

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПРОМИСЛОВОСТІ

Проаналізовано особливості застосування математичних моделей споживання електроенергії для оцінки ефективності використання енергії на підприємствах, яка передбачає функціонування систем контролю енергоефективності за рахунок зіставлення фактичних енерговитрат з планованими. Визначено, що при аналізі споживання енергоресурсів окремими підрозділами підприємства за кожним фактором підприємства не завжди враховують взаємозв'язок процесів, що відбуваються в різних підрозділах, і, як наслідок, знижується ефективність використання математичних моделей як для прогнозування споживання електроенергії, так і для оцінки ефективності споживання. Враховуючи фактори, що визнані вагомими при визначенні споживання електроенергії окремими підрозділами за даними спостережень відділу головного енергетика (з урахуванням їх взаємного впливу) знайдено рівняння регресії та проведено його оцінку. Встановлено, що використання уточнених математичних моделей із звуженим довірчим інтервалом розширює потенціал енергозбереження підприємства та спонукає до більш детального аналізу, пошуку додаткових контрольованих і неконтрольованих факторів впливу на ефективність споживання електроенергії.

Ключові слова: енергоспоживання, регресійна модель, ефективність, енергозбереження, довірчий інтервал

Вступ

В якості основи системи енергоменеджменту застосовують метод цільового енергетичного моніторингу (ЦЕМ). Цей метод був розроблений і широко застосовується на великих промислових підприємствах Західної Європи та США в якості однієї з частин загальної структури управління підприємством. За оцінками Британського агентства з енергоефективності, впровадження ЦЕМ знижує поточні витрати на енергоресурси в грошовому вираженні на 10-20% без додаткових витрат на модернізацію технологій. Найчастіше впровадження ЦЕМ рекомендується як першочерговий захід в комплексній програмі з підвищення енергоефективності [1, 2].

Контроль ефективності використання енергії зазвичай здійснюють на основі розроблених регресійних моделей [3]. Витрати енергії при цьому розглядають як випадкові величини, які змінюються в часі. Значення енерговитрат залежить від низки технологічних параметрів, які також змінюються випадково. Аналіз таких моделей дозволяє найкращим чином оптимізувати існуючі процеси та розробляти заходи щодо підвищення ефективності споживання як електроенергії, так і інших енергоресурсів.

Для більш ефективного використання результатів аналізу на підприємствах вкрай важливим є адекватне оцінювання рівня ефективності споживання електроенергії за розробленими моделями. Тому вдосконалення підходів до використання математичних моделей споживання електроенергії на підприємствах залишається актуальним.

В даний час використовуються різні способи підвищення точності прогнозування обсягів споживання енергоресурсів підрозділами промислових підприємств. У роботі [4] зазначається, що період, протягом якого оцінюється економія енергії значно більший, ніж періоди, в які проводяться вимірювання енергоефективності. Це призводить до збільшення довірчого інтервалу і зниження точності регресійних моделей. Використання традиційних статистичних методів, методів машинного навчання та скорочення періодів вимірювання енергоефективності дозволяє суттєво знизити невизначеність при прогнозуванні споживання та економії енергії.

Робота [5] присвячена огляду базових регресійних моделей, які використовуються для кількісної оцінки енергоефективності промислових підприємств. Спрощення статистичних розрахунків за рахунок графічного представлення результатів дозволяє об'єктивно порівнювати декілька потенційних моделей, обираючи таку, що підходить найбільше.

В [6] показано, що для підвищення точності прогнозування енергоспоживання і зменшення довірчого інтервалу доцільно використовувати кілька альтернативних підходів для оцінки і порівняння потенційних M&V (Measurement & Verification) моделей.

У роботі [7] пропонується оцінювати моделі, використовуючи відношення очікуваної невизначеності в енергозбереженні до загальної економії. Це дозволяє варіювати критерії відповідно до найбільш значущих факторів енергоефективності.

У статтях [8, 9] досліджується використання Data Mining для прогнозування базового споживання енергії з метою підвищення точності оцінки моделі енергозбереження M&V.

Разом з розвитком технологій все більша кількість підприємств починає використовувати для покращення рівня контролю енергоспоживання Інтернет-комунікації, технології хмарних обчислень та послуги хмарного управління енергією. В роботі [10, 11] наведено результати використання послуги хмарного управління енергією. За допомогою хмарної платформи для підприємства здійснюються такі функції: оптимізація кондиціонування повітря; оптимізація системи освітлення; виявлення зайнятості та контроль часу. Це дозволяє покращити споживання електроенергії в окремих процесах. Проте технологічний процес, який суттєво відрізняється навіть на промислових підприємствах одного профілю, дуже важко оптимізувати за таким підходом. Тому розробка математичних моделей споживання електроенергії підприємством з урахуванням особливостей роботи окремих підрозділів залишається вкрай важливою як для прогнозування споживання електроенергії, так і для оцінки ефективності її використання.

Мета та завдання

Метою дослідження є вдосконалення підходів до використання математичних моделей споживання електроенергії на підприємствах. Це дасть можливість підвищення адекватності оцінювання рівня ефективності споживання електроенергії за розробленими моделями та подальшої оптимізації існуючих процесів та розробки заходів щодо підвищення ефективності споживання електроенергії.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- визначити вплив різних факторів на обсяги споживання електроенергії та визначити їх кореляцію в масштабах підприємства;
- побудувати рівняння, що описує залежність обсягів споживання електроенергії та визначених факторів, та провести аналіз параметрів адекватності оцінювання рівня ефективності споживання електроенергії.

Матеріал і результати досліджень

Функціонування систем контролю енергоефективності передбачає зіставлення фактичних енерговитрат з планованими [12, 13]. Для умов з відомими граничними значеннями параметрів x_i , y_i кожне із значень незалежної змінної x_i , а також залежної змінної y_i зіставляють з граничними значеннями цих параметрів x_{min} , x_{max} та y_{min} , y_{max} . Вибраковці (вилученню з вибірки) підлягають значення, що не задовольняють таким умовам:

$$x_{min} \leq x_i \leq x_{max}, i = 1 \dots n \quad (1)$$

$$y_{min} \leq y_i \leq y_{max}, i = 1 \dots n \quad (2)$$

Залежність $\hat{y} = f(x)$ будується на основі принципу найменших квадратів, який забезпечує мінімальне розсіяння S значень y_i навколо функції $f(x)$ [3]:

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 \quad (3)$$

Тут коефіцієнт регресії [3]

$$\beta = \frac{n \cdot \sum(x \cdot y) - (\sum x \cdot \sum y)}{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (4)$$

Значення β виражають через вибіркові дисперсії S_x , S_y та коефіцієнт кореляції r [3]:

$$\beta = r \frac{S_x}{S_y}; \quad (5)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (y_i - y_0)^2}; \quad (6)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - x_0)^2}; \quad (7)$$

$$r = \frac{\sum (x_i - x_0)(y_i - y_0)}{(n-1) \cdot S_x \cdot S_y}; \quad (8)$$

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum x_i; \quad y_0 = \frac{1}{n} \sum y_i. \quad (9)$$

Значення постійної складової отримують з рівняння

$$a = \frac{\sum y_i - \beta \sum x_i}{n}. \quad (10)$$

Згідно традиційного підходу фактичне значення енергоспоживання (параметр y) зіставляється з середнім (плановим) значенням a_y , що відповідає даному x . Якщо для x_{n+1} фактичне значення енергоспоживання y_{n+1} перевищує $a_{y(n+1)}$, то це свідчить про нераціональне використання енергії. Якщо показник фактичного енергоспоживання нижчий за середній, то це свідчить про ефективне енергоспоживання. Прогнозоване значення може бути визначено з урахуванням впровадження енергозберігаючих заходів на підприємстві [14].

При використанні наближеної залежності, що дозволяє отримати оцінку (y) істинного середнього значення a_y , будуються довірчі інтервали, всередині яких з високою довірчою ймовірністю знаходиться дійсна (точна) регресійна залежність $a_y = \varphi(x)$.

Межі довірчого інтервалу для дійсного середнього значення параметра y :

$$y_{OL} = y_0 - \frac{S_y}{\sqrt{n}} t_{1-p/2}; \quad y_{OU} = y_0 + \frac{S_y}{\sqrt{n}} t_{1-p/2}; \quad (11)$$

де $t_{(1-p)^2}$ – квантілі t -розподілу (розподіл Стьюдента).

Межі довірчого інтервалу (β' , β'') отриманої оцінки коефіцієнта регресії β [3]

$$\beta' = \beta - t_{1-p/2} \frac{S_y \sqrt{1-r}}{S_x \sqrt{n-2}}; \quad \beta'' = \beta + t_{1-p/2} \frac{S_y \sqrt{1-r}}{S_x \sqrt{n-2}}. \quad (12)$$

Значення відповідних коефіцієнтів α розраховують за відомими y_{OL} , y_{OU} , β' , β'' [15]:

$$\begin{aligned} \alpha'_1 &= y_{OL} - \beta' \bar{x}; & \alpha''_1 &= y_{OU} - \beta'' \bar{x}; \\ \alpha'_2 &= y_{OL} - \beta' \bar{x}; & \alpha''_2 &= y_{OU} - \beta'' \bar{x}; \end{aligned} \quad (13)$$

У цій області з довірчою ймовірністю $(1-p)^2$ розташована лінія дійсної регресії. З урахуванням довірчих інтервалів усі значення фактичних енерговитрат, які попадають у заштриховану область, слід розглядати як такі, що відповідають плановим показникам. Якщо показники енерговитрат виходять за межі довірчих інтервалів (за заштриховану область), то значення y_{n+1} , наприклад, свідчить про нераціональне використання енергії на контрольованому етапі (зміна, доба, тиждень), а значення y_{n+2} свідчить про раціональне використання енергії (розташоване нижче заштрихованої області). Зі збільшенням кількості дослідів заштрихована область звужується, що підвищує ефективність здійснюваного контролю.

Об'єктом дослідження є промислове підприємство з вироблення коксохімічної продукції, яке сертифіковано з стандарту енергетичного менеджменту ISO 50001.

До складу підприємства входять десять основних цехів. На рис. 1 показано енергоспоживання підприємства.

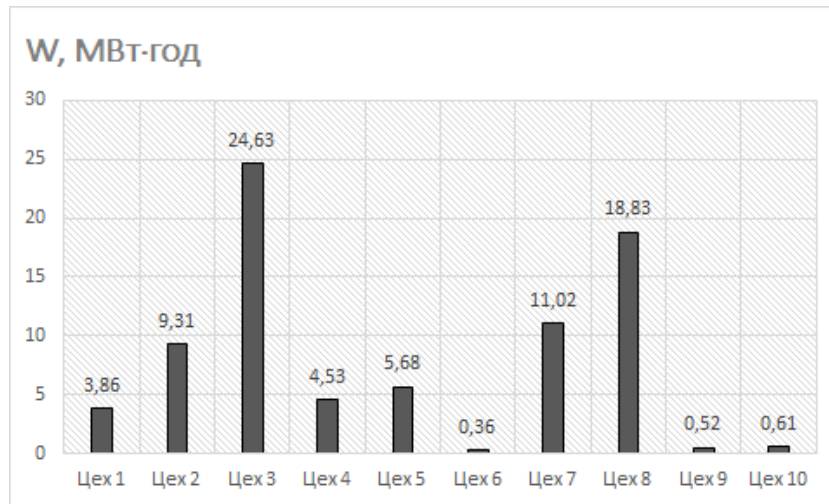


Рисунок 1 – Споживання електричної енергії цехами підприємства.

Існуюча модель споживання електроенергії, що використовується відділом головного енергетика підприємства для прогнозування споживання електроенергії та для оцінки ефективності енерговикористання, характеризується наступним рівнянням:

$$W_{Divi} = \sum_{i=1}^{10} (y_i + W_{LVwi}) \quad (14)$$

де W_{LVwi} – розрахункове споживання електроенергії на освітлення, вентиляцію, зварювальні роботи, кВт·год;

y_i – споживання електроенергії в технологічному процесі основним обладнанням, визначене за кореляційною залежністю, кВт·год;

$$y_i = b_1x_1 + \dots + b_nx_n + b_0 \quad (15)$$

При виявленні факторів, які впливають на споживання електроенергії, використовувались диференційовані питомі норми споживання, обчислені відділом головного енергетика підприємства на підставі розрахункових даних, одержуваних від енергетичних служб підрозділів. При цьому враховувалось наявне обладнання в цеху, його потужності, завантаження і час роботи для виконання заданого плану виробництва з урахуванням проведення ремонтів, ТО і впровадженням енергозберігаючих заходів. При наявності в підрозділі кількох ділянок або відділень розрахунок питомих витрат виконувався окремо для кожної ділянки або відділення.

Структуру найбільш потужних підрозділів з позначенням сумарних обсягів споживання електроенергії W_{Σ} та окремо на освітлення, вентиляцію, зварювальні роботи W_{OBC} відповідно приведеної вище методики розрахунку з вказанням вагомих факторів впливу та їх ваги приведено у табл. 1 – 2.

З табл. 1 – 2 видно, що аналіз споживання енергоресурсів окремим підрозділом на підприємстві проводиться за кожним фактором, але не враховується вплив обсягів виробництва у різних переділах поміж собою, що є основним недоліком методики, що використовується.

Враховуючи фактори, що визнані вагомими при визначенні споживання електроенергії окремими підрозділами за даними спостережень відділу головного енергетика (з урахуванням їх взаємного впливу) знайдено рівняння регресії та проведено його оцінку.

$$y = 76512 - 3,54 \cdot x_1 - 2,34 \cdot x_2 - 0,29 \cdot x_3 + 0,575 \cdot x_4, \quad (16)$$

де x_1 – виробництво коксу, т; x_2 – коксовий газ, тис. м³; x_3 – виробництво пари, Гкал; x_4 – електроенергія, МВт·год.

Результати представлено у табл. 3 - 4. Така характеристика отриманого лінійного рівняння свідчить про високу кореляцію розрахункових даних та даних, що спостерігалися.

Таблиця 1 – Споживання електроенергії цеху 3 (цех вловлювання) та вага факторів

| Показник | Маш зал | Конденсація | Сульфатне | Бензольне | СТУР | Переробка бензолу | Розділення бензолу | Аміачна колона |
|-------------------------------------|--|-------------|-----------|-----------|-----------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| W_{Σ} , тис кВт·год | 724 | 695 | 173 | 500 | 0,49 | 92 | 2,2 | 24,3 |
| W_{OBC} , тис кВт·год | 100 | 30 | 55 | 42 | - | 61 | - | 3,6 |
| Основний фактор (ОФ) | Обсяг очищення коксового газу, тис. м ³ | | | | Обсяг переробки смоли | Обсяг переробки бензолу | | Обсяг очищення води |
| Значення ОФ | 32194 | | | | 222 | 1189 | 1678 | 22456 |
| Вага ОФ | 0,245 | 0,986 | 1,059 | 0,362 | 0,698 | 0,18 | | 0,115 |
| Температура оточуючого повітря, °С | 9,8 | | | | | | | |
| Вага температури оточуючого повітря | -0,177 | -0,304 | -0,92 | -0,092 | не суттєва | | | |
| Довжина світлового дня, год. | 13,7 | | | | | | | |
| Вага довжини світлового дня | -0,029 | | | | не суттєва | | | |

Таблиця 2 – Споживання електроенергії цеху 8 (котлотурбінний цех) та вага факторів

| Показник | Котельна ділянка | Турбінна ділянка | Хімводоочищення (ХВО) | Компресорна ділянка |
|----------------------------|--|--|-------------------------|---|
| W_{Σ} , тис кВт·год | 745 | 296 | 43 | 867 |
| W_{OBC} , тис кВт·год | 25,6 | 11 | 3 | 2 |
| Основний фактор (ОФ) | Виробництво пари, Гкал | Виробництво електроенергії, тис. кВт·год | Виробництво пари, Гкал | Виробництво стиснутого повітря, тис. м ³ |
| Значення ОФ | 34070 | 2160 | 34070 | 7924 |
| Вага ОФ | 0,826 | 0,821 | 1,013 | 1,237 |
| Другорядні фактори | Кількість працюючих котлів. Кількість працюючих дугтових вентиляторів. Кількість працюючих живлячих насосів. Кількість регенерацій фільтрів ХВО. Кількість працюючих насосів ХВО. Довжина світлового дня. | Кількість днів роботи ТГ-1. Кількість днів роботи ТГ-2. Кількість працюючих вентиляторів градирень. Довжина світлового дня. | Довжина світлового дня. | Кількість працюючих компресорів. Кількість технологічних переходів компресорів. Довжина світлового дня. |

Таблиця 3 – Коефіцієнти регресії

| Коефіцієнт | Величина | Похибка | Критерій t |
|------------|-------------|----------|--------------|
| b_1 | -3,54E-03 | 2,85E-04 | -12,43321517 |
| b_2 | -2,34E-02 | 7,11E-05 | -329,2825007 |
| b_3 | -0,29315625 | 7,11E-04 | -412,1413127 |
| b_4 | 5,75E-05 | 5,69E-05 | 1,010473318 |
| b_0 | 76512 | 1,79E-02 | 2647,396561 |

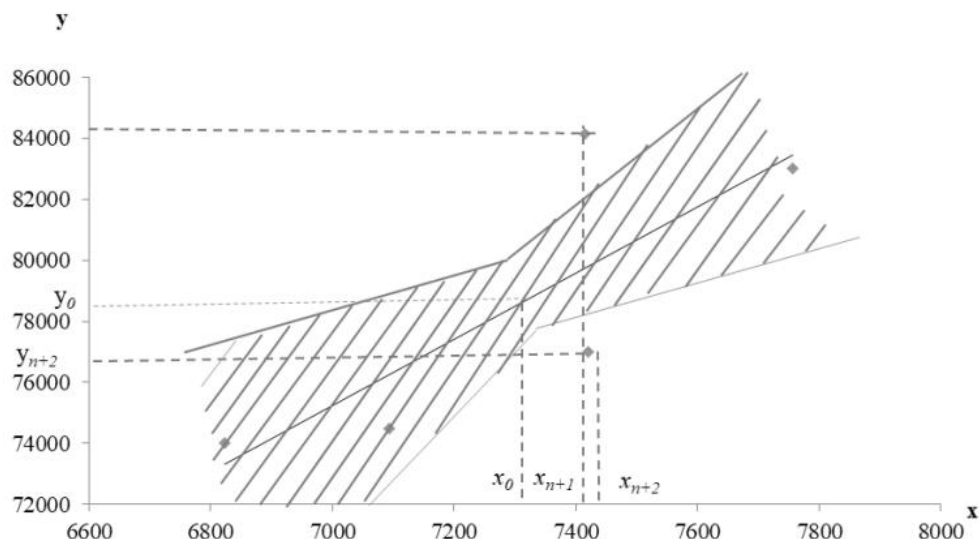


Рисунок 2 – Довірчі інтервали регресійного рівняння споживання електроенергії

Таблиця 4 – Характеристика довірчих інтервалів

| Коефіцієнт | Величина | Інтервал, % (+/-) | Нижня межа | Верхня межа |
|-----------------------|-----------|-------------------|------------|-------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 90% довірчий інтервал | | | | |
| b_1 | -3,54E-03 | 5,11E-04 | -4,05E-03 | -3,03E-03 |
| b_2 | -2,34E-02 | 1,28E-04 | -2,35E-02 | -2,33E-02 |
| b_3 | -0,293156 | 1,28E-03 | -0,294443 | -0,2918726 |
| b_4 | 5,75E-05 | 1,02E-04 | -4,47E-05 | 1,60E-04 |
| b_0 | 76512 | 3,21E-02 | 76512,308 | 76512,372 |
| 95% довірчий інтервал | | | | |
| b_1 | -3,54E-03 | 6,26E-04 | -4,16E-03 | -2,91E-03 |
| b_2 | -2,34E-02 | 1,57E-04 | -2,36E-02 | -2,33E-02 |
| b_3 | -0,2931 | 1,57E-03 | -0,2947 | -0,291 |
| b_4 | 5,75E-05 | 1,25E-04 | -6,77E-05 | 1,83E-04 |
| b_0 | 76512 | 3,94E-02 | 76512,300 | 76512,380 |
| 99% довірчий інтервал | | | | |
| b_1 | -3,54E-03 | 8,84E-04 | -4,42E-03 | -2,65E-03 |
| b_2 | -2,34E-02 | 2,21E-04 | -2,36E-02 | -2,32E-02 |
| b_3 | -0,29316 | 2,21E-03 | -0,29537 | -0,290947 |
| b_4 | 5,75E-05 | 1,77E-04 | -1,19E-04 | 2,34E-04 |
| b_0 | 76512 | 5,55E-02 | 76512,285 | 76512,396 |

Результати розрахунку у вигляді довірчих інтервалів представлено на рис. 2 та в табл. 5.

Враховуючи отриману оцінку, дану регресійну модель можна вважати адекватною. Коефіцієнт кореляції змінився з 0,937 до 0,959.

Коефіцієнт детермінації:

$$d = r^2 = \left(\frac{\sum (x_i - x_0)(y_i - y_0)}{(n-1) \cdot S_x \cdot S_y} \right)^2 = 0,921.$$

Лінія регресії за отриманою оцінкою ефективного стану споживання електроенергії показана на рис.3.

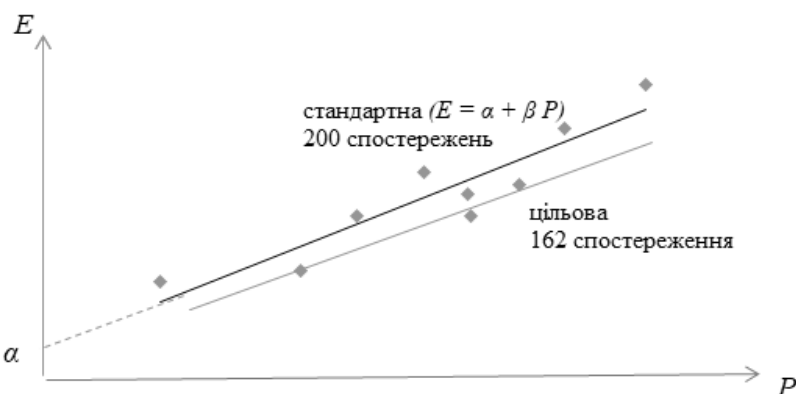


Рисунок 3 – Цільова лінія регресії загального споживання електроенергії

Таблиця 5 – Порівняння оцінки стану енерговикористання

| Оцінка стану енерговикористання | Існуючий підхід | Запропонований підхід |
|---------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Ефективний | 134 | 6 |
| Задовільний | - | 156 |
| Неефективний | 66 | 38 |

Аналіз даних табл. 5 свідчить, що при традиційному підході саме лінія регресії є межею поділу незадовільних і задовільних результатів роботи. З 200 спостережень 134 відповідають ефективному стану використання електроенергії, що майже вдвічі більше за кількість спостережень, що визнані неефективними за рівнем енерговикористання. В цілому така картина ефективності споживання електроенергії може бути визнана задовільною і не буде спонукати працівників до пошуку шляхів подальшого вдосконалення рівня ефективності споживання енергоресурсів на підприємстві. Натомість, формування довірчих інтервалів як області, усередині якої з високою ймовірністю знаходиться точне значення лінії регресії, дозволяє виділити ті спостереження, які можна фіксувати як прийнятні результати енергоспоживання. І лише вихід результатів за межі цієї області розглядається як незадовільний (значення у розташовані вище) або задовільний (розташовані нижче) результат. Таким чином, використання довірчого інтервалу дозволило виділити з 200 спостережень 156 задовільних, 38 неефективних і лише 6 ефективних за ступенем використання електроенергії.

Порівняно зі значенням коефіцієнта детермінації, отриманим за існуючою моделлю споживання електроенергії $d=0,879$, частка дисперсії споживання електроенергії, яка обумовлена зміною некерованих параметрів збільшилась, а частка дисперсії, обумовлена керованими параметрами, зменшилась. Згідно отриманих результатів система енергоменеджменту працює ефективно, і точність контролю ефективності споживання покращилась.

У випадку, якщо довірчі інтервали будуть широкими, ефективність контролю енергоспоживання знижується. При цьому велика частина експериментальних даних опиниться в заштрихованій зоні і вони розглядатимуться як такі, що задовольняють плановим показникам. Звуження області спостережатиметься при посиленні кореляційного зв'язку між залежною і незалежною змінними, а також при збільшенні кількості експериментів. Тому при побудові регресійної залежності слід звернути увагу на ширину області, що визначена довірчими інтервалами. Чим вужче ця область, тим ефективніше відбувається контроль (значна кількість результатів буде трактуватися як незадовільні або задовільні результати).

Очевидно має сенс визначити максимальну ширину цієї області, при якій можна вважати контроль ефективним. Так, пропонується визначити значення $(y_{0e} - y_{0n})/y_0$ і виразити його у відсотках. Ці значення залежної змінної у отриманні для середнього значення незалежної змінної x_0 , яка в свою чергу отримана в n експериментах. Розглядаються значення y , які відповідають середньому значенню x_0 виходячи з факту, що розсіяння змінної x відбувається в області середнього значення x_0 , причому, як уже про це згадувалося, слід чекати невелику дисперсію значень x . Тому значення енерговитрат, характерні для x_0 , відображають енерговитрати в інших експериментах.

Задаючи рівень параметра ϵ [$\epsilon = (y_{0e} - y_{0n}) \cdot 100\% / y_0$], ми тим самим визначаємо вимоги до довірчого інтервалу і, отже, до точності контролю рівня енерговитрат. Так, наприклад, якщо домагатися, щоб значення ϵ не перевищувало 10%, то це значить, що в межах значень x , близьких до x_0 , точність контролю енерговитрат, обумовлена наявністю довірчих інтервалів, приблизно складе $\pm 5\%$. Очевидно,

якщо значення ϵ буде наперед визначено, то формування регресійної залежності з необхідними довірчими інтервалами (обумовленими максимальним значенням ϵ) буде можливим тільки при проведенні певної кількості експериментів n .

Зі збільшенням n область, обмежена довірчими інтервалами, звужується. Практична реалізація цієї вимоги полягає в тому, що кількість дослідів, необхідних для побудови регресії, повинна бути такою, щоб забезпечити значення ϵ меншим, ніж вимагається. Тому побудова регресійної залежності буде пов'язана з попередньою оцінкою необхідної кількості експериментальних даних. Наведені міркування до процесу формування довірчих інтервалів справедливі і для випадку множинної регресії (з декількома незалежними змінними).

В підсумку при розподіленні результатів спостережень отримано три області, ефективного споживання, задовільного та незадовільного відповідно. Частина спостережень, що знаходилась нижче лінії регресії, і за традиційним підходом відповідала ефективному споживанню електроенергії, при запропонованому підході опиняється в межах довірчого інтервалу за рахунок комплексної оцінки споживання електроенергії окремими підрозділами промислового підприємства. Визначення цих спостережень як задовільних за рівнем ефективності споживання тим самим розширює потенціал енергозбереження і спонукає до більш детального аналізу, пошуку додаткових керованих та некерованих факторів впливу на ефективність споживання електроенергії.

Розширення періоду оцінювання без зміни кількості спостережень призводить до збільшення довірчого інтервалу. Останній можна скоротити як шляхом машинного навчання, як зазначено в [1], або використанням альтернативних M&V (Measurement & Verification) моделей [3], так і внесенням уточнюючих коефіцієнтів, що враховують кореляцію за переділами виробництва. Використання хмарних технологій [6] обґрунтоване лише для [ординарних] процесів. Тому подальше вдосконалення процесу математичних моделей споживання електроенергії доцільно розглядати в площині поєднання інтелектуального аналізу (Data Mining) даних M&V (Measurement & Verification) моделей, машинного навчання та технологій хмарних обчислень.

Висновки

Аналіз математичних моделей споживання електроенергії цеху вловлювання та котлотурбінного цеху як основних споживачів показав, що фактори, що впливають на споживання електроенергії, є некерованими, тобто за рахунок їх зміни можна досягти зниження обсягів споживання електроенергії, але не підвищення її ефективності. Основним недоліком математичних моделей споживання електроенергії, що використовуються на підприємстві для прогнозування обсягів споживання електроенергії та оцінки ефективності енерговикористання, є їх адитивність для різних підрозділів.

Існуюча математична модель споживання електроенергії на прикладі досліджуваного підприємства вдосконалена за рахунок включення енергетичного балансу утилізації коксового та димових газів, що дозволило отримати регресійну модель споживання електроенергії для оцінки зв'язку між значенням енерговитрат і параметрами, що їх визначають (обсяг виробництва коксу, коксового газу, виробництво пари, електроенергії). Коефіцієнт кореляції змінився з 0,937 до 0,959. З використанням принципів контролю енергоефективності шляхом побудови довірчих інтервалів, всередині яких з високою довірчою ймовірністю знаходиться дійсна (точна) регресійна залежність, отримано оцінку заходів з оптимізації керованих змінних у вигляді коефіцієнту детермінації d , який показує ту частку дисперсії енерговитрат, яка обумовлена зміною некерованих параметрів. Оцінка моделі споживання електроенергії за допомогою коефіцієнта детермінації змінилась з 0,879 до 0,921.

В результаті запропонованої методики оцінки споживання електричної енергії значна частина заходів змінила категорію з "ефективний" на "задовільний". Це свідчить про суттєвий потенціал підвищення енергоефективності за рахунок комплексної оцінки споживання електричної енергії окремими підрозділами промислових підприємств.

Список використаної літератури

1. Energy Management System Requirements with Guidance for Use. International Energy Agency (IEA), 2011. 50 с.
2. SO 50004:2016 (ISO 50004:2014, IDT). Energy management systems. Implementation, Maintenance and Improvement Guide of energy management systems.
3. Системи енергоменеджменту та їх математичне забезпечення : навч. посіб. (Електроний ресурс)/ Г.Г.Півняк, С.І.Випанасенко, О.І.Хованська, Ю.В.Хацкевич; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Державний ВНЗ "Національний гірничий ун-т".- Д.: НГУ, 2013. 214 с.

4. N. Oses, A. Legarretaetxebarria, M. Quartulli, I. García, M. Serrano. Uncertainty reduction in measuring and verification of energy savings by statistical learning in manufacturing environments. *International Journal for Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2016. №10. pp. 291–299. <https://doi.org/10.1007/s12008-016-0302-y>
5. W. Booyesen, W. Hamer and H. Joubert. A simplified methodology for baseline model evaluation and comparison. 2016 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE). 2016. pp. 200-207.
6. G. E. Mathews, W. Hamer, W. Booyesen, J. C. Vosloo and E. H. Mathews. The case for multiple models and methods of verification in the measurement & verification of energy efficiency projects. 2016 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE). 2016, pp. 221-226.
7. A. Reddy, D. Claridge. Uncertainty of “Measured” Energy Savings from Statistical Baseline Models. *HVAC&R Research*. 2000. Vol. 6. pp. 3 – 20. <https://doi.org/10.1080/10789669.2000.10391247>.
8. C. Gallagher, K. Bruton and D. O’Sullivan. Utilising the Cross Industry Standard Process for Data Mining to reduce uncertainty in the Measurement and Verification of energy savings in Tan Y. and Shi Y. (eds.) *Data Mining and Big Data - DMBD 2016*. Indonesia: Bali, 25-30 June 2016. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 9714. Springer International Publishing AG. doi:10.1007/978-3-319-40973-3_5.
9. O. T. Adenuga, K. M. M. Mpofu, R. I. Boitumelo. Energy efficiency analysis modelling system for manufacturing in the context of industry 4.0. *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 80. pp. 735-740. ISSN 2212-8271. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.002>.
10. Y-C. Tseng, D. Lee, C-F. Lin, C-Y. Chang. The Energy Savings and Environmental Benefits for Small and Medium Enterprises by Cloud Energy Management System. *Sustainability*. 2016. Vol. 8(6). 531. <https://doi.org/10.3390/su8060531>.
11. R. Vieira, R. Calili, A. Aranha, L. Fabbriani. Energy Savings Resulting from Energy Management Program Using Measurement and Verification Procedure. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. 1044. 012028. 10.1088/1742-6596/1044/1/012028.
12. ISO 50006:2016 (ISO 50006:2014, IDT). Energy management systems. Measuring the level of achieved / achievable energy efficiency using basic levels of energy consumption and energy efficiency indicators. General provisions and guidelines.
13. ISO 50015:2016 (ISO 50015:2014, IDT). Energy management systems. Measurement and verification of the level of achieved/achievable energy efficiency of organizations. General principles and guidance.
14. Ю. Г. Качан, К. О. Братковська. Оцінка доцільності застосування прогресивних норм питомого енергоспоживання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. Київ, 2008. №1. С. 93 - 96.
15. В. П. Калинчик, В. П. Розен, А. И. Соловей, А.-М. М. Танский. *Графические методы обработки информации: учеб. пособие*. Киев : Кондор, 2007. 104 с.

K. Bratkovska, Cand. Sc. (Econ.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2091-9623

A. Shram, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4206-7716

National University Zaporizhzhia Polytechnic

COMPLEX ESTIMATION OF THE POWER CONSUMPTION EFFICIENCY IN INDUSTRY

The peculiarities of mathematical models' application of electricity consumption for estimation of energy use efficiency in enterprises which provides operation of energy efficiency control systems by comparing actual energy consumption with planned ones are analyzed. Differentiated unit consumption rates were calculated by the chief power engineer's department of the enterprise based on calculated data received from the energy services of the divisions. These rates were used to identify factors that affect electricity consumption. At the same time, the existing equipment in the workshop, its capacity, load and working time were taken into account to fulfill the given production plan, including account repairs, maintenance and the implementation of energy-saving measures. It is determined that in the analysis of energy consumption by individual divisions of the enterprise for each factor enterprises do not always take into account the interconnection of processes taking place in different departments, and as a result, the effectiveness of using mathematical models for both forecasting electricity consumption and assessing consumption efficiency is reduced. Taking into account the factors that are considered as important in determining the electricity consumption of individual units according to the observations of the Department of Chief Energy (taking into account their mutual influence), the regression equation was found and evaluated. It was established that the use of refined mathematical models with a narrowed confidence interval expands the potential for energy saving of the enterprise and prompts a more detailed analysis, the search for additional controlled and uncontrolled factors of influence on the efficiency of electricity consumption.

An analysis of mathematical models of power consumption of the catching workshop and the boiler turbine workshop as the main consumers showed that the factors affecting electricity consumption are uncontrolled. By changing them it is possible to achieve a decrease in electricity consumption, but not an increase in its efficiency.

The main disadvantage of mathematical models of electricity consumption used in the enterprise to forecast the volume of electricity consumption and estimate the efficiency of energy use is their additivity for various departments. It resulted in a regression model of electricity consumption to estimate the relationship between the energy consumption value and their defining parameters (coke production, coke gas, steam production, electricity). The estimation of the electricity consumption model, using the coefficient of determination, has done.

Keywords: power consumption, regression model, efficiency, energy saving, confidence interval

REFERENCES

1. Energy Management System Requirements with Guidance for Use // International Energy Agency (IEA), 2011. 50p.
2. ISO 50004:2016 (ISO 50004:2014, IDT). Energy management systems. Implementation, Maintenance and Improvement Guide of energy management systems.
3. H.H. Pivniak, S.U. Vypanasenko, O.I. Khovanska, Yu.V. Khatskevych, N.S. Dreshpak, "Energy management systems and their mathematical support: tutorial," Dnipro: National Mining University, 2013. 214 p.
4. N. Oses, A. Legarretaetxebarria, M. Quartulli, I. García, M. Serrano, "Uncertainty reduction in measuring and verification of energy savings by statistical learning in manufacturing environments," *Int J Interact Des Manuf* 10, pp. 291–299, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12008-016-0302-y>
5. W. Booyesen, W. Hamer and H. Joubert, "A simplified methodology for baseline model evaluation and comparison," 2016 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 2016, pp. 200-207.
6. G. E. Mathews, W. Hamer, W. Booyesen, J. C. Vosloo and E. H. Mathews, "The case for multiple models and methods of verification in the measurement & verification of energy efficiency projects," 2016 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 2016, pp. 221-226.
7. A. Reddy, D. Claridge. "Uncertainty of "Measured" Energy Savings from Statistical Baseline Models," *HVAC&R Research*, vol. 6, pp. 3 – 20, January 2000. <https://doi.org/10.1080/10789669.2000.10391247>.
8. C. Gallagher, K. Bruton and D. O'Sullivan, "Utilising the Cross Industry Standard Process for Data Mining to reduce uncertainty in the Measurement and Verification of energy savings", in Tan Y. and Shi Y. (eds.) *Data Mining and Big Data - DMBD 2016*, Bali, Indonesia, 25-30 June 2016. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9714. Springer International Publishing AG. doi:10.1007/978-3-319-40973-3_5.
9. T. Adenuga, K.Mpofu, R.I.Boitumelo, "Energy efficiency analysis modelling system for manufacturing in the context of industry 4.0," *Procedia CIRP*, vol. 80, 2019, pp. 735-740, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.002>.
10. Y-C. Tseng, D. Lee, C-F. Lin, C-Y. Chang, "The Energy Savings and Environmental Benefits for Small and Medium Enterprises by Cloud Energy Management System," *Sustainability*, 201, 8(6):531. <https://doi.org/10.3390/su8060531>.
11. R. Vieira, R. Calili, A. Aranha, L. Fabbriani, "Energy Savings Resulting from Energy Management Program Using Measurement and Verification Procedure," *Journal of Physics: Conference Series*, 1044, 2018, 012028. [10.1088/1742-6596/1044/1/012028](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1044/1/012028).
12. ISO 50006:2016 (ISO 50006:2014, IDT). Energy management systems. Measuring the level of achieved / achievable energy efficiency using basic levels of energy consumption and energy efficiency indicators. General provisions and guidelines.
13. ISO 50015:2016 (ISO 50015:2014, IDT). Energy management systems. Measurement and verification of the level of achieved/achievable energy efficiency of organizations. General principles and guidance.
14. Yu.H. Kachan, K.O. Bratkovska, "Assessment of the feasibility of applying progressive norms of specific energy consumption," *Scientific Journal: "Energy: economics, technology, ecology"*, vol. 1, pp. 93 - 96, 2008.
15. V.P. Kalynchyk, V.P. Rozen, A.Y. Solovei, "Energy Management Graphical Information Processing Methods: tutorial," Kyiv: Kondor, 2007. 104 p.

Надійшла 13.11.2021

Received 13.11.2021