УДК 004.9:621.31

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА НА ОСНОВІ ДАНИХ СЕНСОРІВ

Чернов Р. А.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Україна, Миколаїв
251247@nuos.edu.ua

Анотація. *У роботі розглянуто задачу підвищення енергоефективності промислового підприємства ПрАТ «Промтех-Миколаїв» шляхом створення інформаційної системи прогнозування та оптимізації навантаження. Розроблено архітектуру модульного моноліту на базі мови Go та СУБД PostgreSQL, а також аналітичний модуль на мові Python. Експериментально доведено, що використання лінійної регресії з часовими лагами забезпечує високу точність прогнозування (MAPE < 3%), а впровадження алгоритмів зрізання піків знижує максимальну споживану потужність на 12.4%.*
Ключові слова: *енергоспоживання; часові ряди; прогнозування; лінійна регресія; інтернет речей; оптимізація навантаження.*

Вступна частина. У сучасних умовах функціонування промислового сектору України раціональне використання енергетичних ресурсів є критичним фактором забезпечення економічної конкурентоспроможності підприємств. Традиційні підходи до енергоменеджменту, засновані на фрагментарному ручному зборі даних та реактивній фіксації минулих показників, не дозволяють оперативно реагувати на динамічні зміни навантажень. Відсутність прогнозної аналітики призводить до пікових перевантажень та фінансових санкцій за перевищення лімітів потужності. Впровадження промислового Інтернету речей (IIoT) і платформ часових рядів [1] створює базу для проактивного управління енергосистемами.

Метою дослідження є підвищення ефективності управління енергетичними ресурсами промислового підприємства ПрАТ «Промтех-Миколаїв» шляхом розробки та апробації комплексних методів та засобів автоматизованого збору телеметрії, короткострокового прогнозування навантаження та формування рекомендацій щодо оптимізації режимів роботи цехового обладнання.

Основна частина. Для усунення фрагментації інформаційних потоків у роботі запропоновано архітектуру клієнт-серверної системи у вигляді модульного моноліту «ЕнергоОптим». Периферійний рівень (IoT Edge) базується на вимірювальних датчиках та цехових шлюзах, які здійснюють високошвидкісний збір телеметричних даних (активна потужність, струм, напруга, коефіцієнт потужності) за промисловим протоколом Modbus RTU (інтерфейс RS-485). Серверна частина системи реалізована високоефективною мовою програмування Go із застосуванням чистої архітектури (Clean Architecture). Для стабільного приймання безперервних потоків телеметрії під навантаженням налаштовано пул з'єднань pgxpool з реляційною СКБД PostgreSQL [2].

Аналітичне ядро системи розгорнуто як відокремлений сервіс мовою Python. Алгоритм обчислювального ядра реалізує згладжування випадкових інженерних шумів датчиків за допомогою ковзного середнього (Moving Average) [1]:

$$MA_t = (y_t + y_(t-1) + \ldots + y_(t-k+1)) / k$$

Короткостроковий прогноз на інтервал t+1 (15 хв) [3] будується регресійною моделлю на основі лагових ознак. Для підтримки прийняття рішень використано порогове спрацювання за умовою перевищення ліміту підприємства:

$$y_(t+1) > P_max$$

У разі фіксації ризику перевищення ліміту модуль підтримки прийняття рішень динамічно генерує рекомендацію для інженера-енергетика щодо необхідності зміщення графіка запуску енергоємних агрегатів (наприклад, електропечей дільниці термічної обробки). Для апробації розроблених методів проведено експериментальне дослідження на реальному масиві телеметрії ПрАТ «Промтех-Миколаїв» обсягом N = 2880 спостережень. За результатами тестування, модель лінійної регресії з часовими лагами продемонструвала високу точність: середня абсолютна відсоткова похибка (MAPE) склала 2.91%, а середня абсолютна похибка (MAE) — 6.12 кВт, що у 2.3 рази краще за показники базових статистичних моделей згладжування. Моделювання процесів оптимізації показало, що завчасне виконання рекомендацій системи дозволяє повністю нівелювати штрафні перевантаження та знизити максимальну споживану потужність у години пік на 12.4%. Техніко-економічний розрахунок підтвердив, що за капітальних витрат на розробку у розмірі 327 700 грн чистий річний прибуток від енергозбереження становить 1 635 000 грн, що забезпечує повну окупність проекту за 2.4 місяці промислової експлуатації.

Висновки. Апробація на даних ПрАТ «Промтех-Миколаїв» підтверджує високу точність предиктивного ядра (MAPE < 3%) та вагомий фінансовий ефект від реалізації стратегії Peak Shaving. В подальшому планується розширювати функціонал засобу, додаючи підтримку прогнозування на основі рекурентних нейромереж (LSTM) та інтеграцію з корпоративними ERP-системами підприємства.

Використання інструментів ШІ. Під час підготовки матеріалів доповіді використано мовну модель Google Gemini 1.5 Pro для оптимізації структури модульних тестів на мові Go, стилістичного редагування тексту за вимогами академічного стилю та перекладу блоку інформації англійською мовою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Montgomery, D. C., Jennings, C. L., & Kulahci, M. (2015). *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
[2] Silberschatz, A., Korth, H. F., & Sudarshan, S. (2019). *Database System Concepts* (7th ed.). McGraw-Hill Education.
[3] Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and Practice* (3rd ed.). OTexts. otexts.com

Chernov R. A.

Investigation and development of an information system for predicting and optimizing enterprise energy consumption based on sensor data

Abstract. *The paper considers the problem of improving the energy efficiency of an industrial enterprise "Promtech-Mykolaiv" JSC by creating an information system for load forecasting and optimization. The architecture of a modular monolith based on the Go language and the PostgreSQL DBMS, as well as an analytical module in Python, has been developed. It has been experimentally proven that using linear regression with time lags ensures high forecasting accuracy (MAPE < 3%), and the implementation of peak shaving algorithms reduces the maximum power consumption during peak hours by 12.4%.*

Keywords: *energy consumption; time series; forecasting; linear regression; Industrial IoT; load optimization.*