

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-37>

УДК 004.942

ЄВСЕЄНКО ОЛЕГ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0000-0001-5432-1211>

e-mail: oleh.yevseienko@khp.edu.ua

ДОЮН ЯРОСЛАВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0009-0002-7452-028X>

e-mail: yaroslavdoyun@gmail.com

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОНВЕКТОРА У ПРИМІЩЕННІ

Забезпечення комфортного мікроклімату в приміщеннях є питанням не лише зручності, а й енергоефективності. Оскільки різні приміщення використовуються нерівномірно протягом дня, відсутність автоматизованого керування опаленням може спричинити зайві витрати тепла. Оптимізація системи обігріву дозволяє не тільки знизити витрати, а й створити більш комфортні умови для перебування людей. Стаття присвячена розробці математичної моделі електричного конвектора для дослідження теплових процесів у приміщенні. Це питання є актуальним, оскільки забезпечення комфортного та енергоефективного керування опаленням вимагає індивідуального регулювання кожного нагрівального елемента. Такий підхід сприяє зменшенню витрат на опалення, оптимізації системи керування та створенню комфортних умов для перебування людей. Для досягнення поставленої мети була розроблена математична модель електричного конвектора, яку інтегровано в спрощену теплову модель приміщення торговельного центру. Для опису теплової динаміки нагрівального елемента та повітряного простору конвектора використано рівняння динамічного теплового балансу. Проведено лінеаризацію рівнянь та отримано систему динамічних диференціальних рівнянь, які описують теплові процеси в конвекторі. Записано передавальні функції системи в просторі Лапласа. Проведено дослідження реакції системи на імпульсні збурення різної тривалості. Отримані результати можуть бути використані для розробки енергоефективної системи керування електричним конвектором у приміщеннях та вдосконалення алгоритмів керування.

Ключові слова: електричний конвектор, математичне моделювання, тепловий баланс, торговельний центр, енергоефективність.

YEVSEIENKO OLEH, DOIUN YAROSLAV

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

MATHEMATICAL MODEL OF ELECTRIC CONVECTOR OPERATING MODES IN AN INDOOR ENVIRONMENT

Ensuring a comfortable indoor microclimate is not only a matter of convenience but also a critical factor in energy efficiency. Since different spaces, particularly in commercial buildings like shopping centers, are utilized unevenly throughout the day, the lack of automated heating control often leads to significant excessive energy consumption. Optimizing the heating system through precise regulation allows not only to reduce operational costs but also to maintain stable thermal conditions for occupants. This paper focuses on the development of a dynamic mathematical model of an electric convector for studying thermal processes in indoor environments. The study addresses the need for individual control of heating elements to achieve energy savings. To achieve this, a mathematical model of a 1500 W electric convector was constructed and integrated into a simplified thermal model of a room. The modeling approach is based on differential equations of dynamic thermal balance, applied specifically to the heating element and the internal air volume of the device. Using the linearization method, the authors derived a system of differential equations describing the thermal dynamics. Subsequently, the transfer functions of the control object were formulated in the Laplace domain. The simulation and validation of the model were carried out using the MATLAB/Simulink environment. The study analyzes the system's transient response to impulse disturbances of varying durations, revealing the inertial properties of the room and the exponential nature of temperature changes. The obtained results provide a theoretical basis for developing energy-efficient control systems and advanced algorithms for electric heating in varying operational conditions.

Keywords: electric convector, mathematical modeling, thermal balance, shopping center, energy efficiency.

Стаття надійшла до редакції / Received 05.02.2026

Прийнята до друку / Accepted 19.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Євсєєнко Олег, Доюн Ярослав

Постановка проблеми

Мікроклімат є важливою складовою комфортних умов у будинку, офісі та будь-якому закритому просторі. Основні параметри мікроклімату включають температуру, вологість, швидкість руху повітря та рівень забруднення. Вони безпосередньо впливають на здоров'я, психоемоційний стан і продуктивність роботи людини. Одним із ключових параметрів мікроклімату є температура повітря в приміщенні.

Приміщення – це основне місце перебування людини, тому важливо забезпечити в ньому комфортні умови для життєдіяльності. Для точної підтримки температури необхідно застосовувати автоматичні регулятори температури, які забезпечують стабільний мікроклімат. Проте існуючі умови в приміщенні часто відрізняються від комфортних, тому додатково, окрім загального тепlopостачання, використовуються місцеві нагрівачі, такі як конвектори, інфрачервоні обігрівачі, теплові вентилятори та підлогове опалення.

Ефективне управління мікрокліматом у приміщенні є не лише питанням комфорту, а й раціонального використання ресурсів. У більшості будівель температурний режим у різних приміщеннях може суттєво відрізнятися залежно від їхнього призначення, розташування та рівня зайнятості. Люди перебувають у приміщеннях нерівномірно протягом доби: наприклад, удень офіси активно використовуються, а вночі можуть підтримувати лише мінімальну температуру для економії ресурсів. Саме тому без автоматизованих рішень управління опаленням часто є неефективним: тепло подається рівномірно у всі приміщення, навіть якщо вони не використовуються.

Завдяки сучасним технологіям можна створювати та впроваджувати алгоритми управління температурою, які дозволяють налаштувати режими роботи опалення відповідно до потреб та функціонального призначення приміщень. Упровадження систем автоматичного регулювання температури в приміщенні вирішує три основні задачі: оптимізацію використання теплової енергії, економію енергоресурсів та забезпечення комфортного мікроклімату.

Реалізація алгоритмів керування на реальному об'єкті є складним, ресурсоемним процесом та потребує ретельного тестування. Саме тому будують математичні та імітаційні моделі, що дозволяють оцінити ефективність алгоритмів без ризиків для реального обладнання, необхідності переривати технологічні процеси чи втручатися в робочі цикли персоналу.

Аналіз досліджень та публікацій

Роботи [1] та [2] присвячені математичному моделюванню та аналізу теплотехнічного обладнання, зокрема водонагрівачів, які використовуються в промислових системах кондиціонування та штучного мікроклімату. У дослідженнях використовується підхід математичного моделювання, заснований на рівняннях теплового балансу, диференціальних рівняннях та методах оптимізації. Для адаптації математичних моделей до реальних умов експлуатації та підвищення точності прогнозування теплових процесів використовуються методи ідентифікації параметрів для точного відображення реального теплового процесу.

Окрему увагу приділено моделюванню повітряних потоків у приміщенні та температурного поля при використанні радіаційного та конвективного нагріву [3]. Для обраного приміщення аналізується вплив нагрівача на температурний розподіл у кімнаті та рівень термального комфорту, залежно від його розташування – біля холодної стіни або на протилежному боці. Дослідження ґрунтується на чисельному моделюванні теплообміну та потоків повітря, що забезпечує його високу точність, однак такі методи залишаються ресурсоемними, потребують значних обчислювальних витрат і складні для імплементації в алгоритмах керування в реальному часі.

Інший підхід розглянуто в [4], де запропоновано динамічну модель електричного повітряного нагрівача, що працює в перехідному режимі, з урахуванням енергетичного балансу. Отримана модель представлена диференціальним рівнянням першого порядку з двома параметрами. Параметри моделі були скориговані за допомогою методу найменших квадратів. Підсумковий аналіз підтвердив адекватність моделі як для перехідного, так і для усталеного режимів, що дозволяє використовувати її для моделювання, аналізу й проектування електричних нагрівачів.

У межах роботи [5] запропоновано автоматизовану систему керування промисловим кондиціонером із паровим зволожувачем. Її математичне представлення описано рівняннями в просторі станів. Подальший розвиток цього напрямку наведено в [6], де розглянуто підхід до передбачення динаміки системи та її вдосконалення. Для реалізації моделювання використовується середовище MATLAB/Simulink.

Створення ефективної системи керування, що забезпечує енергоощадність, потребує комплексного підходу. Як зазначено в [7], необхідно розробити модель, яка містить математичне представлення приміщення та електричного нагрівача. Така модель дає змогу враховувати динаміку теплопередачі, акумулювання тепла в будівельних конструкціях, особливості розподілу повітряних потоків і ефективність роботи нагрівального обладнання.

Одним із цікавих підходів, розглянутих у [8, 9], є використання інфрачервоного нагрівача, що випромінює теплову енергію, яка поглинається поверхнею підлоги. Далі тепло поширюється матеріалом завдяки теплопровідності, а згодом передається в повітря й робочу зону приміщення. Такий метод сприяє створенню комфортних умов у виробничих та інших приміщеннях.

Щодо опису теплообмінних процесів, у [10] обґрунтовано доцільність використання параметрів одномірних динамічних моделей. Доведено, що такої моделі достатньо для адекватного відображення процесів, оскільки вхідною величиною є потужність обігрівача, а вихідною – температура повітря в локальній зоні.

Для моделювання теплових процесів у приміщенні обрано математичну модель, розраховану в [11]. Як нагрівальний прилад використовується електричний конвектор потужністю 1500 Вт. При розрахунку враховано два основні динамічні елементи: електричний нагрівач, що підігріває повітря, і повітряний простір, через який тепло передається до потоку, що циркулює крізь конвектор.

Мета і задачі дослідження

Метою статті є побудова математичних моделей процесу теплообміну між електричним нагрівальним приладом та приміщенням. Ці моделі дозволять дослідити та проаналізувати теплові процеси в приміщенні під час обігріву. Основною задачею є розробка моделей для подальшого створення програми керування з прогнозуванням температури в приміщенні.

Виклад основного матеріалу

Для отримання моделі нагрівального приладу як об'єкта управління використаємо рівняння динамічного теплового балансу. Оскільки в електричному конвекторі відсутній теплоносієм у класичному розумінні (вода, пара), теплова потужність визначається електричною потужністю нагрівального елемента та умовами тепловіддачі до повітря. Запишемо рівняння динамічного теплового балансу в диференційному вигляді для нагрівального елемента:

$$I^2 \cdot R - \alpha_e \cdot F_e \cdot (\theta_e - \theta_{a1}) = m_e \cdot c_e \cdot \frac{d\theta_e}{dt}, \quad (1)$$

де I – електричний струм через нагрівальний елемент, А;

R – електричний опір нагрівального елемента, Ом;

α_e – коефіцієнт тепловіддачі від нагрівального елемента до повітря, Вт/(м² · °С);

F_e – площа поверхні нагрівального елемента, м²;

θ_e – температура нагрівального елемента, °С;

θ_{a1} – температура повітря після нагріву, °С;

m_e – маса нагрівального елемента, кг;

c_e – питома теплоємність матеріалу нагрівального елемента, Дж/(кг · °С).

Для рівняння (1) припускаємо, що нагрівальний прилад передає тепло виключно шляхом конвекції, без урахування випромінювання, а його нагрівальний елемент не має теплового контакту з іншими матеріалами, зокрема корпусом. Це припущення є спрощенням, оскільки в реальних умовах присутній також радіаційний теплообмін і теплопровідність через корпус, однак воно прийнятне для побудови моделі з зосередженими параметрами.

Далі отримаємо тепловий баланс для повітряного простору конвектора:

$$G_a \cdot c_a \cdot (\theta_0 - \theta_{a1}) + \alpha_e \cdot F_e \cdot (\theta_e - \theta_{a1}) = m_a \cdot c_a \cdot \frac{d\theta_{a1}}{dt},$$

де c_a – питома теплоємність повітря, Дж/(кг · °С);

G_a – масова витрата повітря через конвектор, кг/с;

θ_0 – вхідна температура повітря, °С;

θ_{a1} – вихідна температура повітря, °С;

α_e – коефіцієнт тепловіддачі між повітрям у середині конвектора і зовнішньою поверхнею нагрівача, Вт/(м² · °С);

F_e – площа поверхні ТЕНа, через яку передається тепло, м²;

m_a – маса повітря в об'ємі конвектора, кг.

Для зменшення складності рівняння та застосування стандартних методів аналізу проведемо спрощення та лінеаризацію рівнянь, використовуючи коефіцієнти. Отримуємо:

$$T_e \frac{d\theta_e}{dt} + \Delta\theta_e = k_0 \cdot \Delta(I^2 \cdot R) + k_1 \cdot \Delta\theta_{a1} \quad \text{та} \quad T_a \frac{d\theta_{a1}}{dt} + \Delta\theta_{a1} = k_2 \cdot \Delta\theta_e + k_3 \cdot \Delta\theta_{a0} + k_4 \cdot \Delta G_a,$$

де $K_e = \alpha_e \cdot F_e$;

$T_e = m_e \cdot c_e / K_e$;

$k_0 = 1 / K_e$;

$k_1 = 1$;

$K_a = G_a \cdot c_a + \alpha_e \cdot F_e$;

$T_a = m_a \cdot c_a / K_a$;

$k_2 = \alpha_e \cdot F_e / K_a$;

$k_3 = 1 - k_2$;

$k_4 = c_a \cdot (\theta_{a0} - \theta_{a1}) / K_a$.

Отримаємо систему динамічних диференційних рівнянь теплового балансу, які описують теплові процеси в конвекторі [1]:

$$\begin{cases} T_e \frac{d\theta_e}{dt} + \Delta\theta_e = k_0 \cdot \Delta(I^2 \cdot R) + k_1 \cdot \Delta\theta_{a1} \\ T_a \frac{d\theta_{a1}}{dt} + \Delta\theta_{a1} = k_2 \cdot \Delta\theta_e + k_3 \cdot \Delta\theta_{a0} + k_4 \cdot \Delta G_a \end{cases}$$

Система рівнянь динамічного теплового балансу [1] для конвектору в області Лапласа прийме вигляд:

$$\begin{cases} \Delta\theta_e \cdot (T_e \cdot p + 1) = k_0 \Delta(I^2 \cdot R) + k_1 \Delta\theta_{a1} \\ \Delta\theta_{a1} \cdot (T_a \cdot p + 1) = k_2 \cdot \Delta\theta_e + k_3 \cdot \Delta\theta_{a0} + k_4 \cdot \Delta G_a \end{cases} \quad (2)$$

З систем рівнянь динамічного теплового балансу [1] для конвектора в області Лапласа (2) знаходимо передавальні функції:

$$W_e(p) = k_0 \cdot \frac{\Delta(I^2 \cdot R)}{T_e \cdot p + 1} + k_1 \cdot \frac{\Delta\theta_{a1}}{T_e \cdot p + 1},$$

$$W_a(p) = \frac{k_2 \cdot \theta_e}{T_a \cdot p + 1} + \frac{k_3 \cdot \Delta\theta_{a0}}{T_a \cdot p + 1} + \frac{k_4 \cdot \Delta G_a}{T_a \cdot p + 1}.$$

У таблиці 1 наведено теплофізичні параметри приміщення та нагрівального приладу.

Параметри та теплофізичні величини нагрівального приладу:

Назва параметра	Позначення	Числове значення
Габарити нагрівального приладу, м	H x W x L	0.6 x 0.1 x 1.2
Електрична потужність, Вт	P	1500
Електричний струм через нагрівальний елемент, А	I	6.8
Об'єм повітряного простору в нагрівальному приладі, м ³	V	0.0720
Витрата повітря в приміщенні через нагрівальний прилад, кг/с	G _a	0.0217
Теплоємність сталі, Дж/(кг·°C)	c _з	447
Теплоємність ніхрому, Дж/(кг·°C)	c _е	450
Маса повітря в нагрівальному приладі, кг	m _a	0.0867
Площа зовнішньої поверхні теплообміну, м ²	F _е	0.72
Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні стіни, Вт/(м ² ·°C)	α _е	46.5
Маса нагрівача, кг	m _е	1
Вхідна температура повітря, °C	θ _{in}	0

Моделювання теплотехнічних характеристик приміщення та нагрівального приладу проводилося в середовищі Simulink MATLAB. На рис. 1 та 2 наведено структурні схеми моделі нагрівача та приміщення з інтегрованим нагрівачем.

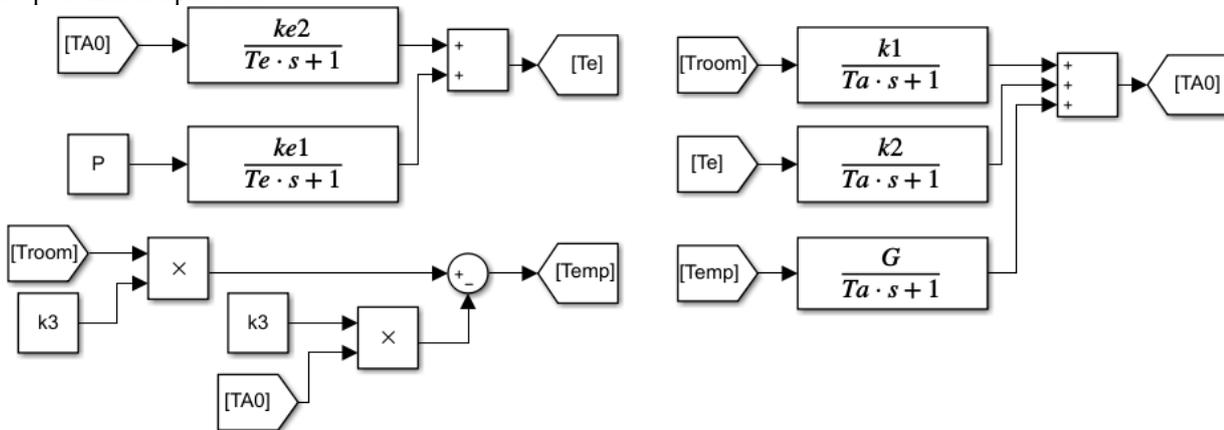


Рис. 1. Структурна схема моделі електричного нагрівача

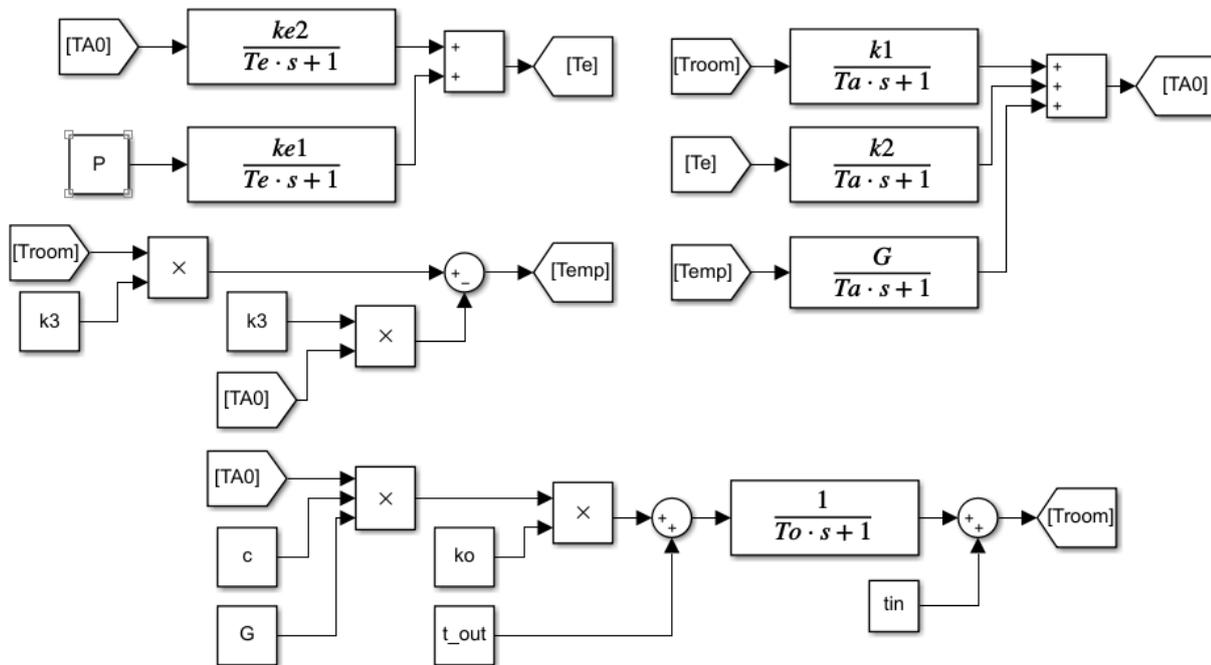


Рис. 2. Структурна схема моделі електричного нагрівача в приміщенні

Перехідну характеристику приміщення, отриману за допомогою нагрівача, наведено на рис. 3. Вона свідчить про теплоємність та інерційність приміщення. На графіку видно, що температура приміщення спочатку різко зростає, а потім поступово наближається до певного граничного значення, що дорівнює 22 °C.

Це вказує на значну інерційність системи, тобто здатність приміщення акумулювати тепло. Початковий крутий підйом кривої свідчить про швидку реакцію на нагрів, однак він також може бути пов'язаний із близьким розташуванням датчика температури до нагрівача. У такому випадку на початкових етапах фіксується локальне підвищення температури, яке не відображає рівномірний нагрів приміщення. Якщо ж датчик розташований далі або ближче до зовнішніх стін, крива буде мати більш плавний характер.

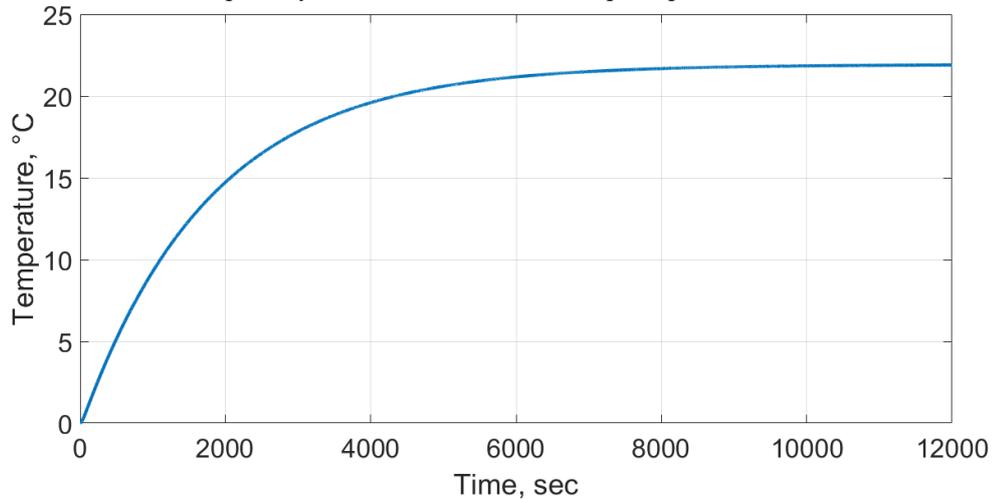


Рис. 3. Перехідна характеристика приміщення

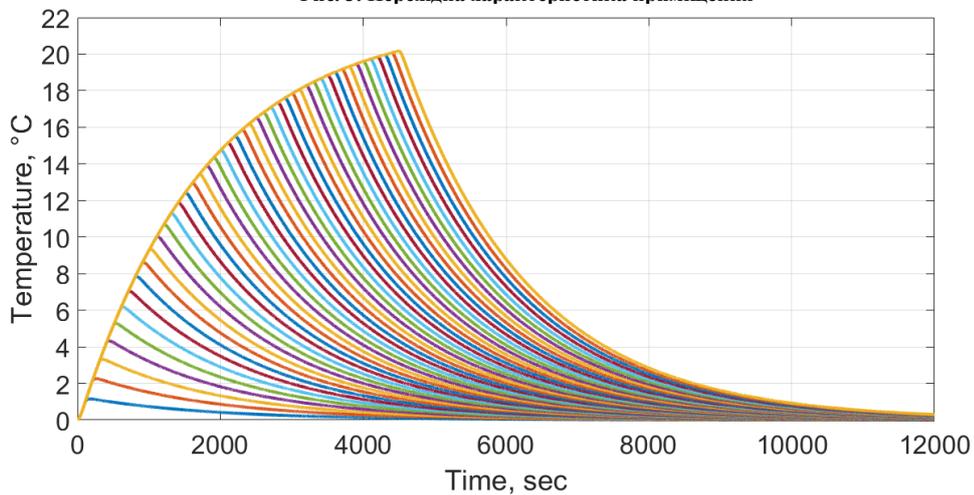


Рис. 4. Залежність температури від тривалості роботи нагрівача

На рис. 4 наведено графік, який ілюструє динаміку зміни температури залежно від часу при різних тривалостях циклу нагріву (від 100 до 4500 секунд із кроком 100 секунд). Експоненціальний спад температури після припинення нагріву вказує на те, що тепловіддача відбувається відповідно до закону Ньютона про охолодження. Регулювання тривалості нагріву дозволяє керувати максимальною температурою та швидкістю охолодження. Використання зворотного зв'язку, наприклад, ПІД-регулятора, може допомогти утримувати температуру на заданому рівні, мінімізуючи перерегулювання та коливання. Дослідження таких процесів корисне для оптимізації енергоспоживання та підвищення ефективності нагрівальних систем у промислових і технологічних застосуваннях. Таким чином, цей графік допомагає зрозуміти поведінку системи керованого нагріву й може слугувати основою для розробки ефективних алгоритмів керування температурою. Наближено лінійний характер зміни температури на початковому етапі нагріву свідчить про домінування джерела тепла над тепловими втратами, однак у загальному випадку процес має експоненціальний характер і описується диференціальними рівняннями першого порядку. Це дає змогу точно визначати час, необхідний для досягнення заданої температури, оптимізувати витрати енергії та ефективно налаштовувати режими роботи нагрівальних пристроїв.

Висновки

У статті розглянуто динамічну модель теплообміну для електричного нагрівача із зосередженими параметрами. Ця модель може бути використана для синтезу систем керування та створення штучного мікроклімату. Виконано теплотехнічні розрахунки об'єкта моделювання – електричного нагрівача. За допомогою рівняння динамічного теплового балансу в диференційному вигляді для нагрівального елемента та повітряного простору конвектора отримано його передатну функцію. У програмі MATLAB Simulink створено математичну модель нагрівального приладу. Розроблену модель нагрівача було інтегровано в модель приміщення торговельного центру. Проведено моделювання теплових процесів у приміщенні та отримано графіки переходної характеристики нагрівача. Використання подібних моделей нагрівача дозволяє оптимізувати процеси управління температурним режимом, підвищити ефективність роботи системи обігріву

та забезпечити точніше регулювання температури в різних умовах експлуатації. Це також сприяє зниженню енергоспоживання та покращенню комфортних умов у приміщеннях, де застосовуються дані системи. Перспективами подальших досліджень є розширення моделі шляхом урахування радіаційного теплообміну, теплової інерції будівельних конструкцій та інтеграція адаптивних і прогнозних алгоритмів керування.

Література

1. Голінко І. М. Динамічна модель теплообміну для водяного калорифера у просторі станів / І. М. Голінко, І. Є. Галицька // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2016. – Вип. 15. – С. 83–92. – DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-380415201686207>.
2. Pankratova N. Development of heat consumption digital twin for cyber-physical systems under conceptual uncertainty / N. Pankratova, I. Golinko, V. A. Pankratov // Problems of Applied Mathematics and Mathematical Modeling. – 2025. – Vol. 24. – P. 178–189. – <https://doi.org/10.15421/322419>.
3. 3-D simulations of indoor airflow and temperature field with a radiative and convective heater / C. Hemmer, F. Convert, C. Popa, G. Polidori // Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2016. – Vol. 9, Special Iss. 2. – P. 189–195. – DOI: 10.36884/jafm.9.SI2.25788.
4. Defendi R. O. Modeling, simulation, and validation of an electric heater model operating in the transient regime / R. O. Defendi, P. R. Paraiso, L. M. de M. Jorge // ENGEVISTA. – 2015. – Vol. 17, No. 3. – P. 421–432. – DOI: <https://doi.org/10.22409/engevista.v17i3.665>.
5. Голінко І. М. Принципи синтезу автоматичних систем керування промисловими кондиціонерами / І. М. Голінко // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 33–42. – DOI: <https://doi.org/10.21691/atbp.v8i1.21>.
6. Behravan A. Thermal dynamic modeling and simulation of a heating system for a multi-zone office building equipped with demand controlled ventilation using MATLAB/Simulink / A. Behravan, R. Obermaisser, A. Nasari // 2017 International Conference on Circuits, System and Simulation. – 2017. – P. 103–108. – DOI: <https://doi.org/10.1109/CIRSYSSIM.2017.8023191>.
7. Qu N. Simulation of electric heating prediction model by Internet of Things technology and room thermal performance analysis / N. Qu, W. You // Thermal Science. – 2020. – Vol. 24, No. 5B. – P. 3139–3147. – DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI191109088Q>.
8. Сподинок Н. А. Натурні дослідження теплового процесу на поверхні опромінення інфрачервоним нагрівачем / Н. А. Сподинок, В. Б. Шепітчак // Scientific Bulletin of UNFU. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 85–88. – DOI: <https://doi.org/10.36930/40310114>.
9. Research of thermal processes in industrial premises with energy-saving technologies of heating / O. Gumen, N. Spodyniuk, M. Ulewicz, Y. Martyn // Diagnostyka. – 2017. – Vol. 18, No. 2. – P. 43–49.
10. Classification of heating conditions in terms of smart control of indoor heating with the use of uncontrolled electric heaters / G. Pivnyak, G. Gruhler, A. Bublikov, Yu. Papaika, Ye. Voskoboinyk // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2022. – No. 4. – P. 78–83. – DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/078>.
11. Євсеєнко О. М. Побудова моделі торговельного центру як об'єкта з розподіленими параметрами / О. М. Євсеєнко // Технічна інженерія. – 2023. – № 1 (91). – С. 119–126. – DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-119-126](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-119-126).

References

1. Holinko I. M. Dynamichna model teploobminu dlia vodianoho kaloryfera u prostori staniv / I. M. Holinko, I. Ye. Halytska // Informatsiini systemy, mekhanika ta keruvannia. – 2016. – Vyp. 15. – S. 83–92. – DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-380415201686207>.
2. Pankratova N. Development of heat consumption digital twin for cyber-physical systems under conceptual uncertainty / N. Pankratova, I. Golinko, V. A. Pankratov // Problems of Applied Mathematics and Mathematical Modeling. – 2025. – Vol. 24. – P. 178–189. – DOI: <https://doi.org/10.15421/322419>.
3. 3-D simulations of indoor airflow and temperature field with a radiative and convective heater / C. Hemmer, F. Convert, C. Popa, G. Polidori // Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2016. – Vol. 9, Special Issue 2. – P. 189–195. – DOI: 10.36884/jafm.9.SI2.25788.
4. Defendi R. O. Modeling, simulation, and validation of an electric heater model operating in the transient regime / R. O. Defendi, P. R. Paraiso, L. M. de M. Jorge // ENGEVISTA. – 2015. – Vol. 17, No. 3. – P. 421–432. – DOI: <https://doi.org/10.22409/engevista.v17i3.665>.
5. Holinko I. M. Pryntsy py syntezu avtomatychnykh system keruvannia promyslovymy kondytsioneramy / I. M. Holinko // Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protseviv. – 2016. – T. 8, № 1. – S. 33–42. – DOI: <https://doi.org/10.21691/atbp.v8i1.21>.
6. Behravan A. Thermal dynamic modeling and simulation of a heating system for a multi-zone office building equipped with demand controlled ventilation using MATLAB/Simulink / A. Behravan, R. Obermaisser, A. Nasari // 2017 International Conference on Circuits, System and Simulation. – 2017. – P. 103–108. – DOI: <https://doi.org/10.1109/CIRSYSSIM.2017.8023191>.
7. Qu N. Simulation of electric heating prediction model by Internet of Things technology and room thermal performance analysis / N. Qu, W. You // Thermal Science. – 2020. – Vol. 24, No. 5B. – P. 3139–3147. – DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI191109088Q>.
8. Spodyniuk N. A. Naturni doslidzhennia teplovoho protsesu na poverkhni oprominennia infrachervonym nahrivachem / N. A. Spodyniuk, V. B. Shepichak // Scientific Bulletin of UNFU. – 2021. – T. 31, № 1. – С. 85–88. – DOI: <https://doi.org/10.36930/40310114>.
9. Research of thermal processes in industrial premises with energy-saving technologies of heating / O. Gumen, N. Spodyniuk, M. Ulewicz, Y. Martyn // Diagnostyka. – 2017. – Vol. 18, No. 2. – P. 43–49.
10. Classification of heating conditions in terms of smart control of indoor heating with the use of uncontrolled electric heaters / G. Pivnyak, G. Gruhler, A. Bublikov, Yu. Papaika, Ye. Voskoboinyk // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2022. – No. 4. – P. 78–83. – DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/078>.
11. Yevseienko O. M. Pobudova modeli torhovelnoho tsentru yak obiekta z rozpodilenyimi parametramy / O. M. Yevseienko // Tekhnichna inzheneriia. – 2023. – № 1 (91). – S. 119–126. – DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-119-126](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-119-126).