DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.02.079>
УДК 681.142

Б.М. Плєскач, канд. техн. наук
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є Пухова НАН України
Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15,
тел. 050 652 17 16; e-mail: energy@ipme.kiev.ua

Сегментація часового ряду параметрів енергоспоживання

Розглянуто актуальну проблему формування інформаційної бази прецедентного методу діагностування енергетичної ефективності технологічних систем. Таку базу необхідно створювати в темпі протікання технологічного процесу і утримувати характеристики випадків ефективного використання енергії. Запропоновано виділяти прецеденти енергоспоживання за допомогою сегментації потоку похідних режимних параметрів експлуатації обладнання на стаціонарні ділянки. Сегментація здійснюється на основі послідовного обчислення відстаней між елементами ряду у просторі режимних параметрів і порівняння їх з пороговими значеннями. Наведено методику і алгоритм сегментації часового ряду.

Ключові слова: сегментація часових рядів, енергетичний моніторинг, прецеденти енергоспоживання.

Впровадження в практику промислових підприємств засобів діагностування енергетичної ефективності і підтримки прийняття рішень при управлінні споживанням енергетичних ресурсів є дуже важливим. Застосування комп'ютеризованих систем, орієнтованих на діагностування та контроль енергетичної ефективності обладнання технологічних систем різного призначення, дозволяє глибше зрозуміти, якими шляхами витрачаються енергетичні ресурси. Досконалі виробничі системи максимізують виробництво і одночасно мінімізують витрати та вплив на природне середовище [1].

Енергетичну ефективність підприємства в цілому можна збільшити за допомогою автоматизації та інтелектуалізації аналізу даних, які мають відношення до енергоспоживання. Так, в роботі [2] на прикладі цементного виробництва показано, що збільшення охопту виробничих даних,

© Плєскач Б.М., 2021

що підлягають моніторингу, та застосування нових способів аналізу даних приводить до збільшення енергетичної ефективності. Енергетичний менеджмент сучасних підприємств потребує розробки нових інструментів моніторингу енергетичних втрат, здатних підтримувати прийняття рішень. Перспективним підходом до методології енергоменеджменту є впровадження постійно діючого «розумного» моніторингу енергоефективності технологічних систем, який дозволяв би оперативне реагування на погіршення стану системи та збільшення енергетичних втрат [3].

Методологія виявлення прихованих енергетичних втрат в діючому технологічному обладнанні основана на порівнянні інтенсивності поточного енергоспоживання з еталоном ефективного енергоспоживання, здатним адаптуватись до різних режимів роботи технологічної системи. Проблема полягає в формуванні інформаційної бази для визначення еталону ефективного енергоспоживання, заснованого на режимних параметрах технологічної системи.

Огляд існуючих методів формування інформаційної бази діагностування енергоспоживання і постановка задачі. Основними способами моніторингу енергетичної ефективності є прецедентний і розрахунковий [4]. Прецедентний спосіб оснований на уяві, що мінімальне енергоспоживання, досягнуте у минулому, є ефективним, не змінюється і не залежить від режиму роботи обладнання. Системи оперативного моніторингу, які реалізують прецедентний підхід, намагаються автоматично порівнювати поточне енергоспоживання з прийнятим за ефективне в минулому. Такий спосіб моніторингу виглядає дуже спрощеним і підходить для випадків, коли режимні параметри технологічного процесу не змінюються з часом.

В основі розрахункового способу, який ще називають стандартом енергоспоживання, лежить моделювання технологічної системи і розрахунок її еталонного ефективного енергоспоживання [3]. Такий спосіб підходить для випадків, коли існує чіткий зв'язок між режимними параметрами технологічної системи і інтенсивністю енергетичних витрат. Наприклад, продуктивність обладнання може впливати на його енергоспоживання. При розрахунковому способі моніторингу еталон ефективного енергоспоживання зазвичай розраховується періодично, під час проведення енергетичних аудитів [5]. Впровадження автоматизованого розрахунку еталону ефективності і постійного його відслідковування в залежності від режиму роботи обладнання дозволяє поєднати прецедентний і розрахунковий способи моніторингу заради створення дієвої системи підтримки прийняття рішень при діагностуванні енергетичної ефективності технологічних систем.

Розглянемо задачу створення інформаційного забезпечення діагностичної моделі енергоспоживання технологічної системи. Діагностична модель являє собою базу даних, в якій накопичуються випадки практично досягнутого мінімального енергоспоживання в різних режимах роботи обладнання. Кожний випадок зберігається у формі прецедента, до складу якого крім питомої інтенсивності споживання енергії входять характеристики відповідного режиму роботи.

Моделювання інформаційних зв'язків при діагностуванні енергоспоживання технологічної системи. Похідними даними для діагностування ефективності функціонування обладнання і оцінки прихованих енергетичних втрат, крім питомого обсягу спожитої енергії, є режимні параметри протікання технологічного процесу, які впливають на інтенсивність енергоспоживання і називаються визначальними. До складу інформаційного забезпечення діагностичної моделі входять виключно взаємозалежні визначальні параметри.

Для енергетичного стану технологічної системи, що розглядається, визначальною є наступна узагальнена сукупність параметрів:

- регульовані технологічні параметри;
- контрольовані технологічні параметри;
- неконтрольовані параметри відхилень технологічного процесу.

На рисунку надано узагальнену схему моделі інформаційних зв'язків при діагностуванні енергоспоживання технологічної системи. Регульовані технологічні параметри задають режим технологічного процесу і змінюються або підтримуються постійними за допомогою регуляторів системи керування (наприклад, для системи опалення приміщення це температура в середині приміщення, для системи повітряпостачання це тиск в магістралі повітряпроводу та ін.).

Контрольовані технологічні параметри впливають на енергоспоживання. Їх можна проконтролювати, але неможливо довільно змінити (наприклад, для системи опалення це температура повітря зовні і вологість повітря в середині приміщення, для системи повітряпостачання це витрата повітря).

Параметри відхилень технологічного процесу викликані випадковими неконтрольованими подіями, пов'язаними із збільшеннями енергетичних витрат (наприклад, для систем опалення це може бути поява нещільностей у вигляді відкритих вікон, дверей, включення вентиляції без рекуперації тепла, для системи повітряпостачання це поява несанкціонованого витоку повітря, поява дефектів в компресорі та ін.).

Потік похідних даних надходить до системи моніторингу у вигляді часового ряду. Складність полягає у синхронізації і подальшому пошуку співвідношення між вектором технологічних параметрів і інтенсивністю

Модель інформаційних зв'язків при моніторингу енергоспоживання технологічної системи

енергетичних витрат. Цю складність можна подолати за допомогою сегментації часового ряду і виділення з його складу ділянок стаціонарності, які в подальшому будуть розглядатись як прецеденти енергоспоживання. Огляд можливих методів сегментації часових рядів надано в роботі [6].

Часовий ряд

$$T = \{X_n, E_n = [x_{1,n}, x_{2,n}, \dots, x_{k,n}, E_n] : 1 \leq n \leq N\}$$

це є скінченний набір з N k -мірних структурованих послідовностей режимних параметрів технологічної системи $X = [x_1, x_2, \dots, x_k]$ та відповідної інтенсивності енергоспоживання E , позначених часовими мітками $t_1, \dots, t_N$. Сегментація часового ряду T розділяє його на послідовність самостійних рядів $S = \{S_1, S_2, \dots, S_C\}$, що не перекриваються. Сегмент S часового ряду T це скінченний набір структурованих елементів $X_n E_n$ позначених часовими мітками $t_a, \dots, t_n, \dots, t_b$:

$$S_i = \{X_n E_n = [x_{1,n}, x_{2,n}, \dots, x_{k,n}, E_n] : a \leq n \leq b\}.$$

Процедура сегментації часового ряду режимних параметрів полягає у розділенні потоку даних на окремі непересічні ділянки із схожими характеристиками для виділення серед них ділянок з ознаками стаціонарності [7]. Для формалізації відносин між елементами ряду вводиться спеціальна функція ціни входу в сегмент $cost[S]$, яка визначає відносини

між елементами ряду. Зазвичай для сегментації використовують функцію відстані між елементами ряду або групами елементів [8, 9].

В даному випадку для сегментації часового ряду пропонується використовувати функцію відстані d між елементами X_1 та X_n часового ряду в k -мірному просторі режимних параметрів X :

$$\text{cost}[S] = d(X_1, X_i) = \sqrt{(x_{11} - x_{1i})^2 + (x_{21} - x_{2i})^2 + \dots + (x_{k1} - x_{ki})^2}. \quad (1)$$

Умова включення чергової, i -тої, групи отриманих режимних параметрів X_i, E_i до чергового сегменту S , що заповнюється даними, наступна:

$$\text{cost}[S] = d(X_1, X_i) \leq \sigma, \quad (2)$$

де σ — порогове значення, яке визначається емпіричним шляхом.

Псевдокод алгоритму сегментації часового ряду визначальних режимних параметрів при формуванні діагностичної моделі енергоспоживання технологічних систем наступний:

1. Відкрити перший сегмент часового ряду, отримати та зберегти в відкритому сегменті перший набір режимних параметрів X_1, E_1 .
2. Отримати наступний набір режимних параметрів X_i, E_i та розрахувати ціну входу цього набору у відкритий сегмент за формулою (1).
3. Поки ціна входу в сегмент для нових наборів режимних параметрів менша за порогове значення σ , згідно з формулою (2), вони приєднуються до відкритого сегменту. В іншому випадку відкритий сегмент закривається і передається на подальшу обробку, відкривається новий сегмент і в нього першим заноситься набір режимних параметрів, для яких ціна входу виявилась більшою за порогове значення.

Запропонований алгоритм дає змогу в темпі технологічного процесу обробляти потік похідних режимних параметрів, визначати сегменти з ознаками стаціонарності і передавати їх до подальшої обробки для розрахунку прихованих енергетичних втрат. Процедура сегментації потоку режимних параметрів технологічної системи може бути реалізована в окремому програмованому контролері, розташованому в зоні енергетичного обліку.

Висновки

Використання сучасних обчислювальних систем для діагностування енергоспоживання технологічних систем і оцінки прихованих енергетичних втрат допомагає обслуговуючому персоналу підприємства відслідковувати і своєчасно усувати причини втрат енергії. Діагностування оснований на постійному порівнянні поточних рівнів енерговитрат з їх еталонними ефективними величинами. Ці еталони залежать від режимів функціонування технологічних систем і відповідно режимних параметрів.

Отриманий результат у вигляді методичної та алгоритмічної основи може бути застосований при моніторингу технологічних параметрів обладнання діючого виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Olajire A.A. The brewing industry and environmental challenges // *Journal of Cleaner Production*, 2020, Vol. 256, pp. 1—21, Doi:10.1016/j.jclepro.2012.03.003
2. Mandal S., Madheswaran S. Energy use efficiency of Indian cement companies: a data envelopment analysis // *Energy Efficiency*, 2011, Vol. 4, pp. 57—73. Doi: 10.1007/s12053-010-9081-7.
3. Moss K. Monitoring and Targeting // *Computer Science*, Published 2006. URL: Doi: <https://doi.org/10.4324/9780203349021>
4. Ramasubramanian S., Avinash Y., Pragathi Chitra S. et al. An activity based approach to minimize energy usage of service sector infrastructure. Second International Conference IEEE Infrastructure Systems and Services: Developing 21st Century Infrastructure Networks (INFRA), 2009, pp 1—6.
5. Праховник А.В., Закладний О.М., Закладний О.О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами // *Електро-технічні та комп'ютерні системи*, 2011, № 3, с. 375—376. Режим доступу http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2011_3_129.
6. Keogh E., Chu S., Hart D., Pazzani M. Segmenting Time Series: A Survey and Novel Approach: // *Data Mining in Time Series Databases*, 2004, pp. 1—21. URL: <https://www.cs.rutgers.edu/~pazzani/Publications/survey.pdf>
7. Shumway R.H., Stoffer D.S. Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples, 3rd Edition. Springer, 2011, 609 p.
8. Vasko K, Toivonen H Estimating the number of segments in time series data using permutation tests. IEEE International Conference on Data Mining, 2002, pp 466—473.
9. Himberg J, Korpioja K, Mannila H. et al. Time-series segmentation for context recognition in mobile devices. IEEE International Conference on Data Mining (ICDM01). San Jose, California, 2001, pp. 466—473.

Отримано 23.12.20

REFERENCES

1. Olajire, A.A. (2012), “The brewing industry and environmental challenges”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 256, pp. 1-21. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.003.
2. Mandal, S. and Madheswaran, S. (2011), “Energy use efficiency of Indian cement companies: a data envelopment analysis”, *Energy Efficiency*, Vol. 4, pp. 57–73. DOI: 10.1007/s12053-010-9081-7.
3. Moss, K. (2006), “Monitoring and Targeting”, *Computer Science*, available at: <https://doi.org/10.4324/9780203349021>. DOI: 10.4324 / 9780203349021.
4. Ramasubramanian, S., Avinash, Y., Pragathi Chitra, S., et al. (2009), “An activity based approach to minimize energy usage of service sector infrastructure”, *Infrastructure Systems and Services: Developing 21st Century Infrastructure Networks (INFRA)*, 2009 Second International Conference on IEEE, pp 1–6.
5. Prakhovnyk, A.V., Zakladny, O.M. and Zakladny, O.O. (2011), “Functional diagnostics of energy efficiency of electromechanical systems with induction motors”, *Electrical and computer systems*, Vol. 3, pp. 375-376, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2011_3_129.

6. Keogh, E., Chu, S., Hart, D. and Pazzani, M. (200), "Segmenting Time Series: A Survey and Novel Approach", *Data Mining in Time Series Databases*, pp. 1-21, available at: <https://www.cs.rutgers.edu/~pazzani/Publications/survey.pdf>.
7. Shumway, R.H. and Stoffer, D.S. (2011), *Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples*, 3rd Edition, Springer, Pittsburgh, PA, USA.
8. Vasko, K. and Toivonen, H. (2002), "Estimating the number of segments in time series data using permutation tests", *IEEE International Conference on Data Mining*, pp. 466–473.
9. Himberg, J., Korpiaho, K., Mannila, H., Tikanmaki, J. and Toivonen, H. (2001), "Time-series segmentation for context recognition in mobile devices", *IEEE International Conference on Data Mining (ICDM01)*, San Jose, CA, USA, pp. 466–473.

Received 23.12.20

B.M. Pleskach

SEGMENTATION OF THE TIME SERIES OF ENERGY CONSUMPTION PARAMETERS

The importance of introducing into the practice of industrial enterprises means of diagnosing energy efficiency and supporting decision-making in the management of energy consumption is noted. The actual problem of formation of information base of precedent method of diagnosing energy efficiency of technological systems is considered. Such a base should be created at the pace of the technological process and keep the characteristics of cases of efficient use of energy. It is proposed to allocate precedents of energy consumption by segmenting the flow of derivative mode parameters of equipment operation into stationary sections. Segmentation is based on the sequential calculation of the distances between the elements of a series in the space of mode parameters and comparing them with the threshold values. The technique and algorithm of time series segmentation are given.

Key words: time series segmentation, energy monitoring, precedents of energy consumption.

ПЛЕСКАЧ Борис Миколайович, канд. техн. наук, докторант Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. У 1978 р. закінчив Миколаївський ордена Трудового Червоного Прапора кораблебудівний інститут ім. адм. С.О. Макарова. Область наукових досліджень — інформаційні технології для підтримки прийняття рішень при діагностуванні технічних систем.