

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-17>

УДК 581.5

МИКИТІВ Юрій

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
<https://orcid.org/0009-0002-8412-9014>
e-mail: yuramyktytiv@gmail.com

ЧИХІРА Ігор

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
<https://orcid.org/0000-0002-8615-3635>
e-mail: ig.vi.chi@gmail.com

ПОЛИВАНИЙ Ігор

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
<https://orcid.org/0009-0009-0795-4820>
e-mail: polyvanyigor@gmail.com

БОЙЧУН Віктор

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
<https://orcid.org/0009-0008-5540-5431>
e-mail: vitya_boy@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІВНЯ ГІСТЕРЕЗИСУ НА ТЕМПЕРАТУРНИЙ КОМФОРТ ПРИМІЩЕННЯ ТА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ

У статті представлено результати розроблення та дослідження математичної моделі автоматизованої системи регулювання температури приміщення з теплою водяною підлогою, що працює за гістерезисним принципом керування. Модель реалізована в середовищі Python і враховує теплофізичні властивості приміщення, теплові втрати через огорожувальні конструкції, інерційність нагрівальної підлоги та вплив зовнішньої температури.

Симуляцію проведено для 30 діб у різні сезонні періоди — зимовий, весняний, літній та осінній — при різних рівнях гістерезису від 0.1 до 5 °C з кроком 0.1 °C. Отримані результати показали, що збільшення гістерезису призводить до зменшення кількості ввімкнень нагрівача, проте збільшує тривалість його роботи та загальне енергоспоживання. Надмірне розширення гістерезису спричиняє значні коливання температури в приміщенні та зниження комфорту температурного режиму.

Визначено оптимальні діапазони гістерезису для досліджуваного приміщення при різних сезонних умов: 0.6–0.8 °C для зимового періоду та 0.4–0.5 °C для весняно-осінніх. Такі значення забезпечують найкращий баланс між енергозбереженням і комфортом температури. Розроблена модель може бути використана як інструмент для налаштування параметрів автоматизованих систем керування мікрокліматом і оцінювання їх енергоефективності за різних кліматичних умов.

Ключові слова: автоматизована система, мікроклімат, регулювання температури, гістерезис, математична модель, енергоефективність, Python.

MYKYTIV Yurii, CHYKHIRA Ihor, POLYVANYI Ihor, BOICHUN Viktor

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

STUDY OF THE INFLUENCE OF HYSTERESIS LEVEL ON INDOOR THERMAL COMFORT AND ENERGY CONSUMPTION OF AN AUTOMATED MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM

This article presents the results of the development, implementation, and in-depth investigation of a mathematical model for an automated room temperature control system that utilizes a Hydronic Underfloor Heating (HUH) unit operating under a hysteresis-based control principle. The model was implemented within the Python environment, employing numerical methods to ensure high accuracy in dynamic simulation. Key physical factors rigorously accounted for in the model include: detailed thermophysical properties of the room structure and air mass; heat losses through enclosing structures (walls, windows); the significant thermal inertia of the massive concrete heating floor slab; and the time-varying influence of outdoor temperature as the primary disturbance factor.

The central objective of the investigation was to quantify the impact of the hysteresis bandwidth on key system performance indicators: energy consumption, frequency of actuator cycling, and the resulting level of thermal comfort.

The simulation experiment was conducted over a continuous period of 30 calendar days for each scenario, encompassing typical and distinct seasonal conditions: winter, spring, summer, and autumn. The hysteresis width was systematically varied from a minimal, narrow band of 0.1 °C up to 5.0 °C in precise increments of 0.1 °C. This comprehensive sweep allowed for the construction of complete relationships between the control parameter and the system's dynamic response.

The obtained simulation results clearly demonstrated a critical trade-off: increasing the hysteresis width significantly reduces the number of heater activations, thereby potentially extending the lifespan of the actuator mechanisms. However, this action concurrently leads to an increase in the total operational time of the system and, consequently, a higher overall energy consumption due to less precise regulation. It was established that excessively wide hysteresis bands (e.g., beyond 1.0 °C for most seasons) cause significant indoor temperature fluctuations that exceed acceptable limits, leading to a sharp reduction in occupant thermal comfort.

Based on the detailed analysis, optimal hysteresis ranges were empirically determined for varying climatic conditions, providing the best achievable balance between energy conservation and the maintenance of a stable microclimate:

For winter conditions (high heat loss): $0.6-0.8$ °C. This value effectively compensates for the high thermal inertia of the floor while limiting temperature drift.

For spring and autumn (shoulder season) conditions (moderate heat loss): $0.4-0.5$ °C. A narrower band is required here for faster response to external disturbances and reduced energy overshoot.

The developed mathematical model is a powerful and flexible tool. It can be utilized not only for tuning and optimizing control parameters (such as hysteresis width) of automated microclimate systems but also for predicting and evaluating their energy efficiency under various climatic scenarios during the preliminary design phase.

Keywords: automated system, microclimate, temperature control, hysteresis, mathematical model, energy efficiency, Python.

Стаття надійшла до редакції / Received 30.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 03.12.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Однією з ключових проблем у сучасних автоматизованих системах керування мікрокліматом є підвищене енергоспоживання, спричинене нераціональним регулюванням температури приміщення. В умовах зростання вартості енергоносіїв і вимог до енергоефективності будівель актуальним завданням є пошук способів оптимізації логіки керування системами опалення без зниження рівня теплового комфорту.

У попередніх дослідженнях було створено автоматизовану систему підтримання температури приміщення на базі контролера WAGO 750-8212, що керує теплою водяною підлогою за гістерезисним принципом. Оскільки такий метод передбачає вмикання і вимикання нагрівача в межах певного температурного діапазону, постає питання вибору оптимальної ширини гістерезису. Від цього параметра залежить кількість спрацювань нагрівача, стабільність температури й загальне енергоспоживання системи. Тому доцільним є дослідження, яке дозволяє визначити вплив рівня гістерезису на ефективність роботи автоматизованої системи керування температурою приміщення та встановити оптимальні значення цього параметра для різних сезонних умов.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Підтримання стабільного мікроклімату в приміщеннях є одним із найважливіших чинників, що впливають на комфорт, працездатність і здоров'я людини [1]. Параметри мікроклімату визначаються переважно температурою, вологістю та якістю повітря, які формують відчуття теплового комфорту [2]. Автоматизовані системи клімат-контролю нині використовуються не лише у житлових і офісних приміщеннях, а й у промислових, складських, аграрних і лабораторних об'єктах, де дотримання визначених параметрів мікроклімату має критичне значення для технологічних процесів [3, 8].

Для дослідження теплових процесів у будівлях активно застосовуються спрощені RC-моделі (resistor-capacitor models), які дозволяють описати тепловий баланс приміщення через рівняння енергозбереження з урахуванням теплових втрат та інерційності системи [4, 5]. Такі моделі лежать в основі систем прогнозного та адаптивного керування температурою [6], забезпечуючи можливість швидкої оцінки впливу окремих параметрів на поведінку системи.

У низці сучасних робіт [11, 14] розглянуто удосконалені методи керування температурою, зокрема адаптивні та оптимізовані алгоритми гістерезисного типу, які дозволяють зменшити частоту перемикань виконавчих елементів і підвищити стабільність температури в приміщенні. Однак у даній роботі акцент зроблено на дослідженні ефективності класичного підходу зі сталою шириною гістерезису, який залишається найпоширенішим у практиці керування системами опалення на базі контролерів типу WAGO 750-8212.

Сучасні дослідження також підтверджують важливість використання RC-моделей для моделювання теплових процесів і вказують на доцільність аналізу впливу гістерезису як одного з визначальних параметрів ефективності керування температурою [7].

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою цієї роботи є дослідження впливу рівня гістерезису на енергоспоживання та стабільність роботи автоматизованої системи регулювання температури досліджуваного приміщення, що функціонує за гістерезисним принципом.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Математична модель описує зміну температури повітря в приміщенні під дією теплових надходжень від нагрівача та втрат тепла через огорожувальні конструкції. Її основу становить рівняння теплового балансу, яке відображає закон збереження енергії у вигляді [4]:

$$C \frac{dT_{room}(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{loss}(t)$$

де: $T_{room}(t)$ — температура повітря в приміщенні, °C; C — ефективна теплоємність внутрішнього об'єму приміщення, Дж/°C; $Q_{in}(t)$ — потужність теплового надходження від нагрівача, Вт; $Q_{loss}(t)$ — втрати тепла через огорожувальні конструкції, Вт.

Втрати тепла визначаються різницею температур між внутрішнім і зовнішнім повітрям та пропорційні загальному коефіцієнту теплопередачі приміщення k [9]:

$$Q_{loss}(t) = k(T_{room}(t) - T_{out}(t))$$

де: k — коефіцієнт теплопередачі приміщення, Вт/°C; $T_{out}(t)$ — температура зовнішнього середовища, °C.

Якщо коефіцієнт теплопередачі подати через тепловий опір $R = 1/k$, рівняння теплового балансу набуває класичного вигляду 1R1C RC-моделі, що широко використовується для аналізу температурних процесів у будівлях [4-6]:

$$C \frac{dT_{room}(t)}{dt} = Q_{in}(t) - \frac{T_{room}(t) - T_{out}(t)}{R}$$

У даній моделі потужність теплового надходження від нагрівача враховує інерційність водяної теплої підлоги, через що зміна потужності відбувається не миттєво, а з певною затримкою [10]. При вмиканні нагрівач поступово виходить на максимальну потужність, а після вимкнення повільно охолоджується, ще деякий час віддаючи накопичене тепло. З урахуванням цього теплова потужність $Q_{in}(t)$ визначається залежно від стану нагрівача:

$$Q_{in}(t + \Delta t) = \begin{cases} Q_{in}(t) + \frac{\Delta t}{\tau_{on}} (P_{heat,max} - Q_{in}(t)), & U_{heat}(t) = 1, \\ Q_{in}(t) + \frac{\Delta t}{\tau_{off}} Q_{in}(t), & U_{heat}(t) = 0, \end{cases}$$

де: Δt — крок моделювання (інтервал часу); $P_{heat,max}$ — максимальна потужність нагрівача; τ_{on} і τ_{off} — час розігріву та охолодження нагрівача; $U_{heat}(t)$ — сигнал стану нагрівача (1 — увімкнено, 0 — вимкнено).

Після визначення виразів для $Q_{in}(t)$ та $Q_{loss}(t)$ рівняння теплового балансу набуває прикладного вигляду, що описує зміну температури повітря в приміщенні з урахуванням теплових втрат і динаміки нагрівача [5]. Саме це рівняння використовується для обчислення температури в кожен наступний момент часу, оскільки воно враховує і динаміку нагріву системи, і теплову інерційність будівельних конструкцій [6]. У дискретному вигляді, при часовому кроці Δt (1 хвилина), воно записується так:

$$T_{room}(t + \Delta t) = T_{room}(t) + \frac{\Delta t}{C} \left(Q_{in}(t) - \frac{T_{room}(t) - T_{out}(t)}{R} \right)$$

де: $T_{room}(t + \Delta t)$ — розрахована температура повітря у приміщенні на наступному кроці часу; Δt — крок моделювання (інтервал часу); C — теплова інерційність приміщення; R — тепловий опір між внутрішнім і зовнішнім середовищем.

Цей вираз є основним рівнянням симуляційної моделі, яке дозволяє покроково визначати зміну температури повітря в кімнаті залежно від потужності теплового надходження від нагрівача $Q_{in}(t)$, теплових втрат $Q_{loss}(t)$ та умов зовнішнього середовища.

У моделі не враховуються зміни вологості повітря та вплив сонячного випромінювання, оскільки дослідження зосереджене на динаміці зміни температури. Рівень вологості приймається сталим протягом усього періоду спостереження, що імітує роботу умовної установки підтримання сталої вологості, а сонячне випромінювання не враховується через орієнтацію вікон на затінену сторону будівлі, де прямі сонячні промені відсутні або мають незначний вплив. Такий підхід часто використовується в спрощених моделях RC-типу, коли основним чинником є тепловий баланс приміщення [4].

Додатково для розрахунку теплового опору $R = 1/k$, система обчислює коефіцієнт теплопередачі приміщення k , який характеризує сумарну теплопровідність приміщення в одиницях Вт/°C і показує, яку кількість тепла приміщення втрачає при різниці температур між внутрішнім і зовнішнім середовищем у 1 °C та визначається як сума теплопровідностей основних огорожувальних елементів — стін і вікон:

$$k = U_{wall} \cdot A_{wall} + U_{win} \cdot A_{win}$$

де: U_{wall} — коефіцієнт теплопередачі стіни; U_{win} — коефіцієнт теплопередачі вікна; A_{wall} , A_{win} — площі стін та вікон відповідно.

А максимальна потужність нагрівача $P_{heat,max}$ визначається на основі площі приміщення та питомого коефіцієнта теплової потужності [11]:

$$P_{heat,max} = k_{heat} \cdot L \cdot W$$

де: k_{heat} — коефіцієнт питомої потужності нагрівача; L, W — довжина та ширина приміщення.

обота системи побудована на гістерезисному принципі керування, який базується на порівнянні поточної температури з двома граничними значеннями — температурою ввімкнення та вимкнення нагрівача.

Для заданої користувачем температури приміщення T_{set} і рівня гістерезису h ці межі визначаються так:

$$T_{on}(t) = T_{set} - \frac{h}{2}, \quad \text{нижня межа — температура ввімкнення нагріву,}$$

$$T_{on}(t) = T_{set} + \frac{h}{2}, \quad \text{верхня межа — температура вимкнення нагріву,}$$

Принцип роботи алгоритму полягає у підтриманні температури в межах цього діапазону. Якщо поточна температура $T_{room}(t)$ опускається нижче T_{on} , система вмикає нагрівальний елемент, встановлюючи $U_{heat}(t) = 1$. Коли температура перевищує T_{off} , нагрів вимикається $U_{heat}(t) = 0$. Якщо ж температура перебуває в межах між T_{on} та T_{off} , система зберігає попередній стан нагрівача $U_{heat}(t) = U_{heat}(t - 1)$.

Для проведення моделювання були прийняті узагальнені параметри типового житлового приміщення середнього розміру. Параметри охоплюють геометричні характеристики кімнати, теплотехнічні властивості огорожувальних конструкцій, теплоємність повітряного об'єму, а також налаштування системи опалення. Частина значень відповідає типовим даним, наведеним у літературі [3-5, 13].

Таблиця 1.

Вхідні параметри моделювання теплової динаміки.

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Довжина приміщення	L	6	м
Ширина приміщення	W	3.3	м
Висота приміщення	H	2.5	м
Площа вікна	A_{win}	2.5	м
Коефіцієнт теплопередачі стіни	U_{wall}	1.2	Вт/(м ² · °C)
Коефіцієнт теплопередачі вікна	U_{win}	1.4	Вт/(м ² · °C)
Ефективна теплова ємність приміщення	C	$2 \cdot 10^6$	Дж/°C
Коефіцієнт питомої потужності нагрівача	k_{heat}	60	Вт/м ²
Крок розрахунку	Δt	60	с
Початкова температура в приміщенні	T_{start}	15	°C
Задана температура	T_{set}	20	°C
Час розігріву нагрівача	τ_{on}	900	с
Час охолодження нагрівача	τ_{off}	1800	с

Для оцінки ефективності роботи автоматизованої системи керування температурою використовуються кількісні показники, які відображають як енергетичну ефективність, так і комфорт користувача, що є базовими метриками в енергетичних дослідженнях подібних систем [6, 14]. Ці показники обчислюються під час симуляції та дозволяють визначити оптимальний рівень гістерезису, за якого система забезпечує найкращий баланс між стабільністю температури й енерговитратами.

Основними параметрами є час роботи нагрівача t_{work} , кількість його запусків N_{starts} та стабільність температури S_T . Перші два показники характеризують енергетичну складову: чим довше працює нагрівач і чим частіше він вмикається, тим вищим є енергоспоживання системи.

Стабільність температури, навпаки, відображає рівень теплового комфорту — тобто, наскільки рівномірно підтримується температура повітря без помітних коливань [15]. Висока стабільність означає, що температура змінюється повільно й залишається близькою до заданої, що забезпечує комфортні умови для користувачів.

Показник стабільності S_T визначається як середньоквадратичне відхилення фактичної температури від її середнього значення протягом робочого режиму [15]:

$$S_T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}$$

де: T_i — температура в момент часу i , $\bar{T}$ — середнє значення температури за інтервал спостереження, n — кількість дискретних вимірів.

Менше значення S_T свідчить про стабільніше підтримання температури, тобто про вищий рівень комфорту.

Оскільки кожен із трьох показників має різну фізичну природу і вимірюється в різних одиницях, для їхнього порівняння використовується нормалізація в межах від 0 до 1 [13]:

$$N_i = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

де: X_i — поточне значення показника, а X_{min} і X_{max} — його мінімальне та максимальне значення серед усіх досліджених варіантів гістерезису. Таким чином, $N_i = 0$ відповідає найкращому, а $N_i = 1$ — найгіршому результату для конкретного параметра.

Для комплексної оцінки ефективності системи вводиться інтегральний показник D , який поєднує всі три критерії [13, 14]:

$$D = \sqrt{N_{S_T}^2 + N_{N_{starts}}^2 + N_{t_{work}}^2}$$

Показник D використовується для узагальненої оцінки роботи системи, враховуючи її енергоспоживання та стабільність температури. Менше значення D свідчить про ефективнішу роботу системи — коли температура залишається стабільною, а нагрівач вмикається рідше й на короткий час.

Дослідження проводилося для оцінки впливу рівня гістерезису на роботу автоматизованої системи регулювання температури в приміщенні за різних сезонних умов. У моделі задавалися зовнішні температури T_{out} , що відображають характерні добові зміни протягом 24 годин для зимового, весняного, літнього та осіннього періодів [2]. Задання температур здійснювалося у вигляді погодинних коливань, що імітують природну динаміку зовнішнього середовища, які приведені на рис.1.

Симуляційні розрахунки виконувалися окремо для кожного з чотирьох сезонів року, що дозволило оцінити роботу системи за різних зовнішніх температурних умов. Для кожного сезону послідовно змінювався рівень гістерезису h : початкове значення становило 0.1 °C, після чого воно збільшувалося з кроком 0.1 °C до верхньої межі 5 °C. Такий підхід дав змогу дослідити реакцію системи за різної чутливості регулювання та визначити оптимальний діапазон гістерезису.

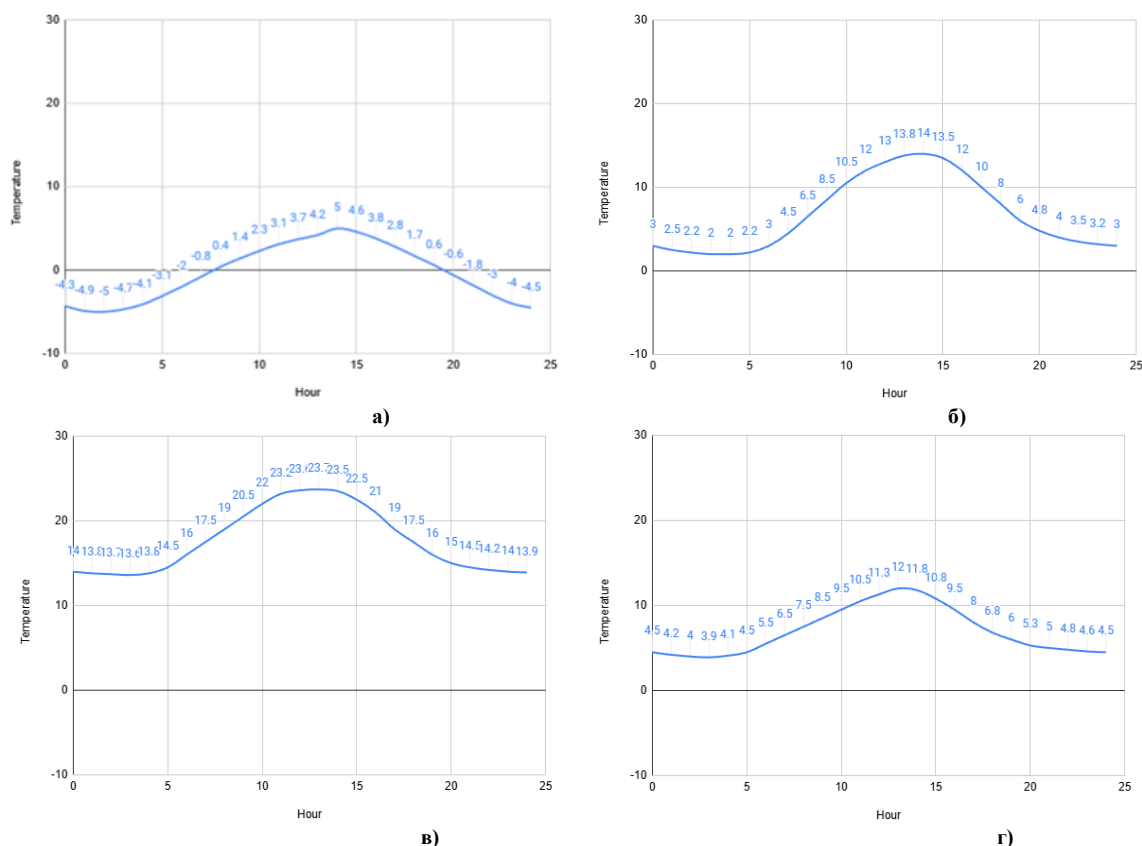


Рис. 1. Зміна зовнішньої температури протягом доби у: а) зимовий період; б) весняний період; в) літній період; г) осінній період

Моделювання виконувалося на часовому інтервалі тривалістю 30 діб, що дозволяло отримати реалістичне відображення теплових процесів у приміщенні. Алгоритм симуляції передбачав послідовне

моделювання кожної доби, де початкова температура нового дня приймалася рівною кінцевій температурі попереднього. Такий підхід забезпечував безперервність теплового режиму протягом усього періоду. Початкова температура першого дня визначалася як задана початкова умова моделі, а результати окремих діб формували сукупну симуляцію тривалістю 30 діб.

На рисунку 2 наведено результати симуляції зміни температури в приміщенні протягом першої доби зимового періоду, які подано для наочного відображення принципу роботи моделі температурного регулювання.

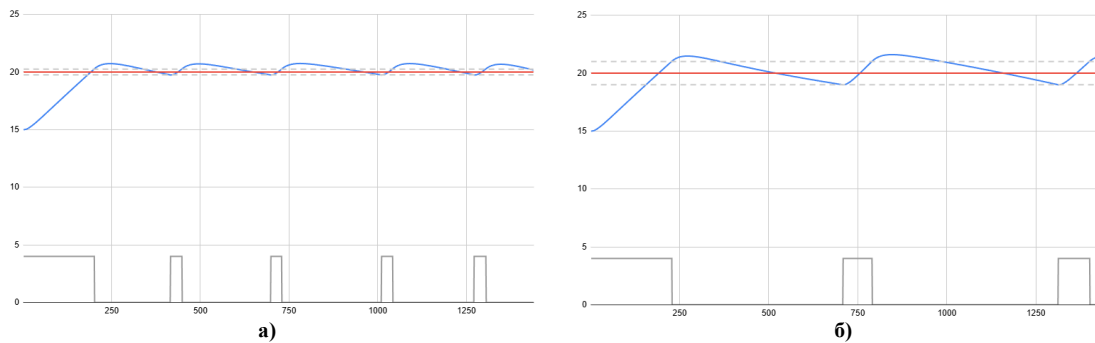


Рис. 2. Графік зміни температури в приміщенні протягом першої доби зимового періоду: а) при рівні гістерезису 0.5 °C; б) при рівні гістерезису 2 °C.

Симуляція літнього періоду проводилася лише з метою перевірки коректності математичної моделі, оскільки в реальних умовах у цей сезон опалення приміщень не здійснюється. Для кожного сезону було побудовано графіки зміни температури та залежності інтегрального показника ефективності D (рис. 3, рис. 4, рис. 5), який поєднує енергоспоживання, кількість вмикань нагрівача та температурну стабільність. Аналіз цих результатів дозволив визначити оптимальне значення гістерезису, що забезпечує найкращий баланс між енергоефективністю та тепловим комфортом у різні пори року.

Оскільки кожна симуляція генерує значний масив даних, для наочності у таблиці 2 наведено лише результати зимового періоду, що відображає роботу системи в умовах максимального теплового навантаження.

Таблиця 2.

Результати симуляції для 30 діб у зимовий період.

h	t_{work}	N_{starts}	S_T	D	h	t_{work}	N_{starts}	S_T	D
0.1	4930	328	0.0917	1.00	2.5	7236	77	0.5627	1.03
0.2	5336	262	0.1370	0.78	2.6	7171	76	0.5761	1.02
0.3	5348	209	0.1679	0.61	2.7	7133	74	0.5899	1.02
0.4	5728	196	0.1964	0.63	2.8	7079	71	0.6060	1.01
0.5	5890	179	0.2210	0.62	2.9	7169	60	0.6096	1.04
0.6	5958	163	0.2436	0.60	3	7381	60	0.6148	1.10
0.7	6274	150	0.2651	0.66	3.1	7488	60	0.6349	1.15
0.8	6138	135	0.2812	0.60	3.2	7367	60	0.6631	1.13
0.9	6329	130	0.3024	0.65	3.3	7434	60	0.6705	1.16
1	6331	120	0.3167	0.64	3.4	7333	60	0.6887	1.14
1.1	6675	120	0.3367	0.76	3.5	7282	60	0.7020	1.14
1.2	6496	114	0.3511	0.70	3.6	7287	52	0.7183	1.15
1.3	6719	111	0.3704	0.78	3.7	7385	56	0.7304	1.19
1.4	6716	105	0.3847	0.78	3.8	7505	55	0.7527	1.24
1.5	6683	99	0.3999	0.77	3.9	7294	54	0.7610	1.19
1.6	6656	90	0.4186	0.77	4	7251	53	0.7762	1.19
1.7	6964	90	0.4303	0.87	4.1	7238	45	0.7977	1.20
1.8	6952	90	0.4487	0.88	4.2	7395	45	0.8024	1.25
1.9	6787	81	0.4633	0.83	4.3	7404	45	0.8250	1.27
2	6882	83	0.4787	0.87	4.4	7471	50	0.8396	1.30
2.1	6872	75	0.4945	0.87	4.5	7514	51	0.8507	1.32
2.2	7068	78	0.5119	0.95	4.6	7566	50	0.8626	1.34
2.3	6908	71	0.5260	0.90	4.7	7621	50	0.8667	1.36
2.4	7119	76	0.5433	0.98	4.8	7494	43	0.8851	1.34
2.5	7236	77	0.5627	1.03	4.9	7540	45	0.9125	1.38
					5	7628	48	0.9278	1.41

Результати симуляцій показали, що рівень гістерезису h істотно впливає на роботу системи. Зі збільшенням гістерезису кількість увімкнень нагрівача зменшується, проте тривалість його роботи зростає, що в підсумку призводить до збільшення енергоспоживання. Одночасно спостерігається зростання амплітуди коливань температури навколо заданої уставки, тобто погіршується стабільність температурного режиму.

У зимовий період (рис. 3), коли різниця між внутрішньою та зовнішньою температурами є

максимальною, система працює в умовах найбільшого теплового навантаження. Значення інтегрального показника ефективності D зменшується від 1 до мінімуму близько 0.6 при гістерезисі в межах $h = 0.6-0.8$ °C, після чого знову поступово зростає. У цьому діапазоні кількість вмикань нагрівача зменшується майже вдвічі порівняно з мінімальним гістерезисом, а стабільність температури залишається на прийнятному рівні $S_T \approx 0.25-0.30$. Отже, для зимового сезону оптимальним є гістерезис близько 0.6-0.8 °C, що забезпечує найкраще співвідношення між енергозбереженням і стабільністю температурного режиму.

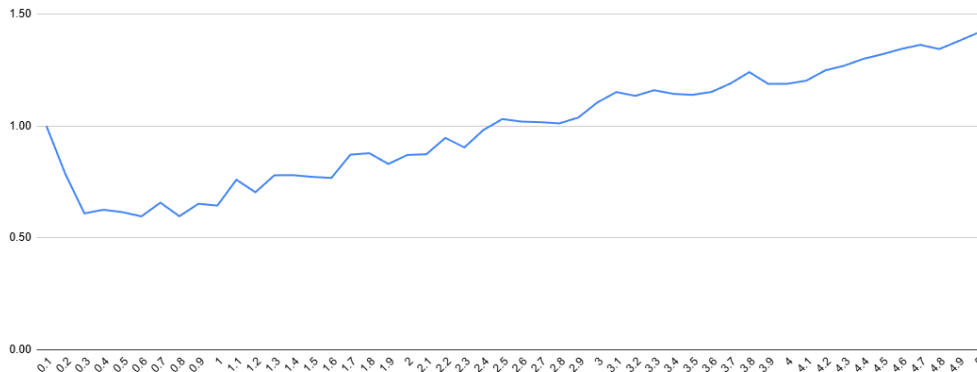


Рис. 3. Графік зміни інтегрального показника ефективності D при різних значеннях гістерезису h для зимового періоду.

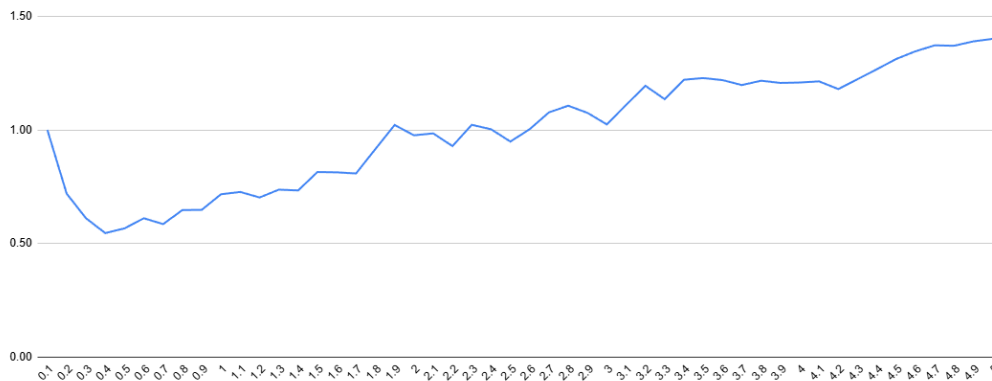


Рис. 4. Графік зміни інтегрального показника ефективності D при різних значеннях гістерезису h для весняного періоду

У весняний період (рис. 4), коли теплове навантаження на систему є помірним, зміна гістерезису впливає на її роботу менш різко, ніж узимку. Із збільшенням гістерезису кількість вмикань нагрівача зменшується майже вдвічі, тоді як сумарний час його роботи дещо зростає. Значення інтегрального показника ефективності D поступово зменшується від 1 до мінімуму близько 0.55 при гістерезисі близько 0.4 °C, після чого починає зростати. У цьому діапазоні стабільність температури зберігається на прийнятному рівні, без різких коливань. Отже, для весняного періоду оптимальним є гістерезис близько 0,4-0,5 °C, який забезпечує найкраще співвідношення між енергоспоживанням і стабільністю температурного режиму.

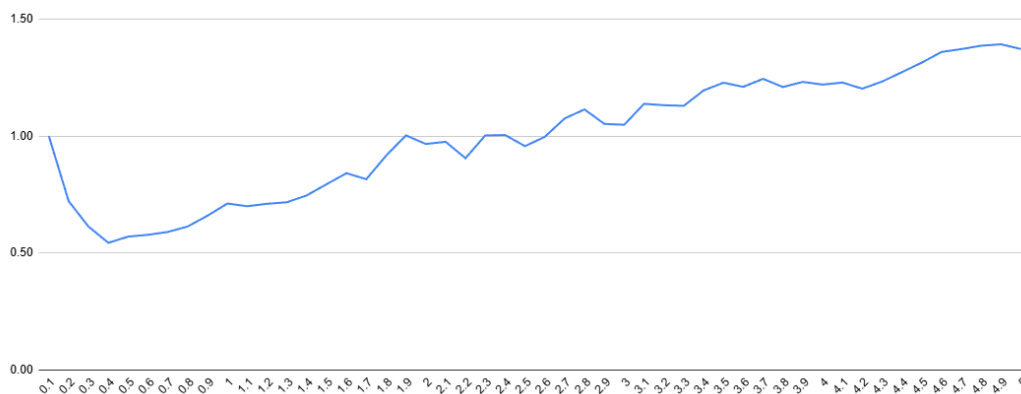


Рис. 5. Графік зміни інтегрального показника ефективності D при різних значеннях гістерезису h для осіннього періоду

У осінній період (рис. 5), коли температура зовнішнього повітря поступово знижується, система працює в умовах середнього теплового навантаження. Значення інтегрального показника ефективності D знижується від 1 до мінімального рівня близько 0.54 при гістерезисі $h \approx 0.4$ °C, після чого починає поступово зростати. У цьому діапазоні температура в приміщенні зберігає достатню стабільність, без значних коливань. Отже, для осіннього періоду оптимальним є гістерезис близько 0,4-0,5 °C, який забезпечує найкраще співвідношення між енергоспоживанням і стабільністю температурного режиму.

Таким чином, результати симуляцій показали, що оптимальний рівень гістерезису системи відрізняється залежно від пори року. У зимовий період найкращі показники досягаються при гістерезисі 0.6–0.8 °C, тоді як навесні та восени — при нижчих значеннях, близько 0.4–0.5 °C. У цих діапазонах спостерігається мінімальне значення інтегрального критерію D , що відображає збалансованість системи за енергоспоживанням, кількістю вмикань нагрівача та стабільністю температури. Загалом оптимальним для дослідженого приміщення є гістерезис у межах 0.4–0.8 °C, що дозволяє підтримувати стабільний і комфортний мікроклімат у приміщенні за мінімальних енергетичних витрат упродовж усього року.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Розроблено математичну модель теплового процесу приміщення у середовищі Python, що враховує вплив зовнішньої температури, теплофізичних характеристик приміщення і гістерезисної логіки керування. Модель дозволяє відтворювати динаміку зміни температури та досліджувати роботу системи за різних кліматичних умов.

Проведено серію симуляцій для зимового, весняного, літнього та осіннього періодів, під час яких змінювався рівень гістерезису від 0.1 до 5 °C з кроком 0.1 °C. На основі отриманих результатів досліджено взаємозв'язок між шириною гістерезису, стабільністю температури та енергоспоживанням системи.

Встановлено, що зі збільшенням гістерезису кількість вмикань нагрівача зменшується, проте тривалість його роботи зростає, що призводить до підвищення енергоспоживання. Надмірно великі значення гістерезису спричиняють збільшення амплітуди коливань температури та зниження стабільності температурного режиму.

Визначено оптимальні діапазони гістерезису для досліджуваного приміщення при різних сезонах: зима — 0.6-0.8 °C, весна та осінь — 0.4-0.5 °C. Такий підхід забезпечує найкраще поєднання енергозбереження та стабільності температури.

Отримані результати підтверджують можливість використання розробленої моделі як інструменту для налаштування параметрів автоматизованих систем керування мікрокліматом і прогнозування їх енергоефективності за різних кліматичних умов.

Література

1. Алгоритми керування кліматичними параметрами житлових комплексів / Микитів Ю., Вербицький О., Бойчун В., Поливаний І. // VII МСНТК, 25-26 квітня 2024 року. — Т. : ТНТУ, 2024. — С. 323–324. — (Хімічна та біоінженерія). URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44958>
2. Babiarz B., Szymański W. Introduction to the Dynamics of Heat Transfer in Buildings. *Energies*. – 2020. – Vol. 13(23). – Art. 6469. – <https://doi.org/10.3390/en13236469>
3. Wetter M., Zuo W., Nouidui T.S. Modeling of Heat Transfer in Rooms in the Modelica “Buildings” Library. Lawrence Berkeley National Laboratory Report. – Berkeley, USA: LBNL, 2011. – 35 p.
4. Boodi A., Beddiar K., Amirat Y., Benbouzid M. Simplified Building Thermal Model Development and Parameters Evaluation Using a Stochastic Approach. *Energies*. – 2020. – Vol. 13(11). – Art. 2899. – <https://doi.org/10.3390/en13112899>
5. Candanedo J.A., Date J., Athienitis A.K. Control-Oriented Modelling of Thermal Zones in a House: A Multi-Level Approach. *Proceedings of the 4th International High Performance Buildings Conference*, Purdue University. – 2016. – Paper 229.
6. Zamani V., Abtahi S., Chen Y., Li Y. Parameter-Input Estimation of RC Thermal Models of Buildings Using Unscented Kalman Filter and Nonlinear Least-Square Method. *Indoor and Built Environment*. – 2024. – Vol. 34(1). – P. 41–75. – <https://doi.org/10.1177/1420326X241270775>
7. Meshcheriakov E. Modelling and Simulation of the Heating System with Hysteresis Control. *Automation and Remote Control*. – 2019. – Vol. 80(4). – P. 678–685. – <https://doi.org/10.1134/S0005117919040136>
8. Васильченко Є. Автоматизована система контролю та керування параметрами мікроклімату у виробничому приміщенні при складанні приладів / Васильченко Є. // VII МСНТК, 25-26 квітня 2024 року. — Т. : ТНТУ, 2024. — С. 269–271. — (Хімічна та біоінженерія). URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44922>
9. ISO 6946:2017. Building Components and Building Elements — Thermal Resistance and Thermal Transmittance — Calculation Methods. – Geneva: International Organization for Standardization, 2017. – 35 p.
10. Kim M., Park H., Hong T. Development of a Simplified Building Thermal Model for Control Applications. *Applied Energy*. – 2019. – Vol. 253. – Art. 113539. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113539>

11. Abdelsalam A., Zhou D., Fang X. On/Off Hysteresis Control Strategies for Radiant Floor Heating Systems. *Energy and Buildings*. – 2018. – Vol. 167. – P. 310–322. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.045>
12. Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. A Review on Buildings Energy Consumption Information. *Energy and Buildings*. – 2008. – Vol. 40(3). – P. 394–398. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
13. Fong K.F., Hanby V.I., Chow T.T. HVAC System Optimization for Energy Management. *Energy and Buildings*. – 2006. – Vol. 38(3). – P. 220–231. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.001>
14. Babiarz B. Thermal Dynamics and Optimization of Heating Power in Residential Buildings. *Energies*. – 2021. – Vol. 14(5). – Art. 1180. – <https://doi.org/10.3390/en14051180>
15. ISO 7730:2005. Ergonomics of the Thermal Environment — Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices. – Geneva: International Organization for Standardization, 2005. – 62 p.

References

1. Mykytiv Y., Verbytskyi O., Boichun V., Polyvanyi I. (2024) Alhorytmy keruvannia klimatychnymy parametramy zhytlovykh kompleksiv [Algorithms for controlling climate parameters of residential complexes]. VII MCNTK (Tern., 25-26 April 2024), pp. 323-324 [in Ukrainian]. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44958>
2. Babiarz B., Szymański W. Introduction to the Dynamics of Heat Transfer in Buildings. *Energies*. – 2020. – Vol. 13(23). – Art. 6469. – <https://doi.org/10.3390/en13236469>
3. Wetter M., Zuo W., Nouidui T.S. Modeling of Heat Transfer in Rooms in the Modelica “Buildings” Library. Lawrence Berkeley National Laboratory Report. – Berkeley, USA: LBNL, 2011. – 35 p.
4. Boodi A., Beddiar K., Amirat Y., Benbouzid M. Simplified Building Thermal Model Development and Parameters Evaluation Using a Stochastic Approach. *Energies*. – 2020. – Vol. 13(11). – Art. 2899. – <https://doi.org/10.3390/en13112899>
5. Candanedo J.A., Date J., Athienitis A.K. Control-Oriented Modelling of Thermal Zones in a House: A Multi-Level Approach. *Proceedings of the 4th International High Performance Buildings Conference*, Purdue University. – 2016. – Paper 229.
6. Zamani V., Abtahi S., Chen Y., Li Y. Parameter-Input Estimation of RC Thermal Models of Buildings Using Unscented Kalman Filter and Nonlinear Least-Square Method. *Indoor and Built Environment*. – 2024. – Vol. 34(1). – P. 41–75. – <https://doi.org/10.1177/1420326X241270775>
7. Meshcheriakov E. Modelling and Simulation of the Heating System with Hysteresis Control. *Automation and Remote Control*. – 2019. – Vol. 80(4). – P. 678–685. – <https://doi.org/10.1134/S0005117919040136>
8. Vasylychenko Y. (2024) Avtomatyzovana systema kontroliu ta keruvannia parametramy mikroklimatu u vyrobnychomu prymyshchenni pry skladanni pryladiv [Automated system of control and management of microclimate parameters in the production room during device assembly]. VII MCNTK (Tern., 25-26 April 2024), pp. 269-271 [in Ukrainian] URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44922>
9. ISO 6946:2017. Building Components and Building Elements — Thermal Resistance and Thermal Transmittance — Calculation Methods. – Geneva: International Organization for Standardization, 2017. – 35 p.
10. Kim M., Park H., Hong T. Development of a Simplified Building Thermal Model for Control Applications. *Applied Energy*. – 2019. – Vol. 253. – Art. 113539. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113539>
11. Abdelsalam A., Zhou D., Fang X. On/Off Hysteresis Control Strategies for Radiant Floor Heating Systems. *Energy and Buildings*. – 2018. – Vol. 167. – P. 310–322. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.045>
12. Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. A Review on Buildings Energy Consumption Information. *Energy and Buildings*. – 2008. – Vol. 40(3). – P. 394–398. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
13. Fong K.F., Hanby V.I., Chow T.T. HVAC System Optimization for Energy Management. *Energy and Buildings*. – 2006. – Vol. 38(3). – P. 220–231. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.001>
14. Babiarz B. Thermal Dynamics and Optimization of Heating Power in Residential Buildings. *Energies*. – 2021. – Vol. 14(5). – Art. 1180. – <https://doi.org/10.3390/en14051180>
15. ISO 7730:2005. Ergonomics of the Thermal Environment — Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices. – Geneva: International Organization for Standardization, 2005. – 62 p.