

# ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

УДК 517.977

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-1-67.1>

**Гук К. Г.**, магістрант кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій  
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара  
ORCID: 0009-0007-7675-203X

## НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ВЕНТИЛЯЦІЇ ОФІСНОГО ПРИМІЩЕННЯ

Проблема якості повітря в замкнених приміщеннях виникає через експлуатацію систем опалення, використання джерел відкритого вогню, дихання людей, розкладання синтетичних матеріалів, а також через потрапляння пилу ззовні і наявність мікроорганізмів. Перевищення допустимих концентрацій може погіршувати самопочуття людини, тому контроль якості повітря є важливим. Традиційні вентиляційні системи не враховують змінюваність умов і не дозволяють гнучко регулювати повітрообмін. Створення сучасних автоматизованих систем вентиляції з використанням обчислювальних технологій та з врахуванням результатів спостереження за параметрами повітря постають науковою проблемою.

Проаналізовано сучасні підходи до керування HVAC системами, які контролюють якість та комфортність повітря в приміщеннях, підтримують параметри повітря відповідно до санітарних норм та дозволяють створювати замкнені системи керування. Розглянуто системи керування на основі теорії нечіткої логіки та нейронних мереж, які дозволяють ефективно керувати параметрами повітря та забезпечувати енергоефективність будівель.

Метою статті є розробка нейроконтролера для системи вентиляції офісного приміщення, що забезпечує автоматизоване керування з урахуванням нестационарної поведінки об'єкта через регулювання швидкості двигуна компресора охолоджувальної системи вентиляції. Нейромережева система керування, що пропонується, використовує принцип інверсного нейрокерування для навчання моделі та забезпечує керування шляхом мінімізації функції похибки. Нейроконтролер побудований у вигляді багатощарової нейронної мережі з сигмоїдними функціями активації. Для аналізу ефективності запропонованого підходу використано набір даних у вигляді часових рядів, що містять вимірювання температури, вологості та концентрації вуглекислого газу. Обчислювальні експерименти з різними варіантами структури нейронної мережі показали ефективність мережі з одним прихованим шаром.

Встановлено, що нейроконтролер швидко реагує на вхідний сигнал, керована вентиляційна система забезпечує нормативну температуру у приміщенні за прийнятний час та без перерегулювання. Порівняння з П-контролером та ПІД-контролером вказує на суттєву перевагу нейроконтролера в забезпеченні точності керування, швидкості реакції на зміни у параметрах повітря та зменшення енергоспоживання.

Ключові слова: моделювання, система вентиляції, керування, нейронна мережа, нейроконтролер.

### **Huk K. G. Neuronetwork control of office room ventilation system**

The problem of air quality in enclosed spaces arises due to the operation of heating systems, the use of open fire sources, human respiration, the decomposition of synthetic materials, the ingress of dust from outside, and the presence of microorganisms. Exceeding permissible concentrations can adversely affect human well-being, making air quality control important. Traditional ventilation systems do not account for changing conditions and do not allow flexible air exchange regulation. The creation of modern automated ventilation systems using computational technologies and considering air parameter monitoring results poses a scientific challenge.

Modern approaches to managing HVAC systems, which control the quality and comfort of indoor air, maintain air parameters according to sanitary standards, and allow for the creation of closed-loop control systems, have been analyzed. Control systems based on fuzzy logic theory and neural networks have been considered, which allow for effective air parameter management and ensure building energy efficiency.

The aim of the article is to develop a neurocontroller for an office ventilation system that provides automated control considering the non-stationary behavior of the object by regulating the compressor motor speed of the ventilation cooling system. The proposed neural network control system uses the principle of inverse neural control for model training and ensures control by minimizing the error function. The neurocontroller is built as a multilayer neural network with sigmoid activation functions. To analyze the effectiveness of the proposed approach, a dataset in the form of time series containing measurements of temperature, humidity, and carbon dioxide concentration was used. Computational experiments with various neural network structures demonstrated the effectiveness of a network with a single hidden layer.

It was established that the neurocontroller responds quickly to input signals, and the controlled ventilation system ensures the standard temperature in the room within an acceptable time and without overshoot. Comparison with P-regulator and PID-regulator indicates a significant advantage of the neurocontroller in ensuring control accuracy, response speed, and reducing energy consumption.

Key words: modeling, ventilation system, control, neural network, neurocontroller.

---

**Постановка проблеми.** У замкнених приміщеннях внаслідок експлуатації систем опалювання, застосування джерел відкритого вогню, дихання людей, розкладання синтетичних речовин, що вивільняються з оздоблювальних полімерних матеріалів (фарб, покриття підлоги, декоративних панелей тощо), меблів, оргтехніки, потрапляння пилу з зовні через відкриті вікна та двері, а також за наявності мікроорганізмів від хворих людей та носіїв мікроорганізмів, якість повітря значно погіршується. В умовах виробництва додатково виникає забруднення пилом та леткими хімічними речовинами, що утворюються в технологічному процесі та виділяються у повітря.

До складу забруднювачів повітря відносять вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), оксид азоту ( $\text{NO}_2$ ), дрібні часточки пилу ( $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ), летючі органічні сполуки (VOC), бактерії та грибки. Особливу небезпеку для здоров'я людини утворюють мікроорганізми, які разом з наявними у повітрі пилом, рідиною та іншими сполуками утворюють бактеріальні аерозолі. А за наявності у приміщенні хворих людей розпилюються краплини рідини, які з часом при висиханні утворюють бактеріальний пил. Наявність бактеріального забруднення повітря може спричинити рознесення інфекційних захворювань, оскільки пил швидко розповсюджується у замкнутому приміщенні.

Перевищення припустимих концентрацій забруднювачів повітря може викликати погіршення самопочуття людини, сенсорні подразнення слизових оболонок тощо. Тому контроль зазначених показників якості повітря відіграє важливу роль для здоров'я людини. Найчастіше для забезпечення оптимальних умов повітрообміну встановлюють вентиляційну систему та розраховують її продуктивність виходячи з показників об'єму приміщення, чинних гігієнічних норм обсягу повітрообміну, функціонального призначення приміщення, кількості осіб, які перебувають в приміщенні одночасно, та видів робіт, що виконуються. Однак такі методи не враховують змінюваність умов у приміщенні та не дозволяють гнучко регулювати параметри повітрообміну. Відкриття вікон та дверей призводить до змін у параметрах температури та вологості повітря, поява у приміщенні інших людей призводить до збільшення концентрації вуглекислого газу, означені фактори суттєво впливають на якість повітря та не можуть бути враховані під час попередніх розрахунків продуктивності вентиляційної системи.

Останнім часом сучасні офісні та житлові приміщення оздоблюються автоматизованими системами вентиляції та кондиціонування повітря для забезпечення безпеки життєдіяльності людини та покращення умов комфорту, тому моделювання систем керування вентиляцією та кондиціонуванням на основі спостережень за параметрами повітря та іншими факторами з використанням сучасних обчислювальних технологій постає як наукова проблема.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Відповідно до Європейської директиви щодо енергоефективності будівель [5] до них висуваються вимоги поліпшення енергетичного функціонування з урахуванням кліматичних та місцевих особливостей, вимоги щодо мікроклімату в приміщеннях. Також висуваються вимоги щодо розробки загальної методологічної схеми обрахунку інтегрованого енергетичного функціонування будівель та керування параметрами їх ефективності.

Більшість з перелічених складових якості та комфортності повітря у приміщеннях можна контролювати та регулювати за допомогою HVAC систем (Heating, Ventilation, & Air Conditioning System), які завдяки керуванню вентиляційним, опалювальним обладнанням та обладнанням кондиціонування дозволяють підтримувати параметри повітря у відповідності до санітарних вимог. Тому значна кількість наукових робіт присвячується моделюванню та розробці таких систем, виявленню шляхів підвищення їхньої ефективності. В роботі [1] наводиться аналіз наявних енергоефективних рішень для пристроїв утилізації теплоти витяжного повітря в системах вентиляції і кондиціонування, що враховує динаміку кліматичних і внутрішніх характеристик експлуатації. Розроблено методику техніко-економічної оцінки енергетичних характеристик активних утилізаторів, що функціонують в умовах відхилень параметрів від проектних значень. Проаналізовано вплив відхилення значень параметрів, зокрема витрати повітря, температури зовнішнього повітря перед утилізатором, температури і вологості витяжного повітря. Проведено порівняльний аналіз способів підвищення енергоефективності систем вентиляції і кондиціонування.

Враховуючи, що математичні моделі систем керування станом повітря у приміщеннях є нелінійними та можуть суттєво відрізнятися для кожної окремої будівлі, для здійснення керування HVAC системами широко застосовуються різні типи контролерів. Найпростіші з них здійснюють регулювання параметрів повітря з використанням операцій увімкнення/вимкнення приладів за інформацією про стан повітря у приміщенні. Застосування такого способу керування призводить до суттєвих коливань параметрів повітря у приміщенні.

Більш складними за будовою, але й більш ефективними є ПІД-контролери [4], які дозволяють побудувати замкнену систему керування та налаштовуються в такий спосіб, щоб відповідати вимогам стабільності, забезпечувати дотримання встановлених значень параметрів, адаптуватись до перехідних процесів, досягати продуктивності регулювання в усталеному стані, зокрема забезпечувати стійкість до збурень та невизначеності умов навколишнього середовища. Труднощі у застосуванні ПІД-контролерів найчастіше викликані відсутністю інформації про характеристики об'єкту керування, нелінійністю та нестационарністю системи, необхідністю налаштовувати параметри контролерів, оскільки невірний вибір коефіцієнтів може призвести до нестабільності всієї системи. Останнім часом до налаштування коефіцієнту пропорційності, інтегрального та диференціального коефіцієнтів контролерів, а також співвідношень між ними застосовуються

методи експериментального налаштування через підключення контролера до об'єкту керування та із застосуванням нейронних мереж. Застосування нейронних мереж для підбору параметрів ПІД-контролера підвищує якість керування через зменшення в динаміці максимального відхилення величини, над якою здійснюється керування, та збільшення декременту загасання перехідного процесу.

Останнім часом розвиваються підходи, що є більш ефективними у порівнянні з традиційними регуляторами та ПІД-контролерами. В системах керування для підбору параметрів керувального впливу широко використовуються сучасні методи обчислень, зокрема еволюційні методи, експертні системи із застосуванням нечіткої логіки, нейронні мережі. Системи керування, що будуються на основі теорії нечіткої логіки та використовують систему нечітких правил без формалізації предметної області у вигляді математичної моделі, дозволяють керувати параметрами повітря та теплового комфорту, створюючи комфортні умови для людини, та водночас дозволяють досягати показників енергоефективності будівлі [3]. Але застосування такого підходу викликає складнощі під час формулювання системи правил, що повинна враховувати особливості впливу кліматичних факторів на параметри повітря.

Перевагами застосування нейронних мереж при побудові систем керування є те, що вони можуть відтворювати нелінійні залежності із заданою точністю, зокрема динаміку процесу керування, під час побудови нейромережевого регулятора не потрібно використовувати складний математичний опис системи керування та математичну модель керованих характеристик повітря [2]. На основі навчальної вибірки, що формується в результаті спостережень за параметрами повітря у приміщенні, відбувається тренування штучної нейронної мережі, а навчена на основі реальних даних мережа здатна генерувати керувальний вплив, що забезпечує наближення параметрів повітря до цільових. Спрямувавши керувальний вплив на вхід системи на поточному етапі керування здійснюється переведення системи з поточного стану в бажаний стан за певний проміжок часу. В такій спосіб здійснюється адаптивне керування нелінійною системою з прогнозуючою компенсацією.

**Мета статті.** Враховуючи актуальність розвитку методів автоматизованого керування, що адаптовані до нестационарної поведінки об'єкту керування, у роботі розглядається задача побудови нейроконтролера для системи вентиляції офісного приміщення.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі:

- здійснити збір та аналіз вхідних даних для роботи системи керування;
- обрати архітектуру нейроконтролера, здійснити навчання моделі;
- дослідити якість керування параметрами повітря у приміщенні.

#### **Виклад основного матеріалу**

**Метод побудови.** Розглядається задача моделювання системи автоматизованого керування процесом вентиляції повітря, що забезпечує досягнення та підтримання нормативних показників температури, вологості та концентрації вуглекислого газу у повітрі приміщення. Вентиляційна система забезпечує приплив зовнішнього повітря у приміщення будівлі. Вимірювання показників повітря здійснюється датчиками, зокрема термометром, психрометром, газоаналізатором  $\text{CO}_2$ . Значення показників повітря залежать від швидкості припливу зовнішнього охолодженого повітря у приміщення, тому через контролювання швидкості його припливу можна підтримувати нормативні значення параметрів повітря. Необхідно розробити систему автоматизованого нейромережевого керування, що здійснює керувальний вплив шляхом регулювання швидкості двигуна компресора охолоджувальної вентиляційної системи та використовує для налаштування виміряні показники якості повітря.

Функцію, що здійснює керувальний вплив на об'єкт керування, можна зобразити у такий спосіб:

$$u(t) = f(Y(t), \dot{Y}(t)),$$

де  $u(t)$  – керувальний вплив в момент часу  $t$ ;  $Y(t)$  – параметри стану повітря після здійснення керувального впливу  $u(t)$ ;  $\dot{Y}(t)$  – нормативні значення параметрів стану повітря.

Нейромережева система керування здійснює керувальний вплив на об'єкт керування з врахуванням похибки керування. Система керування розглядається в дискретному часі з постійним та достатньо малим кроком дискретизації  $t$ . В основу побудови нейроконтролера покладемо принцип інверсного нейрокерування, який полягає в тому, що навчання нейронної мережі відбувається з використанням інформації про поведінку динамічного об'єкту.

Для моделювання поведінки динамічного об'єкту використовується нейронна мережа зі зворотнім зв'язком, яка здатна моделювати залежності у часі та передбачати виходи системи на основі її попередніх станів та вхідних сигналів. Спостереження за значеннями керувальних впливів і відповідних ним станів об'єкту керування дозволяє створити навчальну вибірку для налаштування моделі:

$$X = \{T_i, U_i\},$$

де  $T_i = \{Y(t), S(t-1)\}$ ;  $U_i = u(t)$ ,  $u(t)$  – керувальний вплив в момент часу  $t$ ;  $S(t-1)$  – попередній стан об'єкту керування.

Для здійснення керування нейроконтролер під'єднують до об'єкту в замкненому режимі, на вхід нейроконтролера потрапляє відхилення нормативних значень параметрів стану об'єкту  $Y_{norm}(t+1)$  від відповідних значень параметрів поточного стану  $Y(t)$ . Вихідне значення моделі нейронної мережі  $Y(t)$  є зворотним зв'язком. Генерований керувальний вплив переводить об'єкт керування в стан  $Y(t+1)$  та за даними  $Y(t+1)$ ,

$Y_{norm}(t+1)$  обчислюється помилка у роботі нейроконтролера. Керуючий вихідний сигнал обчислюється шляхом мінімізації помилки та передається на модель системи вентиляції приміщення. В якості критерію навчання було обрано середньоквадратичну помилку імітації:

$$E = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N \left( Y(t) - \hat{Y}(t) \right)^2},$$

де  $N$  – загальна кількість використаних даних.

Нейроконтролер побудовано у вигляді нейронної мережі, яка складалась з вхідного, вихідного та кількох прихованих шарів, що дозволило здійснити апроксимацію складної нелінійної залежності. В якості функцій активації нейронів використано сігмоїдні функції. Навчання нейронної мережі здійснювалось методом зворотного розповсюдження помилки через мінімізацію помилки методом градієнтного спуску в просторі вагових коефіцієнтів нейронів  $w_{ij}$  та біасів  $b_{ij}$  штучної нейронної мережі.

Відповідно до методу градієнтного спуску змінення вагових коефіцієнтів здійснюється в такий спосіб:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \frac{\partial E(k)}{\partial w_{ij}(t)}; \quad b_{ij}(t+1) = b_{ij}(t) + \frac{\partial E(k)}{\partial b_{ij}(t)},$$

де  $E(k)$  – середньоквадратична помилка для  $k$ -ого нейрона мережі.

В разі зростання помилки імітації на контрольній вибірці, навчання завершувалось.

**Числове моделювання та результати розрахунків.** Для аналізу ефективності запропонованого підходу до здійснення керування системою вентиляції використовувався набір даних, що складався з близько 3000 записів у вигляді часових рядів, в яких подано результати вимірювання температури, вологості та концентрації вуглекислого газу для трьох приміщень. Навчання моделі керування здійснювалось з використанням випадково обраних прикладів з навчальної вибірки, що зберігала параметри повітря у перших двох приміщеннях. Данні по третьому приміщенню не використовувались для навчання моделі, їх застосовано для верифікації результатів та перевірки здатності нейронної мережі до узагальнення. Попередньо здійснювалась нормалізація вхідних даних. В розрахунках, що виконано, керування здійснювалось лише для підтримання нормативної температури повітря у приміщенні. Для програмної реалізації нейроконтролера застосовано бібліотеку програмного забезпечення з відкритим кодом для числових розрахунків з використанням графів потоку даних TensorFlow.

Проведено серію обчислювальних експериментів для аналізу розробленого підходу до моделювання системи керування. В результаті обчислювальних експериментів з різними варіантами структури нейронної мережі виявилось, що найбільш ефективною є нейронна мережа, що містить вхідний, вихідний та лише один прихований шар.

Для обраної архітектури нейронної мережі було здійснено розрахунки з використанням даних вибірки. Розглянуто випадок, коли за результатами вимірювання параметрів повітря встановлено, що один з параметрів, що контролюється, а саме температура повітря перевищує нормативну температуру на  $5^{\circ}\text{C}$ . Для імітації процесу керування та перевірки продуктивності нейроконтролера похибку у значенні вимірюваного параметру використано як еталонний вхід. На рис. 1 суцільною лінією наведено результат моделювання виходу за результатами роботи нейроконтролера. З аналізу можна бачити, що нейроконтролер швидко реагує на вхідний сигнал, час встановлення нормативної температури дорівнює близько 10 секунд.

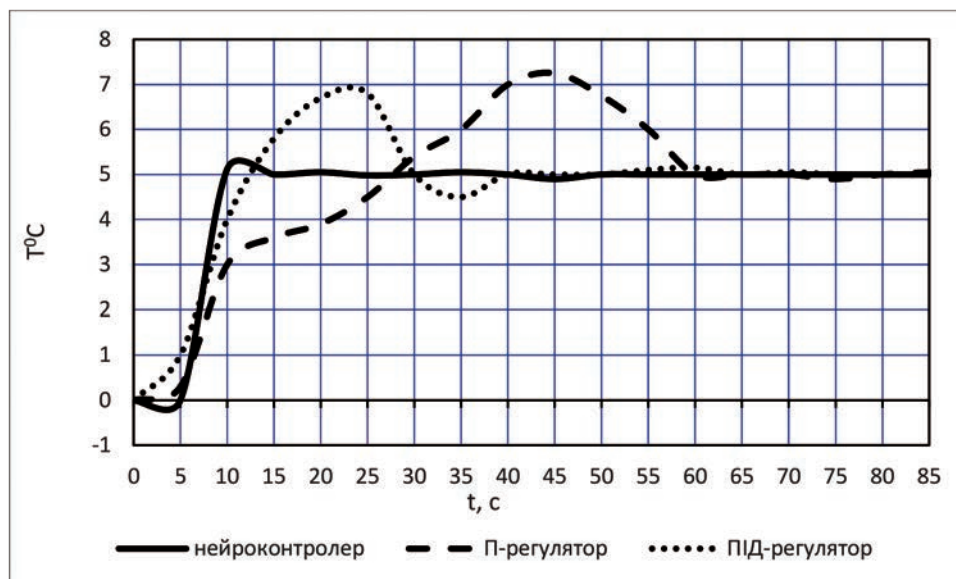


Рис. 1. Реакція виходу системи для різних систем керування



Окрім швидкості відгуку, можна бачити, що у процесі керування не спостерігається перевищення значень показника, що контролюється. Після усталення процесу регулювання відхилення значень температури від нормативних дорівнює нулю. Це вказує на те, що керування має високу швидкість реакції, забезпечує точність керування та дозволяє уникнути перерегулювання.

Для порівняння на рис. 1 наведено результат керування, що здійснюється за допомогою П-контролера (пунктирна лінія) та ПД-контролера (дрібний пунктир). Можна бачити, що П-контролер забезпечує суттєво гіршу якість керування, встановлення нормативного значення показника триває близько хвилини, спостерігається перерегулювання, що призводить до більшого енергоспоживання. Застосування ПД-контролер також не дозволяє досягти плавного регулювання, у порівнянні з нейроконтролером спостерігається більш тривалий перехідний процес, більшим є відхилення по максимальному значенню параметру.

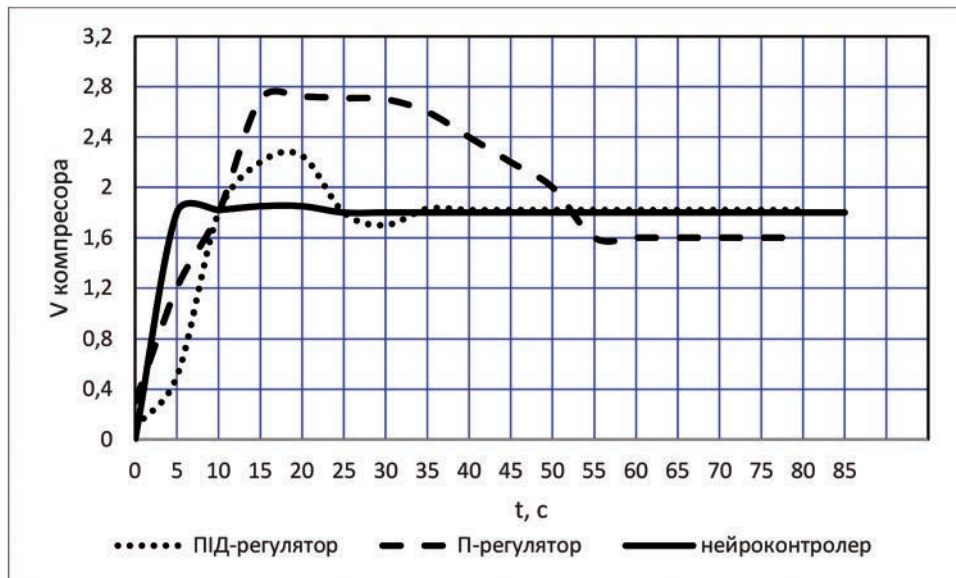


Рис. 2. Симуляція результату керування

На рис. 2 наведено вихідну характеристику П-контролера, ПД-контролера та нейроконтролера. Перехідний процес, що утворюється нейроконтролером, порівнюється з відповідними процесами, що реалізуються звичайними контролерами. З аналізу рис. 2 можна бачити, що нейроконтролер забезпечує кращу продуктивність для керування швидкістю компресора порівняно зі звичайними ПД- та П-контролерами. Реакція нейроконтролера на зміну похибки керування є швидкою та пальною порівняно зі звичайним регуляторами, під керуванням нейроконтролера не спостерігається перевищення, що сприяє зменшенню споживання електроенергії та терміну службі компресора. Таким чином, нейромережевий підхід для створення систем керування параметрами повітря у приміщенні є працездатним та ефективним.

**Висновки.** У роботі застосовано нейромережевий підхід до створення системи керування вентиляційною системою для забезпечення нормативних параметрів повітря у приміщенні. Розглянуто підходи до здійснення керування системами вентиляції та кондиціонування, що спираються на використання звичайних регуляторів та ПД-контролерів, інтелектуальних систем, які засновані на логічних правилах, нейронних мереж. Встановлено, що нейромережевий підхід до створення систем керування здатний відтворювати нелінійні залежності із заданою точністю, враховувати динамічні зміни, що відбуваються з об'єктом керування, та не потребує застосування складних математичних моделей об'єктів, що досліджуються.

Нейроконтролер побудовано у вигляді нейронної мережі із застосуванням навчальної вибірки, що створено за результатами спостереження за параметрами повітря у приміщенні. За результатами обчислювального експерименту обрано структуру нейронної мережі, здійснено перевірку її роботи та досліджено робастність.

Порівняно результати роботи розробленого нейроконтролера з роботою П-контролера, ПД-контролера на прикладі керування температурою середовища. Встановлено, що нейроконтролер забезпечує контроль за спостережуваними параметрами швидко та плавно порівняно зі звичайним регуляторами, під керуванням нейроконтролера не спостерігається перевищення, що сприяє зменшенню споживання електроенергії та терміну службі компресора.

В подальшій перспективі планується дослідити взаємовплив різних параметрів повітря, зокрема температури, відносної вологості,  $\text{CO}_2$ , вмісту пилу, оскільки у реальних будівлях зазначені параметри впливають один на одного, і зміна одного параметра може призвести до зміни інших параметрів. Майбутня робота передбачає розробку стратегії контролю, що враховує взаємозв'язок між параметрами.

---

### Список використаних джерел:

1. Літовко Б. М., Лідер М. Ю. Аналіз способів підвищення енергоефективності систем вентиляції і кондиціонування. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. Випуск 4. с. 47–55. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-47-55>
2. Abida A., Richter P. HVAC control in buildings using neural network. *Journal of Building Engineering*. 2023. Volume 65. 10555865. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105558>
3. Ali M. Baniyounes, Yazeed Yasin Ghadi, Eyad Radwan, Khalid S. Al-Olimat  
Functions of fuzzy logic based controllers used in smart building. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. Vol. 12. № 3. P. 3061-3071. <http://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp3061-3071>
4. Aziz M, Kadir K, Azman HK, Vijyakumar K. Optimization of Air Handler Controllers for Comfort Level in Smart Buildings Using Nature Inspired Algorithm. *Energies*. 2023. 16(24):8064. <https://doi.org/10.3390/en16248064>
5. Energy Performance of Buildings in the Official Journal of the European Communities. Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council // Official Journal L 1. 2003. P. 65-71. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0091>.

### References:

1. Litovko, B. M., & Lider, M. Yu. (2021). Analiz sposobiv pidvyshchennia enerhoefektyvnosti system ventilatsii i kondytsionuvannia. (Analysis of ways to increase the energy efficiency of ventilation and air conditioning systems.). *Visnyk Vinnytskoho Politekhnichnoho Instytutu*, (4), 47–55. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-47-55>
2. Abida, A., & Richter, P. (2023). HVAC control in buildings using neural network. *Journal of Building Engineering*, 65, 105558. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105558>
3. Baniyounes, A. M., Ghadi, Y. Y., Radwan, E., & Al-Olimat, K. S. (2023). Functions of fuzzy logic based controllers used in smart building. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(3), 3061-3071. <http://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp3061-3071>
4. Aziz, M., Kadir, K., Azman, H. K., & Vijyakumar, K. (2023). Optimization of Air Handler Controllers for Comfort Level in Smart Buildings Using Nature Inspired Algorithm. *Energies*, 16(24), 8064. <https://doi.org/10.3390/en16248064>
5. Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings. (2003). *Official Journal of the European Communities*, L 1, 65-71. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0091>.