

## ОЦІНКА ПРИХОВАНИХ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ

**Б.М. Плескач\***, канд. техн. наук, **В.Д. Самойлов**, докт. техн. наук

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України,

вул. Генерала Наумова, 15, Київ, 03164, Україна

e-mail: [bn.pleskach@gmail.com](mailto:bn.pleskach@gmail.com)

*Приховані втрати в технологічній системі виникають випадково через появу дефектів у обладнанні, помилкові дії персоналу, зміну неконтрольованих зовнішніх умов. У роботі розглядається спосіб виявлення та оцінки прихованих енергетичних втрат, заснований на машинному навчанні та аналізі прецедентів енергоспоживання, спрямований на усунення таких енергетичних втрат. Бібл. 10.*

**Ключові слова:** енергетичні втрати, технологічна система, машинне навчання, аналіз прецедентів.

Збільшення вартості енергоносіїв та їхньої доступності, а також щораз більший вплив енергоспоживаючих технологічних систем на природне середовище вимагають впровадження систематичних заходів, спрямованих на підвищення енергетичної ефективності виробництв. Водночас прогнозується [1], що в майбутньому споживання енергії буде збільшуватись. Особливо це торкнеться електричної енергії. У всьому світі споживання електроенергії в промисловості здійснюється шляхом перетворення за допомогою електродвигунів та електротермічних систем. Дослідження показують, що система контролю, заснована на аналізі технологічних параметрів та інтенсивності споживання електроенергії, може мати широке застосування в промисловості [2, 3].

Моніторинг та аналіз прецедентів енергоспоживання в режимі реального часу може підвищити обізнаність персоналу підприємств у наявності прихованих енергетичних втрат та вплинути на їхні дії. Оперативний моніторинг відхилень енерговитрат від прийнятих значень ефективного енергоспоживання може стати показником працездатності обладнання та інструментом на підтримку заходів із технічного обслуговування. Конкретні несправності обладнання можна передбачити шляхом виявлення певних закономірностей споживання енергії. Швидке реагування на такі події може запобігти катастрофічним несправностям обладнання. Таким чином, моніторинг енергії стає рушієм надійності обладнання, стабільності технологічного процесу та якості продукції.

Більшість енергоспоживачів перетворюють отримувану енергію та сировину в корисний продукт. У цей процес перетворення залучені технологічне обладнання, продукти виробництва та виконавці. Кожна з цих ланок може впливати на енергоспоживання та привносити енергетичні втрати. Фактичне енергоспоживання технологічної системи  $E$  визначається вектором впливових технологічних параметрів  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$  та сукупністю випадкових неконтрольованих факторів  $Z$ , що викликають приховані енергетичні втрати  $\Delta E$ :

$$E = f(X, Z) = \varphi(X) + \Delta E. \quad (1)$$

Приховані енергетичні втрати у споживача можуть бути викликані порушеннями технічного стану обладнання, погіршенням властивостей сировини, помилковими діями персоналу та іншими факторами, які зазвичай не підлягають автоматизованому контролю. Проблема полягає в тому, що обслуговуючий персонал не отримує оперативну інформацію про наявність та розміри прихованих енергетичних втрат у технологічних системах підприємства. Ця робота присвячена розвитку методів розпізнавання та аналізу прецедентів ефективного енергоспоживання з метою оцінки прихованих енергетичних втрат.

Залежність енергоспоживання від сукупності технологічних параметрів  $X$  за відсутності випадкових неконтрольованих факторів  $Z$  будемо називати функцією ефективного енергоспоживання, а значення цієї функції за певних технологічних параметрів  $X_i$  – ефективним енергоспоживанням  $E_{ei}$ , тобто енергоспоживанням без прихованих енергетичних втрат:



$$E_{ei} = \varphi(X_i) = f(X, Z = 0). \quad (2)$$

Діагностування енергетичної ефективності, а відповідно й оцінка прихованих енергетичних втрат засновані на порівнянні фактичного поточного енергоспоживання технологічної системи  $E$  з ефективним енергоспоживанням  $E_e$ , отриманим з рівняння (2):

$$\Delta E = E - E_e. \quad (3)$$

Функцію ефективного енергоспоживання, а відповідно і значення ефективного енергоспоживання за певних технологічних параметрів зазвичай визначають кількома способами. Відомий спосіб, коли ефективне енергоспоживання отримують шляхом розрахунку за відомим емпіричним або аналітичним залежностям електротехніки, теплотехніки, механіки, гідравліки [4]. Цей метод дає приблизну оцінку еталонної енергії в реальному технологічному процесі. Інший спосіб отримання оцінки ефективного енергоспоживання заснований на проведенні тестових випробувань обладнання і визначенні нормативного енергоспоживання під час роботи обладнання в заданих умовах [5]. Такі оцінки нормативного енергоспоживання не завжди відповідають ефективним еталонам у реальному виробництві [6]. Здебільшого в процесі енергетичного менеджменту для порівняння з поточним енергоспоживанням використовують лінійну регресійну модель залежності «стандартного» енергоспоживання від контрольованих технологічних параметрів за методикою «Monitoring and Targeting» [7].

Прецедентом квазістаціонарного енергоспоживання  $CaseE$  будемо називати випадок у роботі технологічної системи, за якого всі нормалізовані впливові технологічні параметри  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  та споживання енергії  $E$  впродовж певного відрізка часу залишаються в межах заздалегідь визначених допустимих значень. Задані таким чином прецеденти утворюють у  $n$ -мірному просторі впливових технологічних параметрів  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  хмару прецедентів квазістаціонарних станів технологічної системи з різними оцінками енергоспоживання. У цій хмарі присутні прецеденти з мінімальним енергоспоживанням, які утворюють поверхню ефективного енергоспоживання.

Оцінювання прихованих енергетичних втрат, які виникли за певних технологічних параметрів, засновано на визначенні відстані  $\Delta E$  між фактичним поточним енергоспоживанням і поверхнею ефективного споживання. Залежно від отриманого значення  $\Delta E$  можна зробити висновок про енергетичну ефективність роботи обладнання, яке піддається моніторингу. Якщо  $\Delta E \approx 0$ , вважається, що обладнання працює ефективно, якщо  $\Delta E < 0$ , обладнання працює зі зменшеними енерговитратами й економія енергії дорівнює  $\Delta E$ , якщо  $\Delta E > 0$ , обладнання працює з енергетичними втратами, розмір яких досягає  $-\Delta E$ .

Автоматизовані міркування на основі аналізу прецедентів ефективного споживання дають змогу визначити еталони ефективного енергоспоживання для кожного з поточних прецедентів. Для цього з бази накопичених на етапі машинного навчання прецедентів ефективного споживання обирається  $n$  прецедентів, найближчих до поточного, і на їхній основі будується лінійна апроксимація ділянки поверхні ефективного споживання.

Пошук найближчих сусідів проводиться серед великої кількості прецедентів. Для спрощення цієї процедури залучається механізм кластеризації. Кластеризація прецедентів – це процес об'єднання прецедентів у групи, що характеризуються схожими ознаками. Утворені кластери представляють окремі непересічні ділянки функції (2). Вважається, що прецеденти, віднесені до одного й того ж кластера, належать до однієї ділянки поверхні ефективного енергоспоживання.

Синхронізація й пошук співвідношення між вектором технологічних параметрів і інтенсивністю енергетичних витрат досягається шляхом сегментації похідних даних. Мета процедури сегментації часового ряду режимних параметрів полягає в поділі потоку даних на окремі непересічні ділянки зі схожими характеристиками та виділенні серед них ділянок з ознаками стаціонарності [8]. Для формалізації відносин між елементами ряду вводиться спеціальна функція ціни входу в сегмент  $\text{cost}[S]$ , яка визначає відносини між елементами ря-

ду. Зазвичай для сегментації використовують функцію відстані між елементами ряду або групами елементів [9, 10].

**Висновок.** Аналіз пов'язаних літературних джерел демонструє необхідність розповсюдження моніторингу енергоефективності до рівня окремих, конкретних технологічних систем. Це завдання може бути вирішено завдяки збільшенню кількості контрольованих технологічних параметрів та інтелектуалізації їхньої обробки.

У цій роботі пропонується застосувати метод аналізу прецедентів стаціонарного енергоспоживання для оцінки енергетичних втрат у кожній окремій технологічній системі підприємства.

Оцінка енергетичних втрат заснована на порівнянні в реальному масштабі часу фактичного поточного енергоспоживання технологічної системи з розрахунковим значенням, яке прийняте за споживання з допустимими втратами.

Розрахунок значення енергоспоживання з допустимими втратами виконується шляхом групування близьких один до одного прецедентів та побудови лінійного сплайна ефективного енергоспоживання.

1. World Energy Outlook 2019, IEA, Paris. Accessed: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
2. Waide P., Brunner C.U. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. International Energy Agency, 2011.
3. Soner Emec, Jörg Krüger, Günther Seliger, Online fault-monitoring in machine tools based on energy consumption analysis and non-invasive data acquisition for improved resource-efficiency, *13th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, Procedia CIRP 40. 2016. Pp. 236–243.
4. Shaohua Hu, Fei Liu, Yan He, Tong Hu. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools. *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 27. Pp. 133–140.
5. Бережний С.В., Мельник О.Є. Методи визначення питомих норм електроспоживання. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2012. Вип. 25. Ч. II. С. 145–150.
6. Находов В.Ф., Бориченко О.В., Іванько Д.О. Контроль ефективності енерговикористання в системі енергетичного менеджменту. *Вісник КНУТД*. 2013. № 6. С. 67–76.
7. Efficiency Direct, *Energy Monitoring and Targeting* [Online]. Accessed: <https://efficiency-direct.co.uk/services/energy-monitoring-and-targeting/>
8. Shumway R.H., Stoffer D.S. Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples, 3rd Edition. Springer, 2011. 609 p.
9. Kohonen T. Self-Organizing Maps. Springer, 1995. 501 p.
10. Змитрович А.И. Интеллектуальные информационные системы. Мн.: НТООО ТетраСистемс, 1997. 368 с.

## ASSESSMENT OF HIDDEN ENERGY LOSSES IN TECHNOLOGICAL SYSTEMS

**B.M. Pleskach, V.D. Samoilo**

G.E. Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, General Naumov str., 15, Kyiv, 03164, Ukraine

e-mail: [bn.pleskach@gmail.com](mailto:bn.pleskach@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9842-647X>

*Hidden losses in the technological system occur accidentally due to the appearance of defects in the equipment, erroneous actions of personnel, changes in uncontrolled external conditions. The paper considers a method of detecting and estimating hidden energy losses, based on machine learning and analysis of energy consumption precedents, aimed at eliminating such energy losses. Ref. 10.*

**Keywords:** Energy losses, technological system, machine learning, analysis of precedents.

1. World Energy Outlook 2019, IEA, Paris. Accessed: <http://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
2. Waide P., Brunner C.U. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. International Energy Agency, 2011.
3. Soner Emec, Jörg Krüger, Günther Seliger, Online fault-monitoring in machine tools based on energy consumption analysis and non-invasive data acquisition for improved resource-efficiency, *13th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, Procedia CIRP 40. 2016. Pp. 236–243
4. Shaohua Hu, Fei Liu, Yan He, Tong Hu. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 27. May 2012. Vol. 27. Pp. 133–140.
5. Berezhny S.V., Melnyk O.E. Methods for determining the specific norms of electricity consumption. *Technology in agricultural production, industrial engineering, automation*. 2012. Issue 25. Part II. Pp. 145–150. (Ukr)

6. Nakhodov V.F., Borychenko O.V., Ivanko D.O. Control of efficiency of energy use in the energy management system. Visnyk KNUTD. 2013 No. 6. Pp. 67–76. (Rus)
7. Efficiency Direct, Energy Monitoring and Targeting. Accessed: <https://efficiency-direct.co.uk/services/energy-monitoring-and-targeting/>
8. Shumway R.H., Stoffer D.S. Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples, 3rd Edition. Springer, 2011. 609 p.
9. Kohonen T. Self-Organizing Maps. Springer, 1995. 501 p.
10. Zmytrovych A.I. Intellectual information systems. Mn.: NTOOO TetraSystems, 1997. 368 p. (Rus)

Надійшла: 08.06.2023

Прийнята: 06.07.2023

Submitted: 08.06.2023

Accepted: 06.07.2023