

МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДИНКУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

Анотація. У статті представлено динамічну модель системи теплозабезпечення будинку на основі теплонасосної установки (ТНУ), розроблену в середовищі MATLAB Simulink із використанням блоків Simscape для моделювання теплових процесів. Актуальність дослідження підкреслюється необхідністю скорочення використання викопного палива, що підвищило попит на енергоефективні технології та системи, засновані на відновлюваних джерелах енергії. Оптимізація таких систем є критично важливим завданням у контексті глобальних зусиль щодо підвищення енергоефективності будівель.

Модель враховує конструктивні особливості будинку, зокрема матеріали огорожувальних конструкцій, та їх теплотехнічні характеристики. Враховано динаміку зміни таких зовнішніх факторів як температура навколишнього середовища та сонячна активність. Погодинні погодно-кліматичні дані для міста Києва, які використані в моделі, дають можливість дослідити режими роботи системи теплозабезпечення із врахуванням зміни зовнішніх факторів, що впливають на тепловий режим будівлі.

Особливу увагу в дослідженні приділено взаємодії моделі теплонасосної установки з моделями системи опалення та будинку. Модель теплонасосної установки реалізовано на базі нейронної мережі LSTM, що суттєво скоротило час моделювання режиму роботи теплонасосної установки.

Модель дає можливість дослідження динамічних режимів роботи, а також проводити порівняльний аналіз різних видів систем керування (ПД-регулятор, модельно-прогнозуюче керування тощо). Дослідження демонструє, що використання таких алгоритмів дозволяє оптимізувати роботу ТНУ, знижуючи енергоспоживання без втрати комфорту в приміщеннях. Крім того, проведено валідацію моделі шляхом порівняння результатів імітаційного моделювання з квазістаціонарними розрахунками відповідно до національних стандартів, що підтверджує її достатню точність.

Результати дослідження можуть бути використані для подальшого розвитку систем керування теплозабезпеченням будівель із використанням теплових насосів та для дослідження різних стратегій управління енергоспоживанням, зокрема в контексті підвищення енергоефективності.

Ключові слова: теплонасосна установка, система теплозабезпечення, динамічний режим, Simulink, нейронна модель.

Постановка проблеми. Проблематика енергоефективності будівель та систем теплозабезпечення є однією з найважливіших тем у сучасних наукових дослідженнях, зокрема у контексті зростаючого попиту на відновлювані джерела енергії. Теплонасосні установки, які відомі своєю економічною ефективністю, стали поширеними як ключовий елемент у забезпеченні тепла для будівель. Впровадження сучасних технологій моделювання дозволяє створювати динамічні моделі систем теплозабезпечення, що допомагає досліджувати їх поведінку за різних умов. Моделювання у середовищі Simulink дає можливість аналізувати роботу систем тепlopостачання, їх енергоспоживання та ефективність у режимі реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1] автори представили комплексну модель теплового насоса на основі парокомпресійного циклу з використанням холодоагенту R-407c. Модель була реалізована в Simscape, де автори змоделивали основні компоненти системи — компресор, конденсатор, випарник та будинок. Особливістю цієї роботи є можливість налаштування параметрів кожного компонента для адаптації під різні умови експлуатації, що забезпечує високу точність моделювання реальних динамічних процесів тепlopостачання будинку.

В матеріалі [2] розглянуто теплове моделювання будинку разом із системою ОВіК. Використовуючи середовище Simulink, автори створили модель, яка здатна враховувати динамічні зміни теплопередачі у будівлі, що робить її дуже гнучкою для різноманітних сценаріїв роботи системи тепlopостачання. Основною перевагою є використання інтегрованої системи, яка поєднує будинок і систему ОВіК для кращого аналізу взаємодії між ними.

Модель підлогового опалення, описана у статті [3], демонструє застосування теплового насоса для живлення підлогового опалення. Особливої уваги заслуговує можливість інтеграції такої системи з Simulink для моделювання процесу теплопередачі через підлогу, що є важливим для аналізу енергоефективності під час експлуатації.

У роботі [4] розглянуто застосування алгоритму нечіткої логіки для керування системою тепlopостачання. Автори використали Simulink як платформу для моделювання, щоб продемонструвати, як нечітка логіка може покращити контроль над температурними параметрами у будинку. Ця модель дозволяє гнучко налаштовувати правила керування залежно від зміни зовнішніх умов.

Дослідження [5] акцентує увагу на використанні Simulink для динамічних симуляцій систем опалення. Особливістю цієї роботи є її простота, що дозволяє легко адаптувати модель для різних типів систем та сценаріїв тепlopостачання. Це робить модель доступною для широкого кола дослідників, які займаються подібними системами.

Стаття [6] пропонує базову модель теплового насоса, яка може бути інтегрована в Simulink для досліджень тепlopостачання житлових будинків. Простота цієї моделі дозволяє зосередитися на базових параметрах роботи насоса, проте вона обмежена в плані складніших сценаріїв розподілу тепла.

У статті [7] описується модель теплового насоса, що використовує відновлювані джерела енергії, такі як ґрунтове тепло. Важливим аспектом є можливість моделювання

сезонних змін теплового потоку, що робить систему ефективною в довгостроковій перспективі. Ця робота демонструє потенціал використання ґрунтових теплових насосів для підвищення енергоефективності будинків.

Остання стаття [8] досліджує роботу теплового насосу в комбінованих режимах — для одночасного обігріву та охолодження приміщень. Модель, розроблена в MATLAB, дозволяє симулювати роботу системи у різних умовах, однак її точність залежить від якості вхідних даних.

Аналіз наукових робіт показує, що розробка моделі теплозабезпечення будинку з тепловим насосом в Simulink є актуальним дослідженням. Метою роботи є створення динамічної моделі для дослідження алгоритмів керування, аналізу енергоефективності та порівняння режимів роботи в реальних умовах.

Мета дослідження - розробити та оптимізувати динамічну модель системи теплозабезпечення будинку на основі теплонасосної установки (ТНУ) в середовищі MATLAB Simulink для підвищення енергоефективності будівель. Дослідження спрямоване на зниження використання викопного палива та впровадження відновлюваних джерел енергії через оптимізацію керування системами теплозабезпечення з використанням сучасних алгоритмів, таких як ПД-регулятор та модельно-прогнозуюче керування.

Викладення основного матеріалу дослідження. Модель будинку розроблена у середовищі MATLAB Simulink із використанням блоків Simscape/Foundation Library/Thermal [9]. Метою моделювання є дослідження теплових режимів у будинку під час опалювального періоду, враховуючи внутрішні та зовнішні фактори.

Для створення енергетичної моделі використано план сучасного невеликого будинку. Загальна площа складає 49,44 м², висота стель – 2,7 м (рис. 1). Несучі стіни виконані з пустотілої цегли товщиною 0,4 м з утепленням у 0,05 м мінеральною ватою.

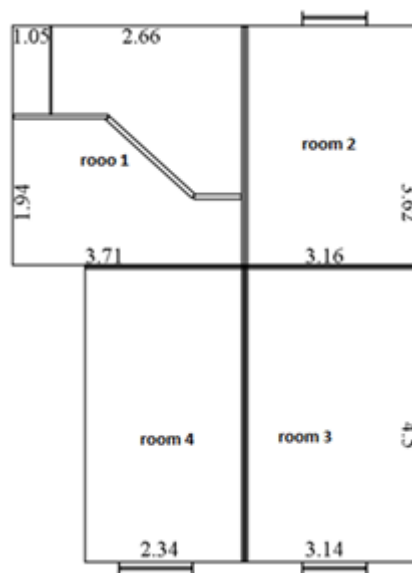


Рисунок 1 – Геометрична схема будинку

Огороджувальні конструкції моделювались як багат шарові елементи з різними теплотехнічними характеристиками. Вони включають такі блоки Simscape:

- Конвективний теплообмін – моделює передачу тепла через повітря між поверхнями;
- Теплопровідність – враховує теплопередачу через будівельні матеріали, що описується рівнянням теплопровідності Фур'є;
- Теплоакумулююча ємність – враховує акумуляцію теплоти всередині огорожувальних конструкцій.

Для кожної кімнати визначалися площі та опори теплопередачі зовнішніх стін, віконних конструкцій, стелі та підлоги (Рис. 2). В моделі також враховано вплив внутрішніх стін на процеси передачі теплоти між кімнатами.

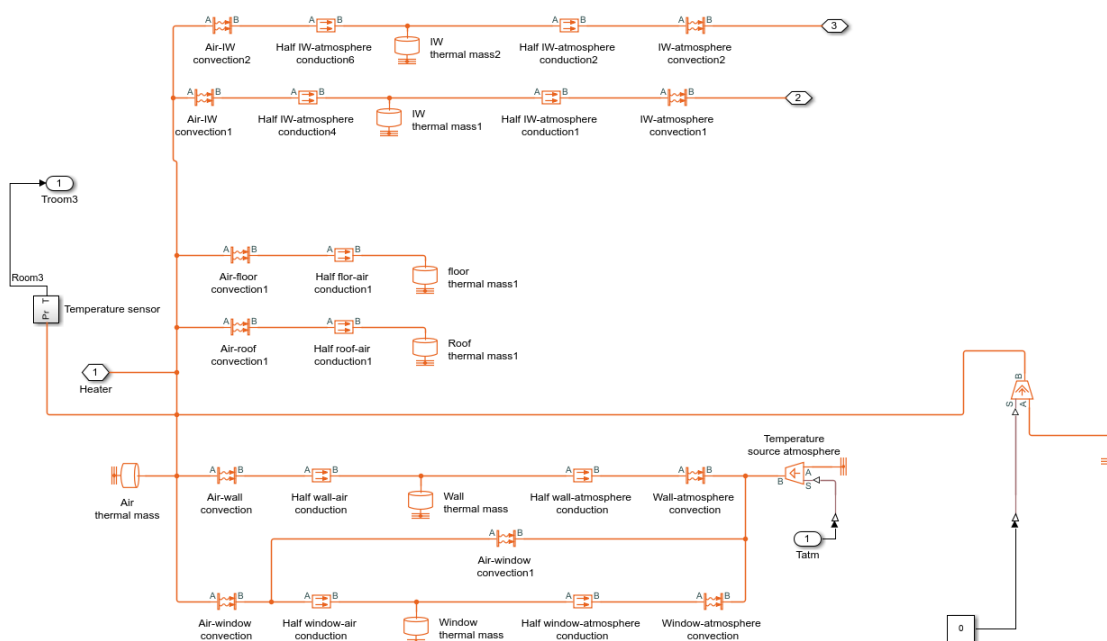


Рисунок 2 – Структурна схема теплофізичної моделі кімнати

Теплові потоки між кімнатами моделювалися з урахуванням конвективного теплообміну та теплопередачі. Для цього використовувалися блоки Simscape, які описують процеси передачі теплоти між суміжними приміщеннями через стіни, підлогу та стелю.

Одним з важливих елементів моделі є зовнішні фактори, які враховувалися під час моделювання. Було використано кліматичні дані для міста Київ на основі міжнародного погодного файлу IWEC[10]. Задавалися погодинні коливання зовнішньої температури, які впливали на теплові втрати через огорожувальні конструкції. Крім того, для кожної кімнати було визначено сонячні теплонадходження на основі орієнтації вікон (східна і західна сторони), а також враховано коефіцієнти пропускання сонячної радіації через склопакети.

В моделі (Рис. 4) враховано такі параметри опалювальних приладів:

- Проектна потужність приладів для кожної кімнати: спальня – 500 Вт, кухня – 880 Вт, коридор – 320 Вт;
- Постійна витрата теплоносія – 0,41 кг/с.

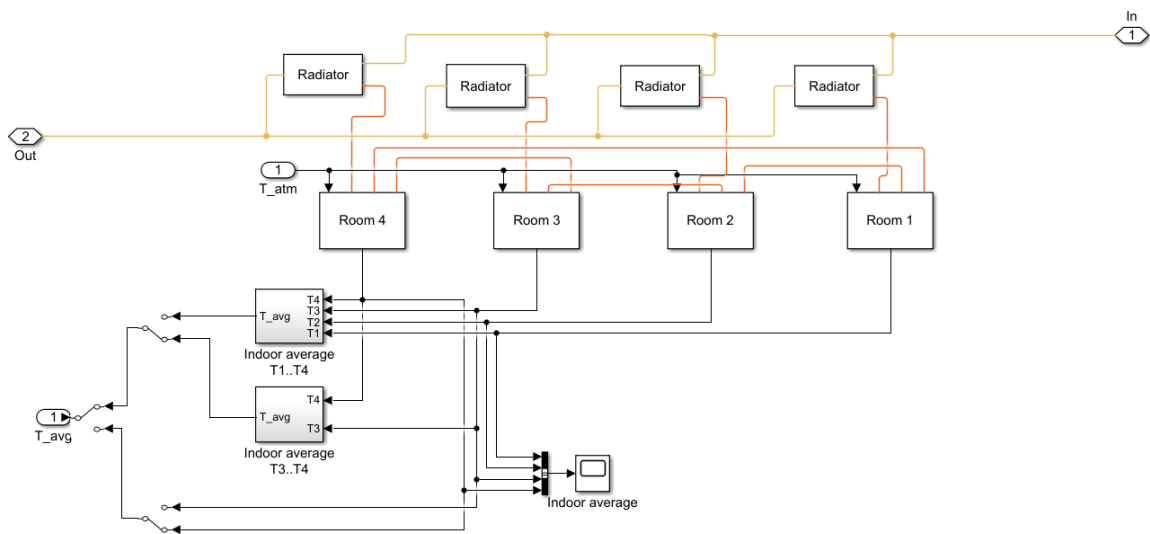


Рисунок 3 – Структурна схема моделі опалювальної системи

Окрему увагу приділено врахуванню теплових втрат та акумулюванню тепла в огорожувальних конструкціях. Теплові втрати через стіни, підлогу та стелю розраховувалися на основі коефіцієнтів теплопровідності кожного шару. Акумуляція тепла відбувається всередині матеріалів, що забезпечувало більш плавну зміну температури в кімнатах при зміні зовнішніх умов.

Розроблена модель дозволяє детально аналізувати теплові режими будівлі з урахуванням реальних кліматичних даних та характеристик будівельних матеріалів. Важливим є врахування інерційних властивостей огорожувальних конструкцій і їхнього впливу на енергоефективність будинку. Модель підходить для дослідження альтернативних систем опалення та їх керування.

Для валідації моделі було проведено порівняння результатів моделювання з квазістаціонарними розрахунками за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015[11], який враховує сезонні коливання температури та теплоаккумуляційні властивості конструкцій. Відхилення у 13% свідчить про достатню точність моделі для дослідження енергетичних характеристик будівель та систем теплозабезпечення. Модель є придатною для подальших досліджень різних алгоритмів керування та їх енергоефективності.

Розробка інтегрованої системи теплозабезпечення будинку на основі теплового насоса в Simulink є ключовим етапом у дослідженні ефективності різних алгоритмів керування та оптимізації енергоспоживання. Модель теплового насоса була розроблена на основі нейронної мережі LSTM [12] та інтегрована в середовище Simulink за допомогою S-функції [13], що дозволяє обробляти дані в режимі реального часу і здійснювати точні прогнози теплових процесів.

Модель ТНУ [13, 14, 15], що використовується як джерело теплової енергії, відповідає за генерацію тепла, яке передається в систему опалення будинку. Модель будинку, побудована на основі блоку Simscape Thermal, моделює теплову взаємодію між приміщеннями та зовнішнім середовищем. Це дає можливість досліджувати проце-

си генерації та передачі теплоти через систему опалення до внутрішнього повітря в приміщення.

Інтеграція моделей ТНУ, системи опалення та будинку здійснюється шляхом передачі відповідних сигналів через спеціальні блоки Simulink (Рис. 4). Температура води на виході з конденсатора теплового насоса є вхідним параметром для моделі системи опалення і використовується для розрахунку теплообміну в приміщенні.

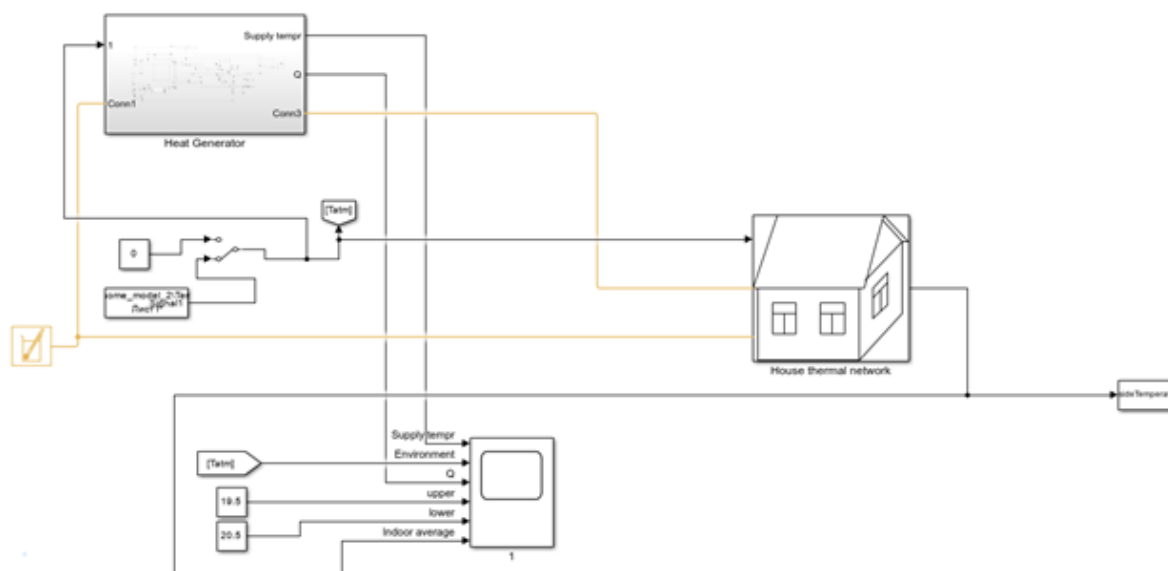


Рисунок 4 – Структурна схема загальної моделі ТНУ та системи теплозабезпечення будинку

Модель теплонасоса обробляє інформацію про зовнішні умови та теплове навантаження, розраховуючи тепловий потік для підтримки комфортної температури. Цей потік передається в модель будинку, яка моделює його розподіл, враховуючи теплові втрати, взаємодію між приміщеннями та вплив сонячної радіації для оцінки теплового балансу кожної кімнати.

Одним із ключових аспектів поєднання цих моделей є ефективне керування температурою всередині будинку. Модель теплового насоса реагує на зміни середньої температури в кімнатах, використовуючи замкнену систему керування для підтримки комфортного теплового режиму. Зокрема, за допомогою ПД [16] закону регулювання, теплонасосна установка змінює температуру прямої води в системі опалення для підтримання комфортної температури повітря в будинку.

На Рис. 5 показано три графіки, що ілюструють температурні процеси в інтегрованій системі теплонасосної установки та теплозабезпечення будинку. Верхній графік (Supply temp) – червона лінія показує зміну температури прямої води в системі опалення, яка варіюється від 38°C до 60°C через роботу ТНУ залежно від теплових навантажень і зовнішніх умов. Середній графік (Environment) – чорна лінія показує зміну зовнішньої температури від -10°C до 5°C, що впливає на тепловтрати будинку. Нижній графік (Indoor average) – синя лінія відображає стабільну середню температуру в кімнатах (19°C – 20°C), яка підтримується системою між заданими межами 19°C та 21°C.

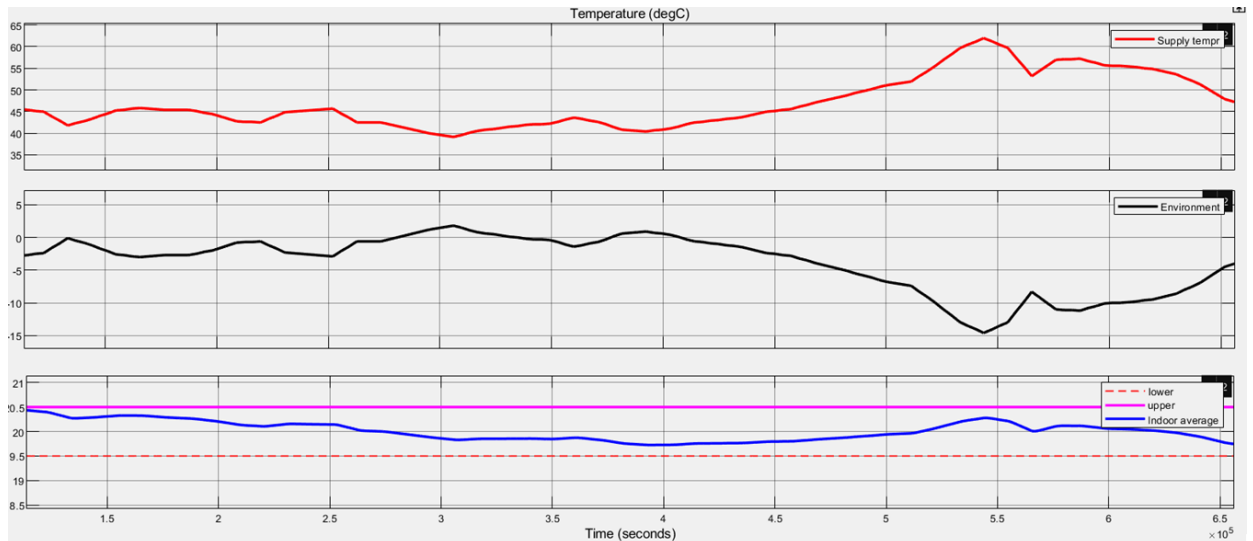


Рисунок 5 – Графіки роботи моделі теплозабезпечення будинку на основі ТНУ в середовищі Simulink

Поєднання моделі теплового насоса з моделлю будинку дозволяє дослідити різні стратегії керування, спрямовані на підтримання комфортних умов та підвищення енергоефективності системи. Зокрема, модель дає змогу оптимізувати роботу ТНУ з метою зниження споживання ним електроенергії без втрати комфорту в приміщеннях. Модель також дає змогу дослідити вплив зовнішніх факторів, таких як коливання температури та сонячна радіація, на загальну ефективність системи.

Висновки. У ході дослідження була успішно розроблена модель системи теплозабезпечення будинку на основі ТНУ в середовищі Simulink. Модель ТНУ, створена з використанням нейронної мережі LSTM та інтегрована через S-функцію, дає можливість моделювати динаміку теплових режимів у системі опалення. Також вона враховує динаміку зміни зовнішніх факторів та адаптувати роботу системи для підтримання стабільного теплового режиму.

Модель дозволяє детально досліджувати систему керування при різних умовах, аналізувати споживання енергії та тестувати різні налаштування та алгоритми керування. Результати дослідження мають практичну значущість для розробки енергоефективних систем опалення на базі ТНУ. Модель може бути використана для тестування різних алгоритмів керування, таких як ПД-регулятори або алгоритми на основі штучного інтелекту, що сприяє оптимізації енергоспоживання та зниженню експлуатаційних витрат.

Подальший розвиток досліджень може включати розробку і впровадження інтелектуальних систем керування на основі прогнозування теплового навантаження з використанням нейронних мереж або інших методів машинного навчання. Таким чином, запропонована модель є перспективним інструментом для дослідження та оптимізації енергоефективних систем теплозабезпечення, що сприяє зниженню споживання енергії та підвищенню комфорту в будівлях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Singh S., Sørensen K. Dynamic model of a heat pump based house heating system. *Proceedings of The 59th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 59)*. 2018. <https://doi.org/10.3384/ecp1815387>.
2. Thermal modelling of the building and its HVAC system using Matlab/Simulink. *International Journal of Sustainable Energy*. 2020.
3. Modelling and Simulation of Underfloor Heating System Supplied from a Heat Pump. *Energy Reports*. 2021.
4. Fuzzy Logic Control for House Heating System in Simulink. *Journal of Control and Automation Systems*. 2022.
5. Modelling of Heating Systems: Using Simulink for Dynamic Simulations. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2020.
6. Simulink Modeling of a Residential Heat Pump System. *Journal of Building Performance*. 2021.
7. MATLAB/Simulink Model of Ground Source Heat Pump. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*. 2020.
8. Heat Pump with Simultaneous Heating and Cooling Simulation in MATLAB. *Energy and Buildings*. 2020.
9. MathWorks. Simulink, Version R2022b. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2022. URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
10. Ashrae. International Weather for Energy Calculations (IWEC). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2020. URL: <https://www.ashrae.org>.
11. Мінрегіон України. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Склад та зміст кліматичних даних для розрахунків теплових і енергетичних характеристик будівель. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2015.
12. Greff K., Srivastava R. K., Koutník J., Steunebrink B. R., Schmidhuber J. LSTM: A search space odyssey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2017. Vol. 28. No. 10. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2582924>.
13. Волощук 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.
14. Волощук 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.
15. Богза М. С., Волощук 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.
16. Astrom K. J., Murray R. M. Feedback systems: An introduction for scientists and engineers. *2nd ed. Princeton University Press*, 2010. <https://doi.org/10.1515/9781400835355>.

REFERENCES

1. Singh, S., Sørensen, K. (2018). Dynamic model of a heat pump based house heating system. Proceedings of The 59th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 59). <https://doi.org/10.3384/ecp1815387>
2. Thermal modelling of the building and its HVAC system using Matlab/Simulink. (2020). International Journal of Sustainable Energy.
3. Modelling and Simulation of Underfloor Heating System Supplied from a Heat Pump. (2021). Energy Reports.
4. Fuzzy Logic Control for House Heating System in Simulink. (2022). Journal of Control and Automation Systems.
5. Modelling of Heating Systems: Using Simulink for Dynamic Simulations. (2020). Building Services Engineering Research and Technology.
6. Simulink Modeling of a Residential Heat Pump System. (2021). Journal of Building Performance.
7. MATLAB/Simulink Model of Ground Source Heat Pump. (2020). Renewable Energy and Environmental Sustainability.
8. Heat Pump with Simultaneous Heating and Cooling Simulation in MATLAB. (2020). Energy and Buildings.
9. MathWorks. (2022). Simulink, Version R2022b. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. Available at: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. Accessed: 24.08.2024.
10. ASHRAE. (2020). International Weather for Energy Calculations (IWEC). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Retrieved from <https://www.ashrae.org>.
11. Ministry of Regional Development of Ukraine. (2015). DSTU B A.2.2-12:2015. Climate data for heat and energy calculations of buildings. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction, and Housing of Ukraine.
12. Greff, K., Srivastava, R. K., Koutník, J., Steunebrink, B. R., Schmidhuber, J. (2017). LSTM: A search space odyssey. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 28(10), 2222-2232. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2582924>
13. Voloshchuk, V. A., Shyndyliuk, P. V., Nekrashevych, O. V., Bohza, M. S., Hikalov, P. V. (2023). Doslidzhennya dynamichnykh kharakterystyk teplonasosnoyi ustanovky typu «pov-ityria-voda» [Research of the dynamic characteristics of an air-to-water heat pump system]. Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky, 34(73), 36-44. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/07>
14. Voloshchuk, V. A., Shyndyliuk, P. V., Nekrashevych, O. V., Bohza, M. S., & Hikalov, P. V. (2023). Doslidzhennya dynamichnykh kharakterystyk teplonasosnoyi ustanovky typu «voda-voda» [Research of the dynamic characteristics of a water-to-water heat pump system]. Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky, 34(2), 36-44. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/07>
15. Bohza, M. S., & Voloshchuk, V. A. (2024). Zastosuvannya metodiv mashynnoho navchannya u zadachakh modelyuvannya dynamiky teplonasosnykh ustanovok [Application of machine learning methods in modeling the dynamics of heat pump systems]. Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky, 35(4), 52-58. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/09>

16. Astrom, K. J., & Murray, R. M. (2010). Feedback systems: An introduction for scientists and engineers (2nd ed.). Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9781400835355>

Received 05.02.2025.
Accepted 07.02.2025.

Development of a complex model of heat supply of a house based on a heat pump in the Simulink environment

The article presents a dynamic model of a house heat supply system based on a heat pump unit (HPU) developed in the MATLAB Simulink environment using Simscape blocks to model thermal processes. The relevance of the study is emphasized by the need to reduce fossil fuel consumption, which has increased the demand for energy-efficient technologies and systems based on renewable energy sources. Optimizing such systems is critical in the context of global efforts to improve building energy efficiency.

The model considers the structural features of the house, including the materials of the enclosing structures and their thermal characteristics. The dynamics of external factors such as ambient temperature and solar activity are also taken into account. Hourly weather and climate data for the city of Kyiv, used in the model, allow for the study of the operating modes of the heat supply system, taking into account external factors affecting the thermal regime of the building.

Special attention is paid to the interaction between the heat pump unit model and the heating system and house models. The heat pump unit model is implemented based on an LSTM neural network, significantly reducing the time required for simulating the operation mode of the heat pump. The model allows for the investigation of dynamic operating modes and comparative analysis of different types of control systems (PID controller, model predictive control, etc.).

The research demonstrates that using such algorithms optimizes the operation of the heat pump unit, reducing energy consumption without compromising indoor comfort. Furthermore, model validation was carried out by comparing simulation results with quasi-steady-state calculations according to national standards, confirming its sufficient accuracy.

The results of the study can be used for the further development of control systems for building heat supply using heat pumps and for the exploration of different energy management strategies, particularly in the context of improving energy efficiency.

Богза Микола - аспірант кафедри автоматизації енергетичних процесів, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна.

Бірюков Дмитро - Асистент кафедри теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна.

Bogza Mykola - post-graduate student of the Department of Energy Processes Automation, National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', Kyiv, Ukraine.

Biryukov Dmitry - Assistant of the Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', Kyiv, Ukraine.