

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-85-55>

УДК 681.513:004.89:697.9

МОРОЗ Ігор

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0004-9241-5859>

e-mail: igor3003moroz@gmail.com

ЮХИМЧУК Марія

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8131-9739>

e-mail: umc1987@vntu.edu.ua

НЕЧІТКІ РЕГУЛЯТОРИ ЗАМІСТЬ КЛАСИЧНИХ PID-РЕГУЛЯТОРІВ В СИСТЕМАХ ОПАЛЕННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ

У статті розглядається задача підтримання стабільного температурного режиму у виробничих приміщеннях, що є ключовим чинником забезпечення ефективності технологічних процесів, енергоефективності та безпеки персоналу. Традиційні пропорційно-інтегрально-диференціальні (PID) регулятори широко застосовуються для керування мікрокліматом, проте їх ефективність обмежується інерційністю повітряного середовища, значними тепловими навантаженнями обладнання та змінами зовнішніх умов. Запропоновано використання нечіткого PID-регулятора, який поєднує класичну структуру регулювання з апаратом нечіткої логіки. Побудовано математичну модель теплового режиму приміщення, розроблено архітектуру нечіткого PID-регулятора та виконано моделювання. Порівняння з класичним PID-регулятором показало зменшення інтегральних показників похибки на 10-15%.

Ключові слова: виробничі приміщення, нечіткий PID-регулятор, нечітка логіка, автоматизація, енергозбереження, мікроклімат.

MOROZ Ihor, YUKHYMCHUK Mariia

Vinnitsia National Technical University

FUZZY CONTROLLERS INSTEAD OF CLASSICAL PID CONTROLLERS IN HEATING, VENTILATION, AND AIR CONDITIONING SYSTEMS OF INDUSTRIAL PREMISES

Maintaining a stable microclimate in industrial premises is a critical factor that directly affects the efficiency of technological processes, energy consumption, and personnel safety. Temperature control in production environments is particularly important because significant deviations from optimal conditions can lead to deterioration in product quality, equipment malfunction, and reduced worker productivity. Traditional proportional-integral-derivative (PID) controllers are widely used in heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems due to their simple structure and well-established theoretical background. However, their effectiveness is often limited in real industrial environments where thermal processes are characterized by high inertia, nonlinear dynamics, and significant external disturbances. Variations in outdoor temperature, solar radiation, internal heat gains from equipment and personnel, and unpredictable airflow patterns complicate the control process and reduce the efficiency of classical PID regulators.

This paper investigates the possibility of improving temperature regulation in industrial HVAC systems through the use of fuzzy logic control. A fuzzy PID controller is proposed that combines the classical PID structure with a fuzzy inference mechanism capable of dynamically adjusting controller parameters. The proposed approach allows the control system to adapt to changing environmental conditions and nonlinear characteristics of the controlled object. A mathematical model of the thermal regime of an industrial room was developed based on heat balance equations, taking into account internal and external heat flows. The architecture of the fuzzy PID controller was designed using two input variables: the temperature error and the rate of change of this error.

Simulation modeling was carried out in the MATLAB/Simulink environment to evaluate the performance of the proposed controller. The results of the simulation were compared with those obtained using a classical PID regulator. The comparison demonstrated that the fuzzy PID controller provides faster stabilization of the temperature regime, reduces overshoot during transient processes, and improves the stability of the control system under changing external conditions. In particular, the integral error indicators were reduced by approximately 10-15%, indicating improved regulation accuracy and energy efficiency.

The obtained results confirm the effectiveness of combining fuzzy logic with classical PID control for HVAC systems in industrial premises. The proposed approach can be applied to modern automated climate control systems and may contribute to improved energy efficiency, increased operational reliability, and enhanced comfort conditions in industrial environments.

Keywords: production facilities, fuzzy PID controller, fuzzy logic, automation, energy saving, microclimate.

Стаття надійшла до редакції / Received 04.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 16.02.2026

Опубліковано / Published 05.03.2026



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/)

© Мороз Ігор, Юхимчук Марія

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

Ефективне функціонування сучасних промислових підприємств значною мірою залежить від підтримки стабільного мікроклімату у виробничих приміщеннях. Контроль температури є критичним

чинником, що визначає ефективність технологічних процесів, забезпечує енергозбереження та безпеку праці персоналу. Надмірні температурні відхилення можуть спричинити погіршення якості продукції, наприклад, у фармацевтичній чи харчовій промисловості, а також призвести до теплових деформацій обладнання у машинобудуванні, що знижує точність обробки деталей. Окрім того, оптимальний мікроклімат має безпосередній вплив на продуктивність та самопочуття працівників.

Традиційні пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори є найпоширенішим рішенням для систем керування мікрокліматом, що пояснюється простотою їх реалізації та відпрацьованою математичною базою. Проте, їх ефективність суттєво обмежується специфічними особливостями об'єкта керування. Теплові процеси у великих виробничих приміщеннях характеризуються значною інерційністю, оскільки вони мають велику теплоємність і повільно реагують на зміни керуючого сигналу. Додаткові труднощі створюють неконтрольовані зовнішні збурення, такі як коливання температури навколишнього середовища та сонячна радіація, а також внутрішні чинники, зокрема тепловиділення від працюючого обладнання та персоналу [1]. Всі ці фактори створюють складну, нелінійну та багатоканальну систему, для якої побудова точної математичної моделі є вкрай складним завданням [3]. У таких динамічних умовах налаштування класичних ПІД-регуляторів, що базуються на фіксованих коефіцієнтах, стає неефективним. Методи налаштування, такі як Циглера-Ніколса, часто виявляються недостатніми, що призводить до нестабільного температурного режиму, тривалих перехідних процесів та підвищеного енергоспоживання.

Таким чином, існує нагальна потреба у розробці більш гнучких та адаптивних алгоритмів керування, здатних ефективно працювати в умовах невизначеності, нелінійності та змінних зовнішніх впливів. Використання нечіткої логіки у поєднанні з класичною структурою ПІД-регулювання є одним з найбільш перспективних підходів.

Сучасні системи керування мікрокліматом стрімко еволюціонують, відходячи від простих двопозиційних та фіксованих ПІД-методів до інтелектуальних рішень [7]. Ключові тенденції у цьому напрямку включають інтеграцію Інтернету речей (ІоТ), штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання [9]. Застосування ІоТ дозволяє збирати в реальному часі дані від бездротових сенсорів, що вимірюють не лише температуру та вологість, а й такі параметри, як кількість людей у приміщенні та рівень летких органічних сполук (ЛОС), що є джерелом «синдрому хворої будівлі» [11].

ШІ-алгоритми та машинне навчання, у свою чергу, використовують ці дані для прогностичного керування, автоматизації та оптимізації [12]. Вони здатні аналізувати моделі споживання енергії, визначати оптимальні режими роботи, а також прогнозувати потенційні несправності обладнання, що дозволяє проводити профілактичне обслуговування. Такі системи можуть навчатися на основі поведінки користувачів та самостійно адаптуватися до змінних умов, що призводить до значного зниження енергоспоживання та підвищення комфорту [4].

У цьому технологічному ландшафті нечіткий логічний регулятор (НЛР) є важливою перехідною технологією. Хоча він не володіє можливостями самонавчання, як, наприклад, алгоритми навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning), він представляє собою потужну, але менш обчислювально вимогливу форму інтелектуального керування. На відміну від класичного ПІД-регулятора, НЛР дозволяє вбудувати евристичні знання та правила, що базуються на досвіді, що робить його ідеальним для нелінійних систем, де точне математичне моделювання є непрактичним. Завдяки цій якості він стає практичним та надійним рішенням для існуючих промислових систем, які можуть бути удосконалені без необхідності повного переналаштування чи створення складної моделі об'єкта керування [1,4].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Основним об'єктом керування в системах мікроклімату промислових підприємств є припливно-втяжні установки (ПВУ). ПВУ — це пристрій, який забезпечує циркуляцію повітря, видаляючи відпрацьоване повітря з приміщення та подаючи свіже, або виконуючи обидві функції одночасно. Типова центральна установка містить безліч компонентів, що керуються контролерами: вентилятори (F1, F2), клапани охолоджувача (C1) та нагрівача (H1), повітряні заслінки. Вони також оснащені різноманітними датчиками для вимірювання параметрів, таких як температура, вологість, рівень вуглекислого газу (CO₂) та об'єм повітря [1].

У залежності від конфігурації, ПВУ можуть змішувати потоки повітря, використовувати рекуператори тепла для теплообміну між ними, а також здійснювати нагрів чи охолодження за допомогою водяних, газових або електричних змійовиків. Ці системи є складними та багатопараметричними. Крім температури, вони впливають на вологість, швидкість руху повітря та його чистоту. Закони теплообміну Ньютона та масообміну Дальтона, а також аналіз теплового та матеріального балансів є основою для математичного опису процесів у таких системах [6]. Ця багатфакторність, разом із суттєвими тепловими навантаженнями від обладнання, робить систему нелінійною і важкою для оптимального керування.

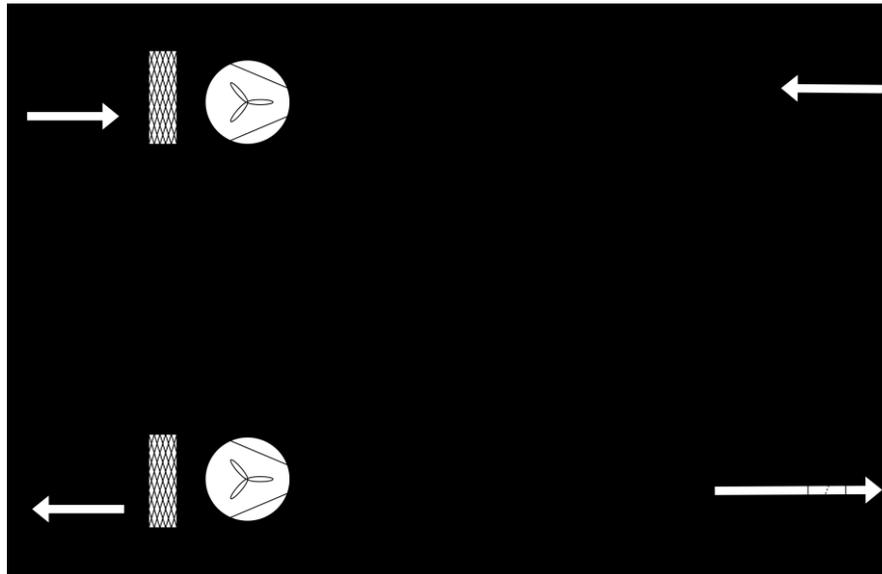


Рис. 1 Загальний вигляд типової припливно-витяжної установки (ПВУ)

Можна припустити, що найбільш вигідним методом, як з точки зору енергоспоживання, так і якості регулювання, є використання плавного керування виконавчими елементами за допомогою ПІД-регуляторів і подібних методів безперервного регулювання. У випадку двопозиційного регулювання існують робочі цикли (ненавмисне стрибкоподібне керування), пов'язані з перемиканням виконавчих елементів, які, окрім, наприклад, шуму, що генерується, можуть викликати дискомфорт, наприклад, у вигляді помітних змін температури повітря, що подається [8,11]. У деяких приміщеннях (наприклад, у лікарнях та харчових складах) таке регулювання є неприйнятним через коливання температури в межах одного градуса.

Всі ці фактори, а також розгляд роботи в широкому діапазоні зовнішніх параметрів, за винятком декількох фіксованих робочих точок, робить АНУ нелінійною системою; вона може бути стабільною, але важко керувати нею оптимально.

Принцип дії та обмеження класичних ПІД-регуляторів

Система автоматичного регулювання реагує на зміну або дисбаланс змінної, яку вона контролює, шляхом коригування деяких параметрів системи, щоб повернути систему до бажаного стану. Ключовим компонентом системи є регулятор (рис. 2), який спостерігає за змінами регульованої величини (PV, або технологічна величина) і відповідно змінює стан свого виходу так, щоб регульована величина дорівнювала заданому значенню (SV, або заданому значенню). Вхідним сигналом регулятора є помилка регулювання (e), яка є різницею між заданим значенням (SV) і поточним значенням в системі (PV). Таким чином, це замкнутий контур регулювання, а характер і час реакції регулятора залежить від його типу і налаштувань. Принципи керування замкнутим контуром і робота ПІД-регуляторів є основою промисловості, їх викладають у всіх інженерних школах, а їх детальний опис широко доступний в літературі [10,11].

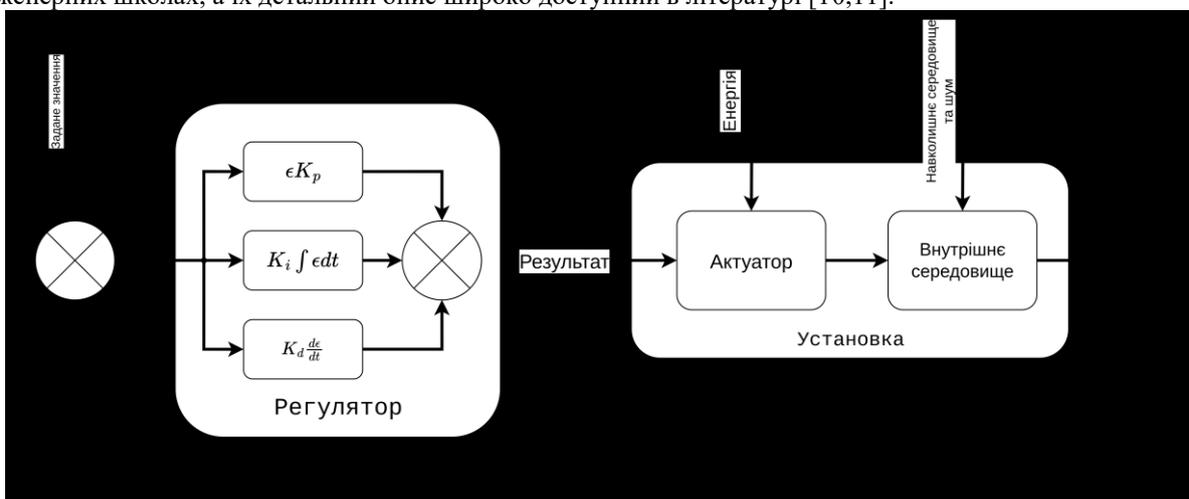


Рис. 2 Схема керування класичного ПІД-регулятора

PID-регулятори є найбільш поширеним рішенням для багатьох секторів, таких як промисловість, автоматизація будівель, автомобільна промисловість тощо. Внутрішня структура контролера може бути різноманітною, але найпоширенішою і найчастіше використовуваною є схема, показана на рисунку 3. Вона відома як паралельна схема і може бути представлена рівнянням 1:

$$output(t) = K_p \epsilon(t) + K_i \int_0^t \epsilon(t) dt + K_d \frac{d\epsilon(t)}{dt} \quad (1)$$

де t - час, а ϵ - похибка регулювання, яка визначається як різниця між заданим значенням SV та поточним значенням процесу PV ; K_p , K_i , K_d - коефіцієнти підсилення (пропорційний, інтегральний, диференціальний).

Правильний вибір цих коефіцієнтів підсилення має вирішальне значення для коректної роботи системи автоматичного керування в будь-якій галузі. Налаштування ПІД-регуляторів загалом все ще залишається складною проблемою. У літературі та інженерних довідниках [6,11] можна знайти численні традиційні методи налаштування, такі як аналітичні методи, засновані на моделі системи, евристичні методи, засновані на правилах, такі як Циглера-Ніколса, Коена-Куна або метод затухаючих коливань, які, як правило, вимагають певних експериментів на працюючій системі за участю досвідченого оператора системи або інженера з автоматизації. Також широко використовуються методи частотних характеристик, а іноді - обчислювальний інтелект, FL, еволюційні алгоритми та PSO [5, 13]. Незважаючи на свою популярність, ПІД-регулятори мають суттєві обмеження в умовах керування промисловим мікрокліматом. Основна проблема полягає в їхній фіксованій архітектурі, що не дозволяє адаптуватися до динамічних умов.

Концепція та застосування нечіткої логіки в задачах керування

Нечітка логіка, концепція якої була введена Лотфі Заде у 1960-х роках, є узагальненням класичної двозначної булевої логіки на багатозначну, що дозволяє працювати з невизначеністю. Замість бінарного «так/ні» вона оперує «ступенем належності» до певної множини. Цей підхід дозволяє перетворити евристичні знання, виражені природною мовою, на обчислювальний алгоритм, що робить його особливо цінним для керування системами, для яких важко побудувати точну математичну модель [1].

Процес керування, що базується на нечіткій логіці, складається з трьох основних етапів:

- Фазифікація: Перетворення чітких, вимірних значень (наприклад, температури в 25.5°C) на нечіткі значення, що описують їх ступінь належності до лінгвістичних множин (наприклад, «тепло», «дуже тепло»).
- Нечітке виведення: Застосування до фазифікованих даних бази правил «ЯКЩО-ТО» для визначення ступеня активації нечітких вихідних сигналів. Ця база правил є ядром системи, яке кодує логіку керування.
- Дефазифікація: Перетворення нечітких вихідних значень назад у чіткі керуючі сигнали, які можуть бути застосовані до виконавчих механізмів (наприклад, «збільшити потужність охолоджувача на 15»).

Нечітке керування успішно застосовується у різних галузях промисловості, де традиційні методи не є ефективними. Наприклад, його використовують для керування потоками повітря в медичних вентиляторах, у виробництві кальцинованої соди, а також для автоматичного охолодження шпинделя верстатів із ЧПК [12]. Ці приклади підтверджують здатність нечіткої логіки ефективно працювати в умовах нелінійності та змінних збурень, роблячи її надійним та практичним підходом для вирішення складних завдань керування.



Рис. 3 Етапи процесу нечіткого керування

Математична модель теплового режиму приміщення

Хоча нечіткі регулятори не вимагають ідеальної математичної моделі, для верифікації та моделювання ефективності необхідна певна спрощена модель об'єкта керування [1]. Модель теплового режиму приміщення може бути побудована на основі рівняння теплового балансу [12]. Основними

компонентами цього рівняння є: тепло, що витрачається на нагрівання або охолодження повітря, теплові втрати через огорожувальні конструкції (стіни, дах, вікна), втрати на інфільтрацію (проникнення повітря ззовні), та надходження тепла від внутрішніх джерел (люди, обладнання, освітлення).

Деталізована розробка точних математичних моделей, що враховують всі фізичні та термодинамічні процеси, є надзвичайно складним і ресурсомістким завданням. Як показує методологія моделювання, що використовується, наприклад, в аерокосмічній галузі, це вимагає ретельного визначення термодинамічних властивостей матеріалів, розбиття геометрії об'єкта на сітки (мешування), визначення граничних умов та розрахунку теплових навантажень. Така складність підтверджує, що для більшості практичних застосувань у промисловості використання адаптивних, заснованих на правилах алгоритмів, є набагато більш прагматичним рішенням, ніж спроба побудувати ідеальну фізичну модель.

Синтез структури нечіткого PID-регулятора

Запропонований у даному дослідженні нечіткий PID-регулятор являє собою гібридний підхід, який поєднує класичну структуру керування з адаптивним апаратом нечіткої логіки. Основна ідея полягає в тому, що нечітка логіка не генерує керуючий сигнал безпосередньо, а динамічно коригує коефіцієнти підсилення (K_p , K_i , K_d) класичного PID-регулятора в реальному часі. Це дозволяє регулятору адаптуватися до змінних умов, зберігаючи при цьому переваги перевіреного алгоритму PID [14].

На вхід регулятора подаються задане значення (SV) та значення процесу (PV), на основі яких обчислюється похибка керування (ϵ). Відповідно до структури, нечітка система має два входи: похибка керування (ϵ) та її зміна ($\Delta\epsilon$). Ці змінні були обрані як базові для керування, оскільки вони дозволяють системі враховувати не лише поточне відхилення від заданого значення, а й тенденцію його зміни, що є критично важливим для передбачення та уникнення коливань [7].

Для фазифікації вхідних сигналів (ϵ та $\Delta\epsilon$) було обрано сім лінгвістичних множин. Цей вибір є компромісом між деталізацією керування та обчислювальною складністю. Кожна множина має відповідну лінгвістичну мітку та ступінь належності, що описує її стан:

- NB (Negative Big) — велике від'ємне
- NM (Negative Medium) — середнє від'ємне
- NS (Negative Small) — мале від'ємне
- Z (Zero) — нульове
- PS (Positive Small) — мале додатне
- PM (Positive Medium) — середнє додатне
- PB (Positive Big) — велике додатне

ФЛК з внутрішньою схемою, показаною на рисунку 4, було підібрано, спираючись на різноманітні підходи, доступні в літературі [3,8,9], та власні експерименти. На регулятор подається задане значення (SV) і значення процесу (PV) від датчика температури в приміщенні, на основі яких обчислюється похибка регулювання ϵ , яка є базовим вхідним сигналом. Дельта похибки регулювання $\Delta\epsilon$ ($1xv$) обчислюється з інтервалом в одну хвилину. Такий проміжок часу є достатнім для того, щоб досягти реакції на події в приміщенні (прихід великої кількості людей, відчинення вікна), одночасно уникаючи недоліків контролерів із D-компонентом, які надмірно реагують на шуми вимірювання чи короткочасні збурення.

Обидва чіткі вхідні сигнали ϵ та $\Delta\epsilon$ ($1xv$) фазифікуються за допомогою семи нечітких множин (від'ємне велике, від'ємне середнє, від'ємне мале, нуль, додатне мале, додатне середнє, додатне велике) з відповідними ступенями належності: $\mu(NB)$, $\mu(NM)$, $\mu(NS)$, μZ , μPS , μPM , μPB . На основі бази правил визначаються вихідні лінгвістичні оцінки, які після дефазифікації формують корекційний сигнал.

На відміну від класичного нечіткого регулятора, цей сигнал не використовується безпосередньо для керування виконавчим механізмом. Він застосовується для динамічного налаштування коефіцієнтів K_p , K_i та K_d у структурі PID-регулятора. Таким чином, нечітка логіка виконує роль адаптивного модуля, який змінює параметри класичного регулятора залежно від поточної похибки й тенденції її зміни. Це поєднує переваги традиційного PID-алгоритму (стабільність, відпрацьована теорія) із гнучкістю нечіткої логіки, що забезпечує більш стійке та ефективне керування мікрокліматом у приміщенні.

Структурна схема запропонованого регулятора:

- база правил, приклад правила, прочитаного лінгвістично
- внутрішня структура;
- форми функцій приналежності для вхідних сигналів ϵ і $\Delta\epsilon$.

Процес виведення у цій моделі складається з наступних кроків:

- виконання операції мінімуму $\min()$ для ступенів приналежності на кон'юнкторах "I" для правил;
- виконання операції максимуму $\max()$ як оператора об'єднання результатів виведення, отриманих за окремими правилами.

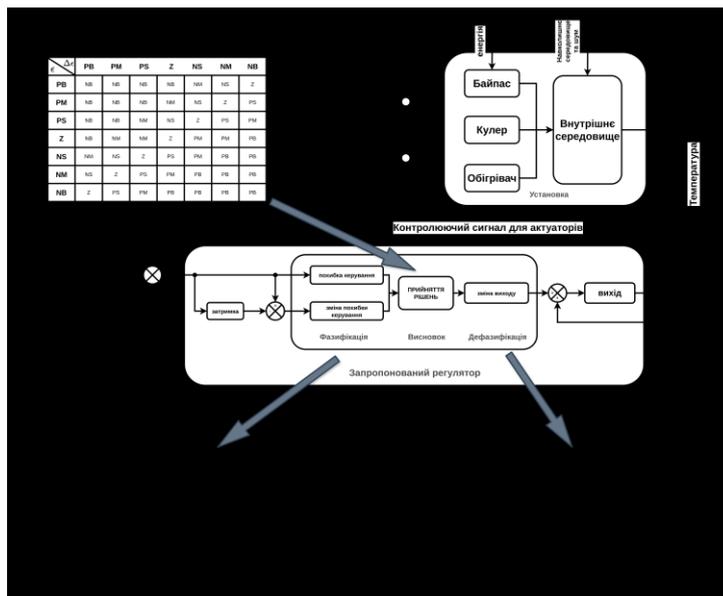


Рис. 4 Запропонований тип fuzzy-регулятора

Було використано трикутну функцію належності. Як зазначалося вище, ширина функції належності визначається користувачем і є єдиним параметром, що налаштовується. За замовчуванням вона дорівнює 2° С. Зміна ширини опосередковано впливає на динаміку контролера: наприклад, зменшення цього значення при постійній похибці керування е призведе до швидшого спрацювання входу. У процесі оцінки правил висновки агрегуються за допомогою операції max(). Дефазифікатор використовує метод центроїду (COA).

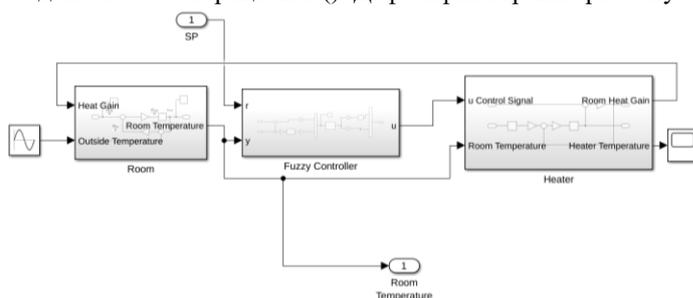


Рис. 5 Структурна схема моделі в Simulink

Модель зображена у вигляді блок-схеми керування в середовищі Simulink. Блок SP (SetPoint) задає бажане значення температури, із якого формується помилка регулювання. Нечіткий контролер обробляє помилку та її зміну згідно з нечіткими правилами, генеруючи вихідний сигнал. Цей сигнал надходить до виконавчого елемента – блоку Heater, який змінює тепловий потік у приміщення. Блок Room моделює динаміку приміщення з його тепловою інерцією: він отримує теплову потужність від нагрівача і видає актуальну температуру. Операція «зворотного зв'язку» реалізована через порівняння поточної температури (модель Room) і заданого значення SP – контролер намагається звести цю різницю до нуля. Таким чином, схема ілюструє замкнутий цикл регулювання: відхилення температури обробляється нечітким PID-регулятором для генерації керуючого впливу на нагрівач.

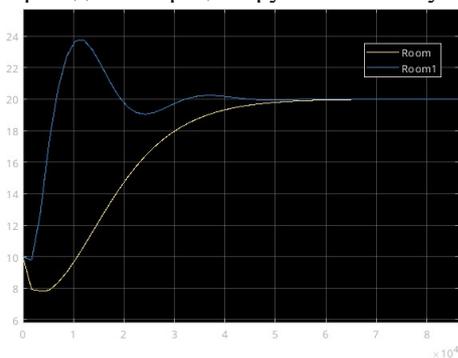


Рис. 6 Порівняльний аналіз роботи регуляторів

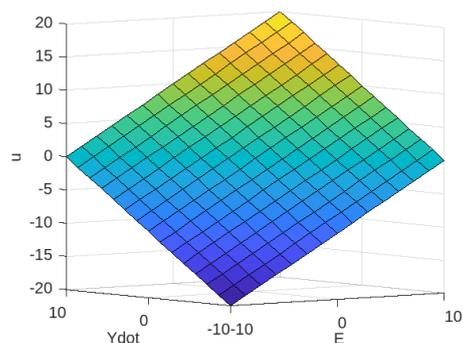


Рис. 7 База правил нечіткого регулятора

Реакція температури кімнати під керуванням PID та Fuzzy-PID. На графіку показано зміну температури приміщення (ось Y) від часу (ось X) у двох випадках керування. Дві криві (позначені Room і Room1) відповідають двом алгоритмам: один – класичний ПД-регулятор, інший – нечіткий ПД-регулятор. Як видно, нечіткий PID-контролер забезпечує швидше виходження на встановлену температуру з меншим перехідним коливанням, тоді як традиційний ПД-регулятор реагує повільніше і має більш виражені коливання. Цей порівняльний графік ілюструє більшу ефективність нечіткого методу.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Дана робота має характер методичної пропозиції, і її практичне впровадження потребуватиме врахування додаткових факторів, що не були повністю охоплені в рамках імітаційного моделювання. Перспективи подальших досліджень можуть бути зосереджені на наступних напрямках:

– Багатозонне керування: враховуючи, що промислові будівлі часто складаються з кількох зон з різними температурними режимами та внутрішніми навантаженнями, майбутні роботи можуть бути присвячені розробці багатозонної системи керування. Це вимагатиме не лише локального регулювання, але й координації роботи між окремими зонами.

– Інтегроване керування вологістю: Для створення ідеального мікроклімату необхідно керувати не лише температурою, а й вологістю повітря. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на створенні гібридного нечіткого регулятора, що одночасно оптимізує температуру та вологість на основі даних, що надходять від відповідних датчиків.

– Інтеграція з IoT та ШІ: Майбутні системи керування мікрокліматом будуть значною мірою залежати від інтеграції з Інтернетом речей. Це дозволить враховувати вхідні дані від великої кількості сенсорів (температура, вологість, освітлення, рівень CO₂, заповнюваність приміщення). Фреймворк нечіткої логіки є розширюваним для включення цих додаткових вхідних даних, що дозволить створити цілісну, адаптивну систему управління мікрокліматом.

References

1. A D S., lingam M. R., radha B. A. A Comprehensive Study on Fuzzy Inference System and its Application in the field of Engineering. International Journal of Engineering Trends and Technology. 2017. Vol. 54, no. 1. P. 36–40. URL: <https://doi.org/10.14445/22315381/ijett-v54p206>
2. Billanes J. D., Ma Z. G., Jørgensen B. N. Data-Driven Technologies for Energy Optimization in Smart Buildings: A Scoping Review. Energies. 2025. Vol. 18, no. 2. P. 290. URL: <https://doi.org/10.3390/en18020290>
3. Chojceki A., Ambroziak A., Borkowski P. Fuzzy Controllers Instead of Classical PIDs in HVAC Equipment: Dusting Off a Well-Known Technology and Today's Implementation for Better Energy Efficiency and User Comfort. Energies. 2023. Vol. 16, no. 7. P. 2967. URL: <https://doi.org/10.3390/en16072967>
4. Exploring the Comprehensive Integration of Artificial Intelligence in Optimizing HVAC System Operations: A Review and Future Outlook / S. Lu et al. Results in Engineering. 2024. P. 103765. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103765>
5. Gaing Z. L. A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2004. Vol. 19, no. 2. P. 384–391. URL: <https://doi.org/10.1109/tec.2003.821821>
6. Hang C. C., Åström K. J., Ho W. K. Refinements of the Ziegler–Nichols tuning formula. IEE Proceedings D Control Theory and Applications. 1991. Vol. 138, no. 2. P. 111. URL: <https://doi.org/10.1049/ip-d.1991.0015>
7. Homod R. Z. Review on the HVAC System Modeling Types and the Shortcomings of Their Application. Journal of Energy. 2013. Vol. 2013. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1155/2013/768632>
8. Honeywell engineering manual of automatic control for commercial buildings. / ed. by H. Inc. Minneapolis, MN : Honeywell, 1997. 518 p.
9. Mirinejad H., Welch K. C., Spicer L. A review of intelligent control techniques in HVAC systems. 2012 IEEE Energytech, Cleveland, OH, USA, 29–31 May 2012. 2012. URL: <https://doi.org/10.1109/energytech.2012.6304679>
10. PID controllers / ed. by H. Tore, A. K. J. 1934-. 2nd ed. Research Triangle Park, N.C : International Society for Measurement and Control, 1995. 343 p.
11. Practical process control for engineers and technicians / ed. by M. D. 1942-. Amsterdam : Elsevier/Newnes, 2005. 290 p.
12. Provotar A. I., Lapko A. V., Provotar A. A. Fuzzy inference systems and their applications. Cybernetics and Systems Analysis. 2013. Vol. 49, no. 4. P. 517–525. URL: <https://doi.org/10.1007/s10559-013-9537-9>
13. Salem A., Mustafa M., Ammar M. Tuning PID Controllers Using Artificial Intelligence Techniques. The International Conference on Electrical Engineering. 2014. Vol. 9, no. 9th. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.21608/iceeng.2014.30365>
14. Yurkovich S., Passino K. M. A laboratory course on fuzzy control. IEEE Transactions on Education. 1999. Vol. 42, no. 1. P. 15–21. URL: <https://doi.org/10.1109/13.746327>