

М.О. Алексєєв<sup>1</sup>, О.М. Алексєєв<sup>1</sup>, В.В. Кремньов<sup>1</sup>, П. Шчешневській<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

<sup>2</sup>Технічний університет «Краківська гірничо-металургійна академія ім. Станіслава Сташиця» (AGH), м. Краків, Польща

## КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЕРЕБУДОВАНИХ МАТРИЧНИХ СПЕКТРАЛЬНИХ ОПЕРАТОРІВ

**Анотація.** В роботі пропонується метод контролю параметрів об'єкту керування на основі застосування субоптимальних по Карунену-Лоеву перебудованих спектральних операторів, пристосованих до еталонів класів сигналів, які супроводжують функціонування об'єктів керування. Досліджено можливість визначення параметрів ядер матриць спектрального оператора через мінімізацію середньоквадратичної помилки при представленні вихідного вектора його оцінкою.

**Ключові слова:** об'єкт керування, контроль параметрів, перебудовані оператори.

**Вступ.** Для формування інформативних ознак сигналів при контролі параметрів об'єктів управління використовуються методи, засновані на застосуванні перетворень, які при відповідному виборі базисної системи забезпечують адекватність аналізованої інформації при високому ступені декореляції інформативних компонентів [1]. У [2] викладено підхід до формування матричних спектральних операторів, заснований на їх поданні через узагальнене спектральне ядро, що дозволяє отримати безліч базисних систем функцій з алгоритмами швидких перетворень. В основі матрично-ядерного представлення спектрального оператора лежить можливість синтезу базису з елементарних мікроструктур-ядер, узагальнена форма яких має вигляд:

$$V_{rl} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \cos \varphi_{rl} & e^{j\Theta_{rl}} \sin \varphi_{rl} \\ \sin \varphi_{rl} & -e^{j\Theta_{rl}} \cos \varphi_{rl} \end{bmatrix},$$

де  $\varphi \in [0, 2\pi]$ ;  $\Theta_{rl} \in [0, 2\pi]$ ;  $r = \overline{1, n}$ ;  $l = \overline{1, 2^{n-1}}$

Кути параметри є ступенями свободи ядра і визначають конкретні елементи спектрального оператора.

Концепція ядерного представлення спектральних операторів як спрощує процедуру їх синтезу, а й дозволяє проводити обґрунтований за комплексом критеріїв вибір базису. Однак на жаль ці базиси не є в загальному випадку оптимальними за Каруненом-Лоевом.

**Постановка задачі.** Для досягнення поставленої мети в роботі пропонується метод контролю параметрів об'єктів управління, на основі використання ортогональних систем базисних функцій субоптимальних по Карунену-Лоеву з алгоритмами швидкого перетворення, що враховують

особливості аналізованих сигналів, мають можливість параметричної перебудови.

**Основний зміст роботи.** Спектральний оператор, що перебудовується [1], пристосований до еталона класу  $m$   $\mathbf{X}_{\text{г}}$  в тому сенсі, що у спектральній області базису, що перебудовується, еталону зіставляється всього один коефіцієнт, відмінний від нуля. Базис, що перебудовується, є оптимальним для еталона в сенсі критерію ентропії спектральних ознак. За процедурою побудови базису, що перебудовується  $\mathbf{X}_{\text{г}}$  є перший рядок матриці спектрального оператора. Позначимо матрицю спектрального оператора, що перебудовується, для класу  $m$  як  $\mathbf{V}^m = [\mathbf{V}_1^m, \mathbf{V}_2^m, \dots, \mathbf{V}_N^m]^T$ . Для рядків  $\mathbf{V}_i^m$  матриці  $\mathbf{V}^m$  виконуються умови ортонормування.

Для формування вектора інформативних ознак за вихідними даними, представленими у вигляді вектора  $\mathbf{X}^m$  пропонується визначити дискретні спектри  $\{\mathbf{Y}^m\}$ ,  $m = \overline{1, M}$ :

$$\mathbf{Y}^m = \frac{1}{N} \mathbf{V}^m \mathbf{X}.$$

Вектор  $\mathbf{Y}^m$  в (1) являє собою вектор спектральних коефіцієнтів по системі ортогональних функцій  $\mathbf{V}^m$ , що перебудовується для класу  $m$ . У запропонованому методі класифікації вектора інформативних ознак паралельно формуються  $m$  систем інформативних ознак по  $N$  ознак в кожній системі.

Для кожного вектора  $\mathbf{X}^m$ , що належить класу  $m$  векторів вихідних даних, отримаємо  $\mathbf{Y}^m = \mathbf{V}^m \mathbf{X}^m$ , де  $\mathbf{X}^m T = [x_1^m, x_2^m, \dots, x_N^m]$ ;  $\mathbf{Y}^m T = [y_1^m, y_2^m, \dots, y_N^m]$ . Вираз для обчислення  $\mathbf{X}^m$  можна подати у такому вигляді

$$\mathbf{X}^m = y_1^m \mathbf{V}_1^m + y_2^m \mathbf{V}_2^m + \dots + \mathbf{V}_N^m y_N^m = \sum_{i=1}^N y_i^m \mathbf{V}_i^m.$$

Для отримання мінімальної кількості інформативних ознак необхідно, щоб вони адекватно представляли вектор вихідних даних  $\mathbf{X}^m$ . Для оцінки оптимальності перетворення використовуємо середньоквадратичний критерій. Отримаємо оцінку  $\tilde{\mathbf{X}}^m$  вектора  $\mathbf{X}^m$ , представивши його  $M$  членами. Решта  $N-M$  координат  $y_i^m$  замінимо константами  $c_i^m$ . Тоді

$$\tilde{\mathbf{X}}^m = \sum_{i=1}^M y_i^m \mathbf{V}_i^m + \sum_{i=1}^N c_i^m \mathbf{V}_i^m.$$

Помилка у представленні вектора  $\mathbf{X}^m$  його оцінкою  $\tilde{\mathbf{X}}^m$  може бути представлена у вигляді вектора помилки:

$$\Delta \mathbf{X}^m = \mathbf{X}^m - \sum_{i=1}^M y_i^m \mathbf{V}_i^m - \sum_{i=1}^N c_i^m \mathbf{V}_i^m .$$

Після ряду перетворень середньоквадратична помилка при представленні вектора  $\mathbf{X}^m$  вектором  $\tilde{\mathbf{X}}^m$  визначиться так:

$$\sigma^m = \sum_{i=M+1}^N \mathbf{V}_i^{mT} \mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{X}}}^m \mathbf{V}_i^m ,$$

де  $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{X}}}^m$  – коваріаційна матриця  $\tilde{\mathbf{X}}^m$ .

Елементи векторів  $\mathbf{V}_i^m$  визначають параметри ядер спектрального оператора  $\mathbf{V}^m$ . Оскільки в деякій частині ядер параметри не залежать від вихідного еталона, можна провести подальшу оптимізацію базису під вимогу конкретної задачі.

**Наукова новизна** розробки складається в удосконаленні метод контролю параметрів технологічних об'єктів керування, що базується на використанні перебудованих матричних спектральних операторів, кожен з яких синтезований за еталоном технологічної ситуації.

**Висновок.** Запропонований підхід з використанням перебудовуваних субоптимальних по Карунену-Лоеву базисів дозволяє вибрати побудувати базиси, що враховують як глобальні властивості аналізованого сигналу на всьому інтервалі визначення, так і вейвлетоподібні базиси, які враховують локальні зміни сигналу подібно до вейвлетів Хаара. Це дозволяє в рамках єдиного підходу поєднати переваги спектрального аналізу та вейвлет-аналізу сигналів під час оперативного контролю параметрів об'єктів керування.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems / [під ред. Genadiy Pivnyak, Oleksandr Beshta, Mykhaylo Alekseyev]. - Leiden: CRC Press/Balkema, 2015. - 220 с.
2. Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems: International Forum on Energy Efficiency / [під ред. Genadiy Pivnyak, Oleksandr Beshta, Mykhaylo Alekseyev]. - Leiden : CRC Press/Balkema, 2013. - 244 с.