

УДК 681.5:004.8:697

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ БУДІВЛІ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ

Гук П. М., Барандич К. С.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: huk.p.m.-pb51f@edu.kpi.ua, barandichk@ukr.net

Будівельний сектор споживає близько 32 % глобального кінцевого енергоспоживання та формує 34 % енергетичних викидів CO₂ [1]. Для України проблема оптимізації енергоспоживання набуває особливої гостроти через функціонування об'єднаної енергосистеми (ОЕС) в умовах структурного дефіциту генерації та застосування графіків погодинних відключень (ГПВ) — на відміну від графіків аварійних відключень (ГАВ), що вводяться оперативно, та графіків обмеження споживання електричної потужності (ГОП) для промислових споживачів, ГПВ запроваджуються із попереднім сповіщенням і докорінно змінюють статистичну структуру енергоспоживання [2].

Класичні системи керування будівлями (Building Energy Management Systems — BEMS) на базі ПІД-регуляторів та статистичних моделей (ARIMA, SARIMA) ґрунтуються на припущенні стабільності параметрів моделі у часі; ГПВ спричиняють структурні розриви та детерміновані інтервенції, для яких потрібні моделі з режимним перемиканням, ARIMAX/SARIMAX із функціями втручання або нелінійні архітектури глибокого навчання, здатні упереджувально реагувати на зміну режимів роботи мережі.

У роботі запропоновано автоматизовану систему керування, яка поєднує гібридну нейромережеву модель прогнозування навантаження з модельно-прогнозним керуванням (Model Predictive Control — MPC) інженерними підсистемами. На відміну від [2], де глибоке прогнозування застосовується на системному рівні небалансів ОЕС, у цій роботі споріднені ідеї перенесено на рівень окремої будівлі та доповнено двома елементами: моделюванням невизначеності моменту фактичного застосування ГПВ і врахуванням ефекту холодного підхоплення навантаження (Cold Load Pick-up, CLPU) — одночасного ввімкнення термостатично керованих навантажень (систем мікроклімату, водонагрівачів, холодильної техніки) внаслідок втрати їх статистичного різночасся (load diversity) під час знеструмлення.

Ядром алгоритмічного забезпечення є гібридна архітектура CNN-LSTM. Одновимірні згорткові шари (1D-CNN) виконують виділення локальних ознак із потоків телеметрії IoT-сенсорів, а шари довгої короткочасної пам'яті (LSTM) моделюють часову динаміку енергоспоживання, у тому числі ефекти теплової інерції огорожувальних конструкцій. Канонічна форма стану комірки LSTM із воротами забування у момент часу t описується системою з шести рекурсивних

рівнянь, що відповідають канонічній архітектурі LSTM, у якій базова комірка [3] доповнена воротами забування згідно з [4]:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (1)$$

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (2)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C) \quad (3)$$

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t \quad (4)$$

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (5)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(C_t) \quad (6)$$

де f_t, i_t, o_t — сигнали воріт забування (forget gate), входу та виходу відповідно; $\tilde{C}_t$ — проміжний стан-кандидат; C_t — стан комірки (довготривала пам'ять); h_t — прихований стан; x_t — вектор екзогенних факторів (температура, інсоляція, стан ГПВ); h_{t-1} — прихований стан попереднього кроку; W_f, W_i, W_C, W_o — матриці ваг; b_f, b_i, b_C, b_o — вектори зміщень для відповідних воріт; σ — сигмоїдальна функція; $\tanh$ — гіперболічний тангенс; $\odot$ — поелементне множення Адамара.

Отриманий прогноз передається на вхід блоку MPC, який на горизонті передбачення H розв'язує задачу оптимізації балансу «комфорт – енергія»:

$$\min_{u_0, \dots, u_{H-1}} J = \sum_{k=0}^{H-1} [\alpha(T_k - T_{\text{set}})^2 + \beta_k P_k(u_k) + \gamma(\Delta u_k)^2] \quad (7)$$

$$T_{\min} \leq T_k \leq T_{\max}, u_{\min} \leq u_k \leq u_{\max} \quad (8)$$

де T_k — прогнозована температура зони на кроці k , що обчислюється з лінеаризованої теплової моделі будівлі (RC-моделі); T_{set} — задане комфортне значення; $P_k(u_k)$ — потужність, спожита системою (припущення лінійності, що є стандартним спрощенням за умови відносно сталого коефіцієнта продуктивності COP HVAC-обладнання у робочому діапазоні температур); Δu_k — приріст керування; α, β_k, γ — вагові коефіцієнти балансу комфорту, енергоспоживання та плавності керування, при цьому β_k є часозалежним і посилюється у години, що передують прогнозованому ГПВ; u_k — шукана послідовність керувань (відкриття клапанів, швидкості вентиляторів); $T_{\min}, T_{\max}$ — нормативні межі теплового комфорту згідно з EN 16798-1:2019 — Module M1-6 (перегляд CEN/TC 156, 2024–2026). Завдяки зазначеній математичній постановці система здійснює упереджувальне керування, забезпечуючи зсув пікового навантаження (*peak load shifting*) та превентивне зниження споживання (*preemptive load curtailment*) перед настанням ГПВ.

Для верифікації адекватності моделі передбачається застосування методів пояснюваного штучного інтелекту (XAI) — SHAP, що декомпозує прогноз і кількісно оцінює внесок кожної ознаки. Систему запропоновано будувати за розподіленою ієрархічною топологією, що поєднує дві незалежні архітектурні вимоги: периферійні обчислення (Edge Computing) — локалізацію алгоритмів

керування на стороні будівлі без залежності від хмарних сервісів — та підтримку навмисного острівного режиму електроживлення (intentional island mode за IEEE Std 1547.4-2011, із виконанням вимог захисту від ненавмисного острова згідно з IEEE Std 1547-2018) у разі повного відключення зовнішньої мережі, що забезпечує функціонування критичної інфраструктури.

Теоретичний прогноз на основі літературних даних дає підстави очікувати, що гібридна модель CNN-LSTM, оптимізована метаевристичним алгоритмом Sparrow Search Algorithm (SSA), забезпечить істотно вищу точність прогнозування навантаження порівняно з простим LSTM [5], а інтеграція прогнозу в контур MPC дасть змогу знизити енергоспоживання та підвищити тепловий комфорт у будівлі [6].

Ключові слова: прогнозування навантаження, BEMS, CNN-LSTM, MPC, графіки погодинних відключень, CLPU, XAI.

Література

- [1] United Nations Environment Programme and Global Alliance for Buildings and Construction, “Global status report for buildings and construction 2024/2025: Not just another brick in the wall,” UNEP and GlobalABC, Nairobi, Kenya / Paris, France, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://globalabc.org/resources/publications/global-status-report-buildings-and-construction-20242025-not-just-another>
- [2] I. Blinov, I. Zaitsev, M. Bajaj, V. Miroshnyk, V. Sychova, P. Shymaniuk, V. Blazek, and L. Prokop, “Advanced long short-term memory-based forecasting of electricity imbalances in the Ukrainian power system: Enhancing accuracy and stability with comparative model analysis,” *Energy Explor. Exploit.*, OnlineFirst, Jul. 23, 2025, doi: 10.1177/01445987251360272.
- [3] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, “Long short-term memory,” *Neural Comput.*, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, Nov. 1997, doi: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
- [4] F. A. Gers, J. Schmidhuber, and F. Cummins, “Learning to forget: Continual prediction with LSTM,” *Neural Comput.*, vol. 12, no. 10, pp. 2451–2471, Oct. 2000, doi: 10.1162/089976600300015015.
- [5] Y. Wang, Y. Hao, B. Zhang, and N. Zhang, “Short-term power load forecasting using SSA-CNN-LSTM method,” *Syst. Sci. Control Eng.*, vol. 12, no. 1, May 2024, Art. no. 2343297, doi: 10.1080/21642583.2024.2343297.
- [6] J. Drgoňa, D. Picard, and L. Helsen, “Cloud-based implementation of white-box model predictive control for a GEOTABS office building: A field test demonstration,” *J. Process Control*, vol. 88, pp. 63–77, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jprocont.2020.02.007.

UDC 519.2(075.8)

CLASSIFICATION AND PATTERN RECOGNITION IN MODELING PRODUCTION PROCESSES AND SYSTEMS

Sergii Vysloukh, Oksana Voloshko

*¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine*

E-mail: vsp1@ukr.net, voloshko_o@ukr.net

Modern instrument and machine-making production is multi-series, multi-nomenclature with frequent changes in manufactured products. The products