес зменшення енергії дійшов до мінімального значення. Одержані залежності температури і енергії від номера ітерації алгоритму показані на Рис 2.

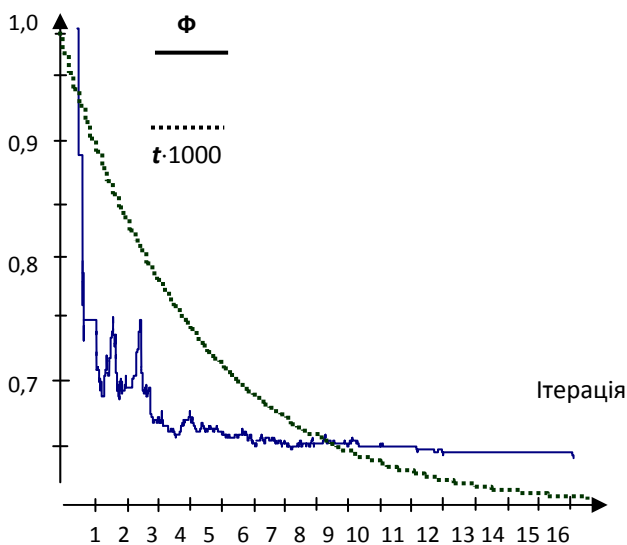


Рис. 2. Залежності температури і енергії від номера ітерації алгоритму

Після закінчення остигання було одержано наступний результат:

$$S = (-20.47, 11.22, 7.13, 16.59, 2.71, -27.30, 45.08).$$

Набір коефіцієнтів був вбудований у програму SPECTR, після чого були виконані контрольні виміри. Ці виміри показали середню абсолютну похибку, яка дорівнює 7% і яка задовольняє вимоги користувача.

#### Висновки

Розроблений спосіб визначення вмісту золи у вугіллі відноситься до непрямих способів вимірювання, для якого пошук інтерполяційної функції  $\xi$  є одним із найважливіших етапів розробки і впровадження способу.

Встановлено, що при пошуку інтерполяційної функції вмісту золи у вугіллі слід використовувати методи випадкового пошуку, а саме – метод модельованого відпалювання.

Розроблена методика і програма пошуку коефіцієнтів інтерполяційної функції  $\xi$  на основі метода модельованого відпалювання, які необхідні для перевірки і впровадження способу визначення вмісту золи у вугіллі.

Експериментальною перевіркою було підтверджено дієвість і ефективність розроблених методики і програми пошуку коефіцієнтів інтерполяційної функції навіть для коротких навчальних виборок. Завдяки цьому, була одержана точність виміру складу золи у вугіллі 7%. Ця точність може бути підвищена при подальшому використанні методики після збору додаткових вимірів з достовірними значеннями.

#### Перелік посилань

1. Kirkpatrick S., Gellatt C.D., Vecchi Jr.M.P. Optimization by Simulated Annealing. –Science. –V.220. –1983. –N5. –p.671-680.
2. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. – М.: Вильямс, 2006. – 1104с.
3. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. –М.: Сов.Радио, –1976. – 192с.
4. Растрингин Л.А. Статистические методы поиска. –М.: Наука. –1968. – 376с.