

Підходи до інтеграції нейронних мереж у MATLAB для задач моделювання теплонасосних установок

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.021>

Володимир Волощук

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського"
Київ, Україна
Vl.Volodya@gmail.com

Микола Богза

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського"
Київ, Україна
n.bohza@gmail.com

Анотація – У статті розглянуто інтеграцію нейронних мереж для моделювання теплонасосних установок у MATLAB Simulink. Використано модель LSTM для прогнозування параметрів роботи ТНУ. Порівняно методи інтеграції через S-функції та DLL, що забезпечило високу швидкість і точність моделювання.

Ключові слова— нейронні мережі, LSTM, ТНУ, MATLAB Simulink, S-функція, DLL.

I. ВСТУП

Аналіз представлених статей показує, що різні підходи до моделювання теплових насосів за допомогою нейронних мереж у MATLAB Simulink мають спільну мету — підвищити точність та ефективність прогнозування енергоспоживання і продуктивності систем. У дослідженні [1] основний акцент зроблено на використанні багатопередового перцептрона (MLP) для моделювання параметрів теплонасосної установки з холодоагентом R134a, що забезпечило високу точність прогнозування коефіцієнта корисної дії (COP). Стаття [2] розширює цей підхід на систему теплових насосів на базі ґрунтових джерел тепла (GSHP), використовуючи модель NARX, яка показала найкращі результати серед розглянутих підходів, підтверджуючи переваги нейронних мереж для складних систем.

Інші дослідження також фокусуються на використанні нейронних мереж для точного моделювання енергоспоживання та продуктивності охолоджувальних систем. У статтях [3], [4] і [5] описані успішні приклади застосування нейронних мереж для прогнозування параметрів роботи компресорів у системах охолодження на основі CO₂. Особливо варто зазначити, що в обох дослідженнях використано алгоритм Adam для навчання моделей, що дозволило досягти високої точності та ефективності. Спільною рисою цих досліджень є інтеграція моделей у Simulink для оптимізації управління реальними системами, що демонструє високий потенціал нейронних мереж у покращенні енергоефективності.

Необхідність швидкого та точного моделювання теплонасосних установок (ТНУ) стає особливо актуальною на фоні підвищеного попиту на системи відновлюваної енергетики. Інтеграція нейронних мереж у середовище MATLAB Simulink дозволяє вирішити ці завдання завдяки точному прогнозуванню та ефективному управлінню динамічними системами.

Мета роботи — запропонувати методи та засоби інтеграції нейронних моделей у MATLAB для дослідження роботи ТНУ та проаналізувати їх ефективність. Особливу увагу буде приділено порівнянню точності та швидкості обчислень різних моделей.

II. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Теплонасосні установки (ТНУ) відіграють важливу роль у сучасних системах відновлювальної енергетики, забезпечуючи ефективне використання енергії системами теплозабезпечення. Сучасні дослідження вказують на необхідність оптимізації роботи ТНУ з метою підвищення їхньої продуктивності та зниження енергоспоживання. Для досягнення цієї мети ключовим аспектом є точне моделювання динамічних процесів у ТНУ, яке дозволяє прогнозувати їхню роботу в різних умовах. Нейронні мережі, завдяки своїй здатності швидко обробляти нелінійні процеси, стають ефективним інструментом для таких завдань, особливо при інтеграції їх у середовище MATLAB Simulink.

У процесі розробки нейронної моделі для теплового насоса було використано Python та бібліотеку TensorFlow. Основне завдання полягало в тому, щоб створити модель, здатну прогнозувати роботу теплового насоса в умовах змінних теплових навантажень. Для цього було обрано рекурентну нейронну мережу на основі LSTM (Long Short-Term Memory), оскільки вона ефективно обробляє послідовні дані та враховує залежності між історичними значеннями.

Модель була створена з використанням п'яти попередніх значень основних параметрів теплового насоса, таких як температури на виході та вході конденсатора, а також масова витрата теплоносія.

Для оптимізації процесу навчання використовувався алгоритм Adam, а функцією втрат було обрано середньоквадратичну помилку (MSE), що дозволяє мінімізувати різницю між прогнозованими та фактичними значеннями. Після проведення процесу тренування модель показала високі результати точності прогнозування, що підтверджує її ефективність для моделювання складних динамічних систем, таких як теплові насоси[6, 7, 8]

Важливим етапом була конвертація отриманої моделі на мову C за допомогою бібліотеки keras2c. Цей інструмент дозволяє перетворити модель TensorFlow у код на мові C, який може бути інтегрований у MATLAB та Simulink. Конвертація включала створення трьох основних C-файлів: для обробки шарів нейронної мережі, для виконання передбачень та для ініціалізації параметрів[9].

Наступний етап включав два шляхи інтеграції отриманої моделі в середовище MATLAB. Перший шлях передбачав компіляцію цього коду як DLL-бібліотеки для використання у .m-файлах MATLAB(зображено на рис. 1). Це дало можливість викликати модель з MATLAB-сценаріїв для подальших обчислень та аналізу даних. DLL-бібліотека забезпечила просту інтеграцію та швидке виконання обчислень у MATLAB, дозволяючи автоматизувати процеси моделювання без необхідності перетворення коду вручну.

```

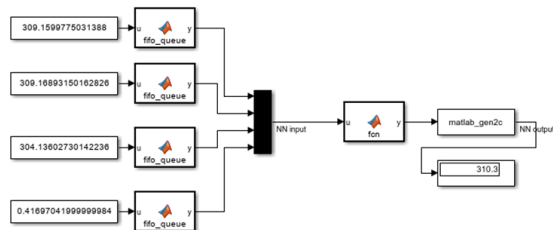
% Завантажуємо бібліотеку
loadlibrary(dllPath, headerPath);

T_CD_c_out_setpoint = single([309.1652951031354, 309.1639657031362, 309.162636303137
T_CD_cond_c_out = single([309.17425150162586, 309.17292140162647, 309.17159140162704
T_CD_c_in = single([304.1398611014256, 304.1389026014248, 304.13794410142395, 304.13
m_CD_c = single([0.41697041999999984, 0.41697041999999984, 0.41697041999999984, 0.41

% Викликаємо dll-функцію
result = calllib('generator_dll', 'gen2c', T_CD_c_out_setpoint, ...
T_CD_cond_c_out, T_CD_c_in, m_CD_c);
result
    
```

Рисунк 1. Використання бібліотеки нейронної моделі в Matlab.

Другий шлях полягав у написанні мех-файлу з S-функцією для інтеграції моделі у Simulink (зображено на рис. 2). Використання мех-файлу дало можливість виконувати код на мові C безпосередньо в середовищі Simulink, що забезпечило моделювання роботи ТНУ в реальному часі. Це рішення було оптимальним для задач динамічного моделювання, оскільки S-функція забезпечує високу продуктивність і швидкість обчислень під час симуляції.



Рисунк 2. Використання S-блоку нейронної моделі в Simulink

Такий підхід дозволив поєднати гнучкість і точність нейронних моделей з потужними інструментами MATLAB Simulink, забезпечуючи

ефективне та швидке моделювання теплових процесів.

ТАБЛИЦЯ І. Результати тестування моделей

10000 ітерацій	Оригінальна модель	Модель на C	Matlab модель в dll	Simulink модель в S-Function
RMSE, K	1.735089e-03	1.735122e-03	1.735122e-03	1.735122e-03
Середній час на ітерацію, сек.	8.45e-02	7.85e-06	7.25e-05	5.2e-05

Аналіз результатів, представлених у таблиці 1, показує, що всі чотири варіанти моделей: оригінальна модель на Python, модель на C, а також інтеграції через DLL і S-функції в MATLAB/Simulink, — забезпечують майже однакову точність моделювання (близько 1.735122e-03 K). Тобто перехід між різними середовищами та мовами програмування не погіршив точність передбачень моделей, а використання нейронної мережі зберігає високу точність незалежно від обраної платформи.

Щодо швидкості обчислень, різниця між моделями стає більш очевидною. Оригінальна модель на Python демонструє найбільший час на одну ітерацію (8.45e-02 с), що можна пояснити обмеженнями інтерпретованої мови Python. Значне зниження часу спостерігається при використанні моделі, трансформованої у код на мові C (7.85e-06 с). Цей результат свідчить про ефективність конвертації та оптимізації виконання коду. Моделі, реалізовані у MATLAB через DLL (7.25e-05 с) та S-функції в Simulink (5.2e-05 с), також показали покращену продуктивність порівняно з оригінальною моделлю.

III. ВИСНОВКИ

Розглянуто підходи інтеграції нейронної моделі ТНУ в середовище Matlab Simulink з метою забезпечення високої швидкості та точності реалізації. Найкращий результат досягається при використанні моделі на C, що робить її найбільш ефективною для вирішення завдань, які вимагають значних обчислювальних ресурсів. З точки зору інтеграції нейронної мережі в MATLAB та Simulink для моделювання складних систем в реальному часі, використання S-функцій є ефективним рішенням, оскільки це дає можливість поєднати високу продуктивність та простоту інтеграції в дане середовище.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Bahadir Erman Yuce. Bitlis Eren University Journal of Science and Technology. 2020. №10(2). С.84–87. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.058.
- [2] Ahmet Kose, Eduard Petlenkov. System Identification Models and Using Neural Networks for Ground Source Heat Pump with Ground Temperature Modeling. 2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). 2016. С.2850–2855. DOI: 10.1109/IJCNN.2016.7727676.
- [3] Sven Myrdahl Opalic, Morten Goodwin, Lei Jiao, Henrik Kofoed Nielsen, Angel Alvarez Pardinias, Armin Hafner, Mohan Lal Kolhe. ANN Modelling of CO2 Refrigerant Cooling System COP in a Smart Warehouse. Journal of Cleaner Production. 2020. №260. С. 120887. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120887.

Modeling, control and information technologies – 2024

- [4] Sven Myrdahl Opalic, Morten Goodwin, Lei Jiao, Henrik Kofoed Nielsen, Mohan Lal Kolhe. Modelling of Compressors in an Industrial CO₂-Based Operational Cooling System Using ANN for Energy Management Purposes. In: J. Macintyre et al. (Eds.), *Engineering Applications of Neural Networks, Communications in Computer and Information Science*, vol 1000. Springer, Cham. 2019. С. 43–54. DOI: 10.1007/978-3-030-20257-6_4..
- [5] Jun Kwon Hwang, Geun Young Yun, Suk Ho Lee, Hyeongjoon Seo, Mat Santamouris. Using Deep Learning Approaches with Variable Selection Process to Predict the Energy Performance of a Heating and Cooling System. *Renewable Energy*. 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.113.
- [6] Волошук В. А., Шиндилюк П. В., Некрашевич О. В., Богза М. С., Гікало П. В. Дослідження динамічних характеристик теплонасосної установки типу «повітря-вода». Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Т. 34. № 73. С. 36-44. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.3.2/07.
- [7] Волошук В. А., Шиндилюк П. В., Некрашевич О. В., Богза М. С., Гікало П. В. Дослідження динамічних характеристик теплонасосної установки типу «вода-вода». Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Т. 34. № 2. С. 36-44. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.3.2/07.
- [8] Богза М. С., Волошук В. А. Застосування методів машинного навчання у задачах моделювання динаміки теплонасосних установок. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Т. 35. № 4. С. 52-58. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.4/09.
- [9] Rory Conlin, Keith Erickson, Joseph Abbate, Egemen Kolemen. Keras2c: A Library for Converting Keras Neural Networks to Real-Time Compatible C. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2021. №100. С. 104182. DOI: 10.1016/j.engappai.2021.104182.