

А. С. Довбиш, д-р техн. наук, професор; М. В. Бібик, аспірант; А. С. Рудий, студент (Сумський державний університет, м. Суми, Україна)

Оптимізація параметрів навчання системи керування енергоблоком теплоелектроцентралі

Розглядається задача інформаційного аналізу і синтезу інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для керування енергоблоком ТЕЦ, який складається з парового котла, парової турбіни та генератора. Оптимізація параметрів функціонування системи здійснюється в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології аналізу даних, яка ґрунтується на максимізації інформаційної спроможності системи підтримки прийняття рішень в процесі її навчання.

Ключові слова: система підтримки прийняття рішень, оптимізація, навчання, інформаційний критерій, енергоблок, ознака розпізнавання.

Рассматривается задача информационного анализа и синтеза интеллектуальной системы поддержки принятия решений для управления энергоблоком ТЭЦ, которая состоит из парового котла, паровой турбины и генератора. Оптимизация параметров функционирования системы осуществляется в рамках информационно-экстремальной интеллектуальной технологии анализа данных, основанная на максимизации информационной способности системы поддержки принятия решений в процессе его обучения.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, оптимизация, обучение, информационный критерий, энергоблок, признак распознавания.

In this paper is considered a problem of informational analysis and synthesis of intellectual decision support system for thermoelectric plant (THP) power block which consists of the boiler, steam turbine and generator. An optimization of the system functioning parameters occurs within an informational and extreme intellectual data analysis technology based on the maximization of decision support system's informational ability during its studying.

Construction of the solution laws during the machine studying required for the evaluation of the technological process functional state is made by the basis recovery in radial space of the hyper-spherical containers recognition class features. While the optimal containers recognition classes parameters are determined by the global informational criteria maxima iteration procedure searching permissible of the area to determine its function. As the studying parameters optimization criteria it was used the Kulback's modified informational measure which is a functional accuracy characteristics of two alternative solutions.

Keywords: decision support system, optimization, training, information criterion, unit sign of recognition.

Вступ

Одним з потужних резервів енергозбереження є модернізація існуючих в Україні ТЕЦ – теплових електростанцій, що виробляють електричну енергію і теплоту, яка відпускається споживачам у вигляді пари і гарячої води. Основним шляхом підвищення функціональної ефективності керування енергогенеруючим блоком ТЕЦ є надання інформаційно-керуючій системі (ІКС) властивості адаптивності на основі машинного навчання та розпізнавання образів.

Відомі методи розпізнавання образів носять в основному модельний характер, оскільки орієнтовані на апріорно чітке розбиття класів розпізнавання і не враховують довільні початкові умови формування образів [1–3]. Тому вони не знайшли широкого застосування при розв'язанні практичних задач керування розподіленими технологічними процесами, де, крім того, апріорно розбиття простору ознак на класи розпізнавання є нечітким через перетин класів.

Перспективним шляхом вирішення проблеми підвищення функціональної ефективності інформаційно-керуючої системи є застосування ідей і методів інформаційно-екстремальної технології (ІЕІ-технології) [4, 5], що ґрунтується на максимізації інформаційної

спроможності здатної навчатися системи підтримки прийняття рішень (СППР), яка є обов'язковою складовою ІКС.

Метою статті є розробка інформаційно-екстремального алгоритму машинного навчання інформаційно-керуючої системи (ІКС) ТЕЦ, що дозволить надати системі властивість адаптивності за умов апріорної невизначеності.

1. Об'єкт керування

Основним обладнанням паротурбінних ТЕЦ є турбоагрегати, що перетворюють енергію робочого тіла (пари) в електричну енергію, і котлоагрегати, що виробляють пар для турбін. На рис. 1 показано схему енергогенеруючого блоку ТЕЦ.

Газ та окислювач, яким слугує повітря, безперервно поступають в топку парового котла 1. За рахунок тепла, що утворюється в результаті згорання палива вода в паровому котлі нагрівається, випаровується і утворена насичена пара поступає по паропроводу в парову турбіну 2, призначення якої – перетворювати теплову енергію пару в механічну енергію. В електричному генераторі 3 механічна енергія перетворюється в електричну енергію. З турбіни пар поступає до мережевого підігрівача 5 і нагріває воду, яка надходить до споживача 6. Вода в системі циркулює

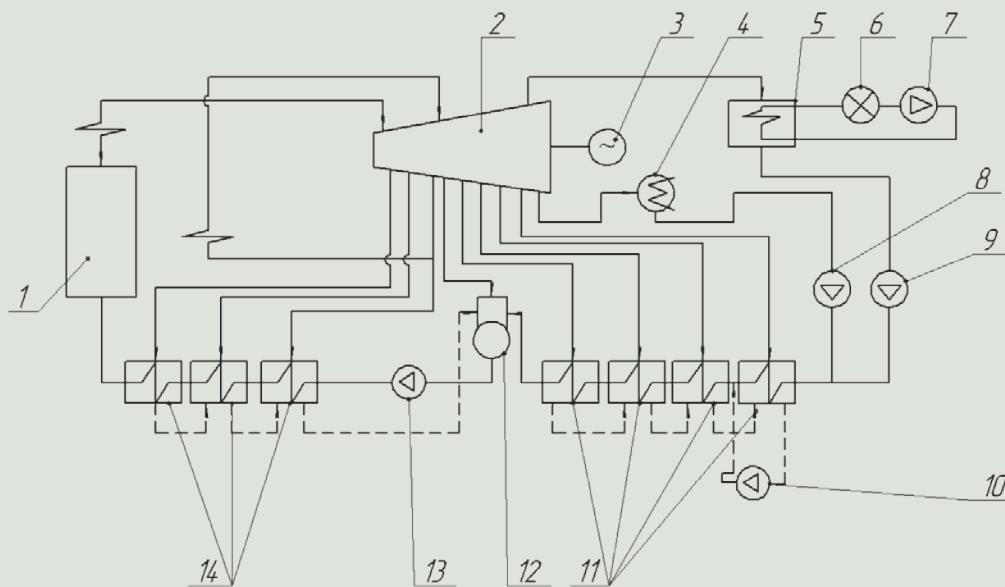


Рис. 1. Схема енергогенеруючого блоку ТЕЦ

за допомогою насоса 7, а конденсат відводиться по лінії через насос 9. Після парової турбіни водяна пара, що має низький тиск і температуру, поступає в конденсатор 4, в якому пара за допомогою охолоджуючої води, що прокачується по трубах всередині конденсатора, перетворюється у воду. Охолоджена вода подається конденсаторним насосом 8 через підігрівачі низького тиску 11 в деаератор 12. Деаератор служить для видалення з води розчинених в ній газів, одночасно в ньому, як і в підігрівачах низького тиску, живляча вода підігрівается паром, що відбирається для цього з турбіни. Деаерація проводиться для того, щоб довести до допустимих значень вміст кисню та вуглекислого газу в воді, тим самим знизити швидкість корозії в трактах води та пару. Деаерована вода живлячим насосом 13 через підігрівачі 14 подається в котельну установку. Конденсат пари, що утворюється в підігрівачах 14 перепускається каскадно в деаератор, а конденсат пари підігрівачів 11 подається дренажним насосом 10 в лінію, по якій протікає конденсат із конденсатора 4.

Таким чином, можна констатувати, що керований технологічний процес енергогенеруючого блоку ТЕЦ є розподіленим в часі й просторі, характеризується довільними початковими умовами та впливом неконтрольованих факторів, що обумовлює апріорну невизначеність.

2. Формалізована постановка задачі

Оскільки основною складовою інтелектуальної ІКС ТЕЦ є здатна навчатися СППР, то розглянемо формалізовану постановку її інформаційного синтезу в рамках ІЕІ-технології [4, 5].

Нехай задано алфавіт класів розпізнавання $\{X_m^o \mid m = \overline{1, M}\}$, які характеризують можливі функціональні стани керованого технологічного процесу, і багатовимірну навчальну матрицю $\| \| y_{m,i}^{(j)} \| \|$, в якій рядок є реалізацією образу $\{y_{m,i}^{(j)} \mid i = \overline{1, N}\}$, де N – кількість ознак розпізнавання, а стовпчик матриці – випадкова

навчальна вибірка $\{y_{m,i}^{(j)} \mid j = \overline{1, n}\}$, де n – обсяг вибірки. Крім того, відомий структурований вектор параметрів навчання

$$g = \langle g_1, \dots, g_{\xi}, \dots, g_{\varepsilon} \rangle, \quad (1)$$

які впливають на функціональну ефективність СППР, що навчається, з відповідними на них обмеженнями $R_{\xi}(g_1, \dots, g_{\varepsilon})$.

Необхідно в процесі навчання визначити оптимальні значення координат вектора параметрів (1), які забезпечує максимум усередненого за алфавітом класів розпізнавання інформаційного критерію функціональної ефективності (КФЕ) в робочій (допустимій) області визначення його функції:

$$g^* = \arg \max_{(k)} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E_m^{(k)}, \quad (2)$$

де $E_m^{(k)}$ – обчислений на k -му кроці навчання інформаційний КФЕ на-вчання СППР розпізнавати реалізації класу X_m^o ; $\{k\}$ – множина кроків навчання СППР.

На етапі екзамени, тобто безпосередньо в робочому режимі, необхідно прийняти рішення про належність реалізації, що характеризує поточний функціональний стан енергогенеруючого блоку, одному із класів заданого алфавіту і видати рекомендації оператору для прийняття керуючих рішень.

Таким чином, розв'язок задачі інформаційного синтезу здатної навчатися СППР в рамках ІЕІ-технології полягає в оптимізації параметрів навчання шляхом ітераційного пошуку глобального максимуму інформаційного КФЕ в робочій (допустимій) області визначення його функції.

3. Опис алгоритму навчання СППР

Вхідною інформацією для навчання СППР є в загальному випадку дійсний масив реалізацій образу $\{y_m^{(j)} \mid m = \overline{1, M}; j = \overline{1, n}\}$; система полів контрольних

допусків $\{d_{k,i}\}$ на ознаки розпізнавання і рівні селекції $\{r_m\}$, які використовуються як рівні кодування при формуванні за бінарною навчальною матрицею координат двійкових еталонних (усереднених) векторів-реалізацій і за замовчуванням дорівнюють 0,5 для всіх класів розпізнавання.

Як параметри оптимізації СППР розглядаються радіуси гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання, які відновлюються в процесі навчання в радіальному базисі простору ознак розпізнавання.

Розглянемо основні етапи реалізації інформаційно-екстремального алгоритму навчання:

1. Обчислюється еталонна реалізація $\{y_{1,i} \mid i = \overline{1, N}\}$ шляхом статистичного усереднення реалізацій $y_{1,i}^{(j)}$ класу X_1^o , який є найбільш бажаним класом для особи, що приймає рішення, і задається стартове значення параметра δ поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання.

2. Формується масив $\{x_{1,i}^{(j)}\}$ двійкових векторів-реалізацій класу X_1^o за правилом:

$$x_{1,i}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{if } y_{1,i} - d \leq y_{1,i}^{(j)} \leq y_{1,i} + d, \\ 0, & \text{if else.} \end{cases}$$

3. Формується масив еталонних двійкових векторів-реалізацій $\{x_{m,i} \mid m = \overline{1, M}, i = \overline{1, N}\}$, елементи яких визначаються за правилом:

$$x_{m,i} = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{m,i}^{(j)} > \rho_m; \\ 0, & \text{if else,} \end{cases}$$

де ρ_m – рівень селекції координат еталонного двійкового вектора $x_m \in X_m^o$.

4. Будується для векторів $\{x_m\}$ матриця кодових відстаней $\|d_{r,s} \mid r, s = \overline{1, M}\|$, елементи якої визначаються за правилом:

$$d_{r,s} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N (x_r \oplus x_s), & \text{if } r \neq s; \\ N + 1, & \text{if } r = s. \end{cases}$$

Таким чином, нульовим діагональним елементам матриці $\|d_{r,s}\|$ штучно присвоюється значення $N + 1$ – максимальна кодова відстань у матриці.

5. Формуються пари найближчих еталонних векторів-реалізацій $\mathfrak{R}_r^{[2]} = \langle x_m, x_c \rangle$ за умови, що:

$$d_r(x_r \oplus x_c) = \min_{\{r\}} \{d_{r,s}\},$$

де $d_r(x_r \oplus x_c)$ – кодова відстань між вектором x_r і найближчим до нього в r -му рядку матриці вектором x_c .

6. Оптимізація радіуса контейнера класу розпізнавання X_m^o , що вимірюється в бінарному просторі ознак розпізнавання кодовою відстанню d_m , відбувається згідно з формулою (1) за ітераційною процедурою:

$$d_m^* = \arg \max_{G_d \cap (k)} E_m^{(k)}, \quad (3)$$

де G_d – область допустимих значень радіусів гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання, при цьому $G_d \in [0; d(x_m \oplus x_c) - 1]$, тобто радіус контейне-

ра класу розпізнавання X_m^o повинен бути менше його міжцентрової відстані з сусіднім класом X_c^o .

Як критерій функціональної ефективності навчання СППР використовувалася для двохальтернативних рішень модифікована інформаційна міра Кульбака [4]

$$E_m^{(k)} = \{1 - [\alpha_m^{(k)}(d) + \beta_m^{(k)}(d)]\} \log_2 \frac{2 - [\alpha_m^{(k)}(d) + \beta_m^{(k)}(d)]}{\alpha_m^{(k)}(d) + \beta_m^{(k)}(d)}, \quad (4)$$

де $\alpha_m^{(k)}(d)$ – помилка першого роду при прийнятті рішення на k -му кроці навчання; $\beta_m^{(k)}(d)$ – помилка другого роду; d – дистанційна міра радіусу гіперсферичного контейнера, що відновлюється в радіальному базисі простору ознак розпізнавання.

6. Процедура закінчується при знаходженні глобального максимуму КФЕ (1) в робочій області визначення його функції

$$E_m^* = \max_{\{k\}} E_m^{(k)}.$$

Визначені при максимальному значенні критерію E_m^* оптимальні геометричні параметри контейнерів класів розпізнавання: еталонний двійковий вектор x_m^* , вершина якого визначає геометричний центр контейнера і його оптимальний радіус d_m^* дозволяють побудувати вирішальні правила для віднесення реалізації, що розпізнається, до відповідного класу із заданого алфавіту. Вирішальні правила для гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання подамо у вигляді предикатного виразу

$$(\forall X_m^o \in \mathfrak{R}^{[M]}) \{ \text{if } \mu_m = 1 - \frac{d[x_m \oplus x^{(j)}]}{d_m^*} \leq 1 \text{ then } x^{(j)} \in X_m^o \text{ else } x^{(j)} \notin X_m^o \},$$

де μ_m – функція належності реалізації $x^{(j)}$, що розпізнається, класу розпізнавання X_m^o .

Таким чином, основною функцією розглянутого алгоритму навчання у рамках ІЕІ-технології є обчислення на кожному кроці навчання інформаційного КФЕ і організація пошуку глобального максимуму в робочій області визначення його функції з метою визначення оптимальних геометричних параметрів розбиття простору ознак на класи розпізнавання.

4. Результати навчання СППР

Наведений вище алгоритм машинного навчання СППР було реалізовано для оцінювання функціонального стану енергогенеруючого блоку ТЕЦ міста Шостки (Україна). Алфавіт класів розпізнавання складався із трьох класів, які характеризували функціональні стани технологічного процесу на вході системи турбіна-генератор. При цьому клас X_1^o характеризував функціональний стан «Норма», при якому температура та тиск пару відповідали технологічному режиму; клас X_2^o – функціональний стан «Менше норми» і клас X_3^o – функціональний стан «Більше норми». Вектор-реалізація кожного класу розпізнавання, який формувалася в процесі опитування датчиків інформації енергогенеруючого блоку, складався із 66 структурованих ознак. Кількість реалізацій, які утворювали навчальну матрицю для кожного класу розпізнавання дорівнювала $n=60$.

На рис. 2 показано графіки залежності КФЕ (3) від радіусів гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання, одержанні при реалізації алгоритму навчання (2). На рис. 2 темна ділянка на графіках позначає робочу (допустиму) область визначен-

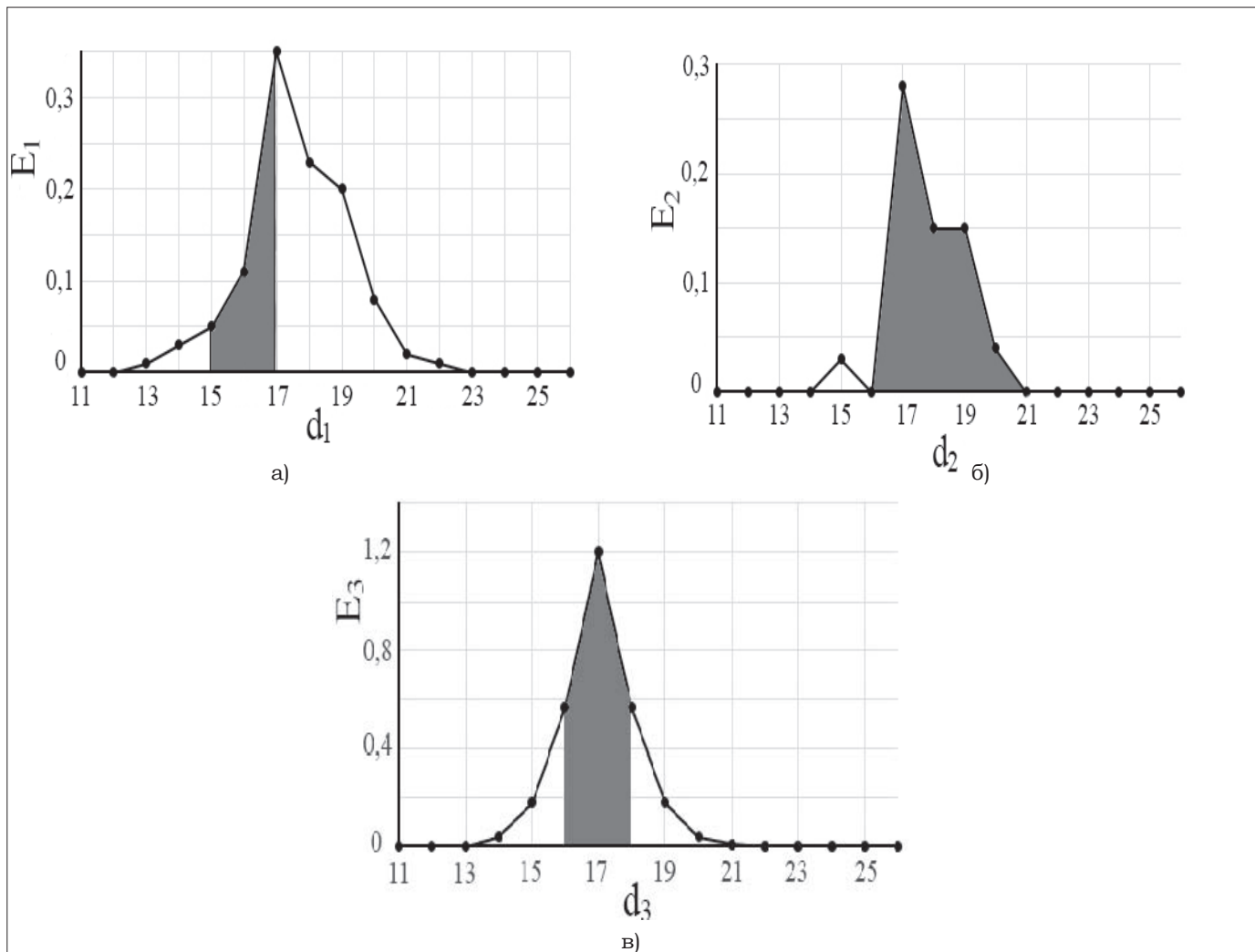


Рис. 2. Графіки залежності КФЕ від радіусів контейнерів класів розпізнавання: а) клас X_1^o ; б) клас X_2^o ; в) клас X_3^o

ня функції критерію (3), в якій перша D_1 і друга D_2 достовірності перебільшують відповідно помилки першого та другого роду.

Аналіз рис. 2 показує, що оптимальні значення радіусів контейнерів всіх класів розпізнавання дорівнюють 17 кодовим одиницям при максимально усередненому за алфавітом класів розпізнавання значенні КФЕ $\bar{E} = 0,61$. При цьому недостатньо високе значення КФЕ навчання СППР обумовлене неоптимальною системою контрольних допусків на ознаки розпізнавання, яка застосовувалася при формуванні бінарної навчальної матриці.

Висновки

1. Реалізація у рамках ІЕІ-технології алгоритму навчання СППР для керування енергогенеруючим блоком ТЕЦ дозволяє побудувати вирішальні правила шляхом цілеспрямованого пошуку глобального максимуму інформаційного критерію в робочій (допустимій) області визначення його функції.

2. Одержані на основі машинного навчання та розпізнавання образів результати дозволяють надати ІКС ТЕЦ властивість адаптивності за довільних початкових умов технологічного процесу й впливу неконтрольованих збурюючих факторів.

3. Для підвищення функціональної ефективності навчання СППР розпізнавати поточний стан технологічного процесу необхідно оптимізувати інші параметри функціонування, наприклад, систему контрольних допусків на ознаки розпізнавання.

Список литературы:

1. Han J. Data mining: concepts and techniques. – 3rd ed. / J. Han, M. Kamber, J. Pei. – Morgan Kaufmann / Elsevier, 2012. – 744 p.
2. Субботин С. А. Интеллектуальные информационные технологии проектирования авто-матимизированных систем диагностирования и распознавания образов: Монография / С. А. Субботин, А. А. Олейник, Е. А. Гофман, С. А. Зайцев, Ал. А. Олейник; под ред. С. А. Субботина. – Харьков: Компания СМІТ. – 2012. – 318 с.
3. Campbell C. Learning with Support Vector Machines / C. Campbell, Y. Ying. // Morgan and Claypool. – 2011. – 95 p.
4. Довбиш А. С. Основи проектування інтелектуальних систем: Навчальний посібник / А. С. Довбиш. – Суми: Видавництво СумДУ, 2009. – 171 с.
5. Довбиш А. С. Інтелектуальні інформаційні технології в електронному навчанні / А. С. Довбиш, А. В. Васильєв, В. О. Любчак. – Суми: Вид-во СумДУ, 2013. – 191 с.