

## ФОРМУВАННЯ БАЗИ ПРЕЦЕДЕНТІВ ПРИ МОНІТОРИНГУ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

**Abstract.** The urgent problem of formation a base of precedents as an integral part of the decision support system for monitoring the energy efficiency of production technological systems is considered. A method and algorithm for constructing of a base of precedents based on data clustering is proposed. This approach allows us to obtain an approximation of the effective energy consumption function in the form of a spline. The expediency of using cluster analysis when building a base of precedents for stationary energy consumption is substantiated.

### Актуальність

Задача аналізу зростаючого обсягу даних виникає при моніторингу різноманітних динамічних систем. До таких задач відноситься, зокрема, оперативне визначення ефективності споживання енергетичних ресурсів технологічними системами.

Характерною рисою енергетичного господарства сучасних виробничих об'єктів є наявність служби енергетичного менеджменту, яка повинна забезпечувати ефективне споживання палива та енергії на підприємстві. Однак, вітчизняний досвід управління ефективністю енергоспоживання, заснований на застарілій системі нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів, не дозволяє вважати норми, що встановлюються для різних підприємств, організацій та установ, достатньо обґрунтованими і прогресивними [7]. Відтак, актуальною стає задача забезпечення енергетичних менеджерів підприємств ефективними засобами нормування енергетичних витрат.

### Постановка задачі

У сучасній практиці служби енергетичного менеджменту в багатьох країнах світу використовують підхід до моніторингу енергоефективності, відомий під назвою Monitoring and Targeting System [1, 2, 3]. Він полягає в порівнянні фактичного енергоспоживання з нормативним, яке, в загальному випадку, являє собою більш або менш складну математичну модель споживання палива чи енергії технологічним об'єктом. Вочевидь, що від якості побудованої математичної моделі, від ступеню її адекватності процесу енергоспоживання у подальшому буде залежати, чи будуть результати контролю ефективності використання енергії відповідним технологічним об'єктом достатньо точними та обґрунтованими [4].

В зарубіжній практиці, при побудові систем Monitoring and Targeting,

так звані «стандарти», або нормативи споживання енергії традиційно встановлюють у вигляді константи, або у вигляді простих лінійних рівнянь регресії, які враховують вплив на енергоспоживання лише одного-двох основних чинників.

Розробники вітчизняних систем оперативного контролю ефективності використання енергії, пропонують встановлювати «стандарти» споживання енергії для різних технологічних об'єктів на основі побудови більш складних математичних моделей енергоспоживання [7]. Причому для цієї мети застосовується процедура побудови рівнянь багатофакторної лінійної регресії, використання якої у порівнянні з традиційними зарубіжними системами Monitoring and Targeting дозволяє забезпечити одержання значно більш точних та обґрунтованих результатів контролю. Однак, методики побудови таких систем мають низку недоліків, спрощень, невіршених питань, що зменшують ефективність застосування їх для оперативного управління ефективністю використання палива та енергії [4].

В даній роботі розглядається окреме питання формування бази прецедентів при прецедентному підході до оперативного моніторингу заснованому на CBR (Case-Based Reasoning) – циклах [8, 9].

Нехай маємо технологічну систему DS, енергетичний стан E якої залежить від факторів впливу  $X_1, \dots, X_n$  і задається нелінійною функцією  $E=f(X_1, \dots, X_n)$ . Необхідно визначити зміни станів E динамічної системи DS по наборам експлуатаційних параметрів  $X_1, \dots, X_n$ , які періодично надходять до обчислювального пристрою. В процесі роботи системи моніторингу накопичується велика кількість таких наборів, з аналізу яких отримуються знання про енергоефективність працюючої технологічної системи. Для того, щоб система моніторингу залишалась ефективною необхідно при отриманні кожного чергового набору факторів впливу – прецедента, забезпечити знаходження кількох його найближчих сусідів для побудови сплайна функції енергоспоживання.

### Вирішення задачі

Прецедентом ефективного, або неефективного енергоспоживання визнається стан працюючої технологічної системи з певним стаціонарним енергоспоживанням, що може служити прикладом в майбутньому. Запропоновано наступний формат прецедентів стаціонарного енергоспоживання:

$$Case = \left\langle \begin{array}{l} M(X_1), \dots, M(X_n); \\ D(X_1), \dots, D(X_n); \\ r(X_1), \dots, r(X_n); \\ P, \quad \tau, \quad S \end{array} \right\rangle \quad (1)$$

де:  $M(X_1), \dots, M(X_n)$  – математичні очікування факторів впливу  $X_1, \dots, X_n$ ;  
 $D(X_1), \dots, D(X_n)$  – статистична дисперсія факторів впливу  $X_1, \dots, X_n$ ;  
 $r(X_1), \dots, r(X_n)$  – коефіцієнти автокореляції факторів впливу  $X_1, \dots, X_n$ ;  
 $P$  – потужність енергоспоживання за період стаціонарного стану;  
 $\tau$  – тривалість стаціонарного стану;  
 $S$  – ймовірний діагноз технічного стану.

База прецедентів будується в складі експертної системи на основі прецедентів, які надходять від зовнішнього програмованого контролера збору даних. Первинне заповнення бази прецедентів виконується за участі експерта. Нехай  $Case$  множина прецедентів. Вважається, що усі прецеденти енергоспоживання розташовані в необмеженому просторі математичних очікувань факторів впливу. У цьому просторі задана функція відстані між прецедентами:

$$d(Case_i, Case_j) = \sqrt{(M_i(X_1) - M_j(X_1))^2 + (M_i(X_2) - M_j(X_2))^2 + \dots + (M_i(X_n) - M_j(X_n))^2} \quad (2)$$

Міркування, засновані на СВР-циклі, полягають в розшукуванні серед усіх зафіксованих прецедентів найближчих сусідів до поточного та побудові лінійної апроксимації функції енергоспоживання по найближчим сусідам. Пошук найближчих сусідів проводиться серед великої кількості прецедентів. Для спрощення цієї процедури пропонується залучити механізм кластеризації. Кластеризація прецедентів це процес об'єднання прецедентів в групи, що характеризуються схожими ознаками. На відміну від звичайної класифікації, де кількість груп об'єктів фіксована і заздалегідь визначена набором прецедентів, тут ні групи, ні їх кількість заздалегідь не визначені і формуються в процесі роботи системи, виходячи з певної міри близькості ознак прецедентів [5, 6].

При цьому кластери представляють окремі непересічні ділянки залежності інтенсивності енергоспоживання від факторів впливу. Можна вважати, що прецеденти, віднесені до одного й того ж класу відносяться до однієї ділянки функції ефективного енергоспоживання. Ці класи, в свою чергу, пропонується використовувати як основу для визначення близькості прецедентів.

Припустимо, що поступово отримуємо послідовність прецедентів статичного енергоспоживання. Необхідно в темпі отримання прецедентів відносити кожний з них до однієї з непересічних підмножин так, щоб кожний кластер складався з прецедентів, які за метрикою  $d(Case_i, Case_j)$  знаходились в області існування кластера. При цьому кожному прецеденту приписується ідентифікатор кластера  $n \in N$ , до якого він відноситься.

Вважаємо, що простір математичних очікувань факторів впливу має

нульовий прецедент  $Case_0$  з нульовими значеннями факторів впливу. Відстань від нульового прецеденту до любого іншого прецеденту визначається залежністю:

$$d(Case_0, Case_i) = \sqrt{(M_j(X_1))^2 + (M_j(X_2))^2 + \dots + (M_j(X_n))^2} \quad (3)$$

Кожен з кластерів характеризується початковим радіусом  $R_i$  і глибиною існування  $\Delta R$ . Початковий радіус кластера це відстань між нульовим прецедентом  $Case_0$  та ближньою до нього межею кластера (Рис.).

$$R_i = d_{min}(Case_0, Case_i). \quad (4)$$

Область існування кластеру це множина прецедентів  $Case_j$  (позначені зірочками на рисунку), які задовольняють умові

$$R_i \leq d(Case_0, Case_j) < R_i + \Delta R. \quad (5)$$

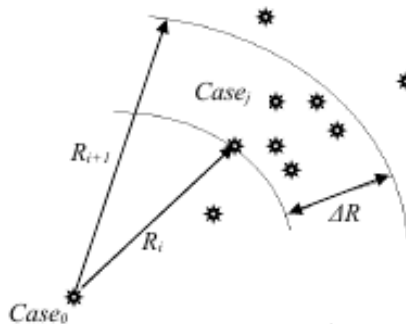


Рис. Схема кластера з радіусом  $R_i$  і глибиною існування  $\Delta R$ .

Алгоритм кластеризації це функція  $a: Case_j \rightarrow n$  яка любому прецеденту ставить у відповідність ідентифікатор кластера  $n \in N$ , при цьому множина  $N$  заздалегідь невідома. В якості ідентифікатора  $n$  кластера доцільно використовувати його радіус, який розраховується за формулою:

$$n_i = R_i = \left\lfloor \frac{d(Case_0, Case_1)}{\Delta R} \right\rfloor \quad (6)$$

В подальшому найближчих сусідів шукаємо тільки серед прецедентів поточного кластеру.

Алгоритм CBR-циклу формування бази прецедентів та визначення величини потужності ефективного енергоспоживання при оперативному моніторингу ефективності технологічних систем:

**Вхідні дані:**  $Case_j$  – черговий прецедент за форматом (1);  $\Delta R$  – глибина існування кластера;  $[d]$  – допустима норма відстані між прецедентами кластера яка забезпечує збереження допущення лінійності функції енергоспоживання;

**Вихідні дані:**  $P_j^{ef}$  – потужність ефективного енергоспоживання для чергового прецеденту.

**Крок 1.** Визначення факторів впливу  $M_j(X_1), \dots, M_j(X_n)$  та потужності енергоспоживання  $P_j$  за період дії чергового прецеденту  $Case_j$ ;

**Крок 2.** Розрахунок відстані між черговим прецедентом  $Case_j$  та нульовим прецедентом  $Case_0$  в просторі факторів впливу згідно з рівнянням (3).

**Крок 3.** Визначення ідентифікатора  $n_i$  кластера, до якого належить черговий прецедент згідно з рівнянням (6), привласнення черговому прецеденту ідентифікатора кластера  $n_i$ .

**Крок 4.** Пошук найближчих сусідів до поточного прецеденту в межах кластеру  $n_i$  шляхом розрахунку відстаней між прецедентами  $i$ -го кластеру згідно з рівнянням (2). Найближчими сусідами вважаються ті, що задовольняють рівнянню  $d(Case_i, Case_j) < [d]$ .

**Крок 5.** Лінійна апроксимація функції ефективного енергоспоживання технологічної системи методом найменших квадратів. Розрахунок «стандартного» енергоспоживання  $P_j^{ef}$ .

**Крок 6.** Якщо  $P_j > P_j^{ef}$  оповіщення оператора про завищені енерговитрати, інакше поточний прецедент  $Case_j$  розміщується в базі прецедентів.

**Крок 7.** Перехід до кроку 1.

## **Висновок**

В роботі запропонований метод і алгоритм моніторингу ефективності споживання енергетичних ресурсів в технологічних системах, заснований на моделюванні міркувань по прецедентам стаціонарного ефективного енергоспоживання.

Основна мета моніторингу ефективності енергетичного споживання полягає в наданні службам енергетичного менеджменту підприємств

оперативної інформації про наднормативні енергетичні втрати в технологічних системах.

Запропонований в роботі спосіб формування бази прецедентів дозволяє підвищити швидкість пошуку найближчих сусідів поточним прецедентам та відповідно швидкість прийняття рішень енергетичним менеджером. Крім того суттєво зменшується необхідний обсяг пам'яті.

Запропонований метод моніторингу, заснований на прецедентних міркуваннях статичних процесів може бути використаний в інших галузях крім енергозбереження.

1. *Gotel, D G, and Hale, D K.* Application of monitoring and targeting to energy management. United Kingdom: N. p., 1989. Web.
2. *Находов В.Ф., О. В. Бориченко О.В.* Процес контролю виконання встановлених «стандартів» в системах оперативного контролю ефективності енерговикористання. Вісник НТУУ «КПІ», Серія «Гірництво», Випуск 24. – 2014 р. с. 111-119.
3. *Беляев А.С., Бубенок Е.К.,* Метод целевого энергетического мониторинга и его усовершенствование для анализа работы предприятия, выпускающего несколько видов продукции. Энергобезопасность и энергосбережение, №2, 2011, с. 10-14.
4. *Находов В. Ф., Стеценко І. В., Бедерак Я. С.* Застосування методів самоорганізації математичних моделей енергоспоживання для встановлення «стандартів» в системах оперативного контролю енергоефективності. Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит, №05 (99), 2012, с. 23-33.
5. *Kohonen T.* Self-Organizing Maps / Springer, 1995. –501 с.
6. Змитрович А.И. Интеллектуальные информационные системы / Мн.: НТООО «ТетраСистемс», 1997. –368 с.
7. *Находов В.Ф., Бориченко О.В., Іванько Д.О.* Контроль ефективності енерговикористання в системі енергетичного менеджменту / Вісник КНУТД, 2013, №6, с. 67 – 77.
8. *Ємельянов В.О.* Адаптація методу прецедентів для підтримки процесу визначення марки металу / В.О. Ємельянов, О.М. Фоменко // Системи озброєння і військова техніка. – 2011. – № 1. – С. 88–90.
9. *Климчук С. О.* Розроблення прецедентної системи підтримки прийняття рішень для діагностики мостових кранів / С.О. Климчук // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2010. – № 689 : Інформаційні системи та мережі. – С. 169–176.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3610655>

*Поступила 22.08.2019р.*