

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-32>

УДК 621.577.6:697

ВАСИЛЬЧЕНКО Євгеній

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
e-mail: yevhenii20020221@gmail.com

ШЕВЧЕНКО Вадим

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0002-9366-4118>
e-mail: v.v.shevchenko@kpi.ua

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ВИРОБНИЧОГО ПРИМІЩЕННЯ

Розумне управління мікрокліматом у виробничому приміщенні повинно забезпечувати дотримання оптимальної температури та вологості. Проте забезпечення необхідних параметрів мікроклімату вимагає використання великої кількості енергоресурсів, як стають все дорожчими. Тому розроблення систем, які дозволяють більш ефективно використовувати ресурси для регулювання мікрокліматичних параметрів у приміщенні є актуальною задачею на сьогоднішній час. Не дивлячись на велику кількість робіт в галузі розробки систем керування мікрокліматичними параметрами виробничих приміщень є висока необхідність проведення досліджень методів регулювання та створення ефективних систем регулювання мікрокліматичних параметрів, оскільки це прямо впливає на витрати енергоресурсів та якість мікроклімату на виробництві. В даній статті робота була направлена на розробку діючого прототипу системи керування параметрами мікроклімату у виробничому приміщенні, моделюванню та налаштуванню регуляторів та контролера нечіткої логіки для забезпечення оптимальних умов виробничого середовища та економії енергоресурсів. Систему керування реалізовано на базі контролера ESP 32, який володіє необхідним функціоналом для забезпечення роботи та оптимальною вартістю і дозволяє реалізувати процес контролю. Контролер отримує дані з датчиків та на основі їх аналізу виробляє керуючий сигнал. Отримані дані він збирає та відсилає на сервер у хмарне середовище, доступ до якого можна отримати віддалено з мобільних пристроїв. Авторами проведено моделювання роботи системи керування в пакеті Matlab Simulink. Для цього створено та розраховано модель приміщення в системі MathCad. Далі проводили симуляцію роботи системи в двох варіантах виконання: з застосуванням регулятора та контролера нечіткої логіки. Аналіз результатів показав хорошу роботу системи з використанням контролера нечіткої логіки, який немає перерегулювання при меншому часі встановлення вихідного параметру 0,462 с, порівняно з регулятором, для якого час встановлення склав 0,728с, а перегулювання 0,269%. В подальшому планується вдосконалити систему контролю шляхом додавання альтернативних джерел енергії (теплого насоса, сонячних панелей, тощо), що може забезпечити зниження енерговитрат на процес забезпечення мікроклімату.

Ключові слова: мікроклімат, моделювання, контролер нечіткої логіки, керування, регулятор.

VASYLCHENKO Yevhenii, SHEVCHENKO Vadym
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

CONTROL SYSTEM FOR MICROCLIMATIC PARAMETERS IN INDUSTRIAL PREMISES

Smart control of the microclimate in an industrial room should ensure compliance with the optimal temperature and humidity. However, maintaining the necessary microclimate parameters requires the use of a large amount of energy resources, which are becoming increasingly expensive. Therefore, the development of systems that allow more efficient use of resources to regulate the microclimatic parameters in premises is a relevant task today. Despite the large number of works in the field of developing control systems for microclimatic parameters in industrial premises, there is a high need for research on regulation methods and the creation of effective systems for regulating microclimatic parameters, as this directly affects energy consumption and the quality of the microclimate in production. This article focuses on developing a working prototype of a system for controlling the microclimate parameters in an industrial room, modeling and adjusting regulators, and a fuzzy logic controller to ensure optimal production environment conditions and energy savings. The control system is implemented based on the ESP 32 controller, which has the necessary functionality for ensuring operation and optimal cost, allowing the control process to be implemented. The controller receives data from sensors and produces a control signal based on their analysis. The collected data is sent to a server in the cloud environment, which can be accessed remotely from mobile devices. The authors modeled the control system's operation using Matlab Simulink. To do this, a model of the room was created and calculated in MathCad. Then, a simulation of the system's operation was conducted in two versions: using a regulator and a fuzzy logic controller. The analysis of the results showed the good performance of the system using the fuzzy logic controller, which has no overshoot with a shorter settling time of 0.462 s compared to the regulator, which had a settling time of 0.728 s and an overshoot of 0.269%. In the future, it is planned to improve the control system by adding alternative energy sources (heat pump, solar panels, etc.), which can reduce energy consumption for ensuring the microclimate.

Keywords: microclimate, modeling, fuzzy logic controller, control, regulator.

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

Розумне управління мікрокліматом у виробничому приміщенні повинно забезпечувати дотримання оптимальної температури та вологості. Проте забезпечення необхідних параметрів мікроклімату вимагає використання великої кількості енергоресурсів, як стають все дорожчими. Тому розроблення систем, які

дозволяють більш ефективно використовувати ресурси для регулювання мікрокліматичних параметрів у приміщенні є актуальною задачею на сьогоднішній час.

В галузі розробки систем для контролю мікрокліматичних параметрів виробничих приміщень існує багато напрацювань. Оскільки при виробництві головним чинником є контроль забрудненості та теплового комфорту, то саме ці параметри є визначальними при проектуванні систем контролю.

Численні дослідники проводили огляд наявних напрацювань в галузі вентиляції та кондиціонування чистих приміщень [1]. Основними моментами є контроль вентиляції, забруднення та оптимізація системи кондиціонування. Автори стверджують, що підтримка теплової рівномірності є головною темою досліджень в багатьох роботах. Було встановлено, що чисті приміщення з односпрямованим потоком є найефективнішими у видаленні забруднюючих компонентів у приміщенні. Запропоновано низку альтернативних методів для забезпечення ефективного контролю якості повітря. У роботі також аналізувалась швидкість подачі повітря як у контексті підтримки рівномірності потоку, так і для контролю забруднення. Для ефективного контролю необхідно оптимізувати розташування джерела забруднення відповідно до основного напрямку потоку. Крім того, під час аналізу розподілу повітря в чистих приміщеннях необхідно ретельно перевірити розташування вхідних і витяжних решіток. Наприклад, розміщення вихлопу поблизу виявленого джерела забруднення забезпечує кращу продуктивність вентиляції для контролю забрудненості. Проте автори не розглядають ефективність алгоритмів керування мікрокліматом, як додатковий засіб підвищення ефективності функціонування систем керування мікрокліматом, що також може дати свій ефект.

У деяких публікаціях представлено системи керування мікрокліматом у чистих приміщеннях з метою зменшення споживання енергоресурсів для забезпечення необхідних мікрокліматичних параметрів [2]. Зменшення енерговитрат досягається за рахунок використання більш якісних алгоритмів керування з аналізом навколишнього середовища. Три різні конфігурації конструкції були проаналізовані за допомогою програмного забезпечення моделювання TRNSYS. Система контролювала кімнатну температуру, відносну вологість і викиди CO₂. На останньому етапі дослідження було проведено порівняльний аналіз цих трьох конфігурацій керування, щоб знайти енергоефективну систему з меншими викидами CO₂. Цільовими функціями були мінімізація споживання енергії та викидів CO₂. Проте автори не розглядали можливості застосування контролерів нечіткої логіки, як засобів подальшого вдосконалення алгоритмів керування.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз моделей управління мікрокліматом також представлений у роботі [3]. Автори розрахували тепловтрати через поверхні приміщення (стіни, вікна, стелю та підлогу). Хоча у роботі приведені хороші моделі, не було проведено їх практичне застосування для систем управління параметрами мікроклімату. Нами використано ці моделі для побудови системи керування мікрокліматичними параметрами у виробничих приміщеннях, що дозволило покращити якість складання, підвищити ефективність виробництва. Інші вчені дослідили мікроклімат у будівлі з метою моніторингу температури та відносної вологості повітря [4]. В роботі розроблено спрощену модель обчислювальної гідродинаміки, створеної за допомогою програмного забезпечення DesignBuilder v7.0 і перевіреної шляхом порівняння з вимірними значеннями. Для ефективного використання таких моделей для них необхідно застосувати алгоритми пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання, або контролери з нечіткою логікою. Також вивчено параметри забезпечення термогігрометричного комфорту за рахунок дослідження прямого нагріву термістора [5]. Результати цієї праці необхідно більш широко використати для впровадження в системи контролю мікрокліматичних параметрів.

Модернізація будинків забезпечує засоби покращення базових енергетичних і комфортних характеристик будівельного фонду, який неможливо оновити через непомірні витрати. Ми аналізуємо, як модель прогнозного керування (MPC), застосована до управління мікрокліматом у приміщенні, може забезпечити енергоефективне вирішення проблеми комфорту мешканців у різноманітних ситуаціях, які в основному викликані зовнішньою погодою та заповненістю приміщення. Для цього ми визначаємо цільову функцію для споживання енергії та розглядаємо два ілюстративних випадки: одна будівля, спроектована та побудована нещодавно з сучасним обладнанням HVAC, і інша, спроектована та побудована кілька десятиліть тому з поганими тепловими характеристиками та без спеціальної системи вентиляції. Наша модель включає різні фізичні ефекти, такі як інфільтрація повітря та тепла «інерційна маса» в приміщенні (внутрішні стіни, підлога, стеля та меблі), а також враховує вплив присутності людини як джерела тепла та CO₂. Проаналізовано вплив на числові результати горизонтів прогнозу та невизначеності через неточності прогнозів погоди та заповнюваності приміщень. Оскільки ми вирішуємо проблеми опуклої оптимізації за допомогою лінійного та нелінійного оптимізаторів, повна продуктивність MPC порівнюється як з лінеаризованим MPC, так і зі стандартним контролером увімкнення/вимкнення. Головною перевагою MPC є його здатність забезпечувати задовільні рішення для контролю мікроклімату за найменших витрат енергії як для сучасних, так і для старих будівель. Оскільки старі будівлі зазвичай не вентилуються належним чином,

у світлі наших результатів моделювання ми бачимо, що встановлення системи припливної вентиляції забезпечує рішення для значного покращення якості повітря.

За допомогою теплового моделювання всієї будівлі проведено аналіз охолоджувальних навантажень на будівлю [6]. Розроблено модель для прогнозування погодинних мікрокліматичних даних у регіоні за цілий день за допомогою аналізу Фур'є минулих (вимірних) і майбутніх (змодельованих на основі аналізу CFD) мікрокліматичних даних за обмежений період (години сонячного світла). Застосування таких даних дозволить більш якісно прогнозувати затрати енергоресурсів на системи охолодження. Алгоритми, які забезпечують використання таких прогнозів авторами не розглядалися.

У деяких публікаціях проводять комплексну оцінку систем опалення, вентиляції та кондиціонування для промислової будівлі за допомогою гібридного методу багатокритеріального прийняття рішень [7]. Одинадцять систем були оцінені на основі двадцяти семи критеріїв. Для підтримки процесу прийняття рішень розроблено гібридне застосування моделювання енергоспоживання будівлі, інтегрованого модифікованого поетапного аналізу співвідношення ваги та зваженої сумарної оцінки продукту. Показано, що найефективнішим елементом таких систем є використання теплових насосів. Проте такі системи можна більш ефективно використовувати за рахунок застосування сучасних алгоритмів керування, що також дозволить більш якісно використовувати енергоресурси. Також у публікаціях проводять оптимальне планування системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря у фактичній 3-поверховій будівлі, де під час оптимізації враховуються циклічні та відбивальні ефекти [8]. Моделювання споживання енергії будинками при чотирьох видах опалювальних систем для цілого регіону провели автори [9]. Численні статті присвячені аналізу систем опалення, вентиляції та кондиціонування для забезпечення комфорту в автомобілі та економії акумуляторної батареї [10, 11]. Запропоновано алгоритм оптимізації змінних керування на основі динамічного програмування, який мінімізує суперечливі критерії теплового комфорту пасажирів та ефективності системи кондиціонування. Оліінок запропонувала застосовувати систему WLHP, яка альтернативу класичним системам опалення, кондиціонування та вентиляції [12]. Основна її особливість в тому, що вся теплота від джерел надлишкової теплоти приміщення може бути відібрана в приміщеннях, які вимагають охолодження, і передана в приміщення, які потребують опалення. Також є численні дослідження впливу параметрів клімату на комфорт людини з використанням штучних нейронних систем [13]. Використання цих напрацювань при комплексному застосуванні з ефективними контролерами та регуляторами у системах керування дозволять створити більш ефективні системи керування мікрокліматичними параметрами у виробничих приміщеннях, що забезпечить ефективне використання енергоресурсів, покращить якість та підвищить ефективність виробництва.

У попередніх роботах автори розглядали методи побудови системи керування мікрокліматичними параметрами у виробничих приміщеннях [14]. Було створено системи, які дозволяли збирати дані про параметри мікроклімату в приміщенні та віддалено слідкувати за їх зміною [15].

Виходячи з літературного аналізу слід відмітити, що в галузі розробки систем керування мікрокліматичними параметрами виробничих приміщень є необхідність проведення досліджень методів регулювання та створення ефективних систем регулювання мікрокліматичних параметрів, оскільки це впливає на витрати енергоресурсів та якість мікроклімату на виробництві..

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є: розробити систему керування параметрами мікроклімату у виробничому приміщенні де проходить операція складання та випробування.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розроблено систему керування параметрами мікроклімату у виробничому приміщенні де проходить операція складання та випробування, моделюванню та налаштуванню регуляторів та контролера нечіткої логіки для забезпечення оптимальних умов виробничого середовища та економії енергоресурсів. Структурна схема системи керування мікрокліматичними параметрами виробничого приміщення приведена на рис. 1.

Систему керування реалізовано на базі контролера ESP 32, який володіє необхідним функціоналом для забезпечення роботи та оптимальною вартістю і дозволяє реалізувати процес контролю. Контролер отримує дані з давачів та на основі їх аналізу виробляє керуючий сигнал. Отримані дані він збирає та відсилає на сервер у хмарне середовище, доступ до якого можна отримати віддалено з мобільних пристроїв. Схема електрична принципова розробленої системи приведена на рис. 2.

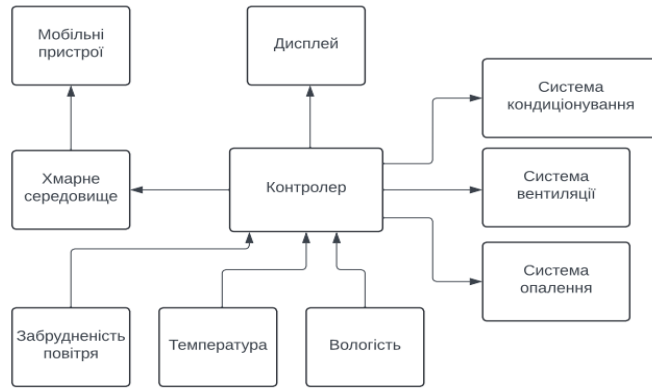


Рис. 1. Структурна схема системи керування мікрокліматичними параметрами виробничого приміщення

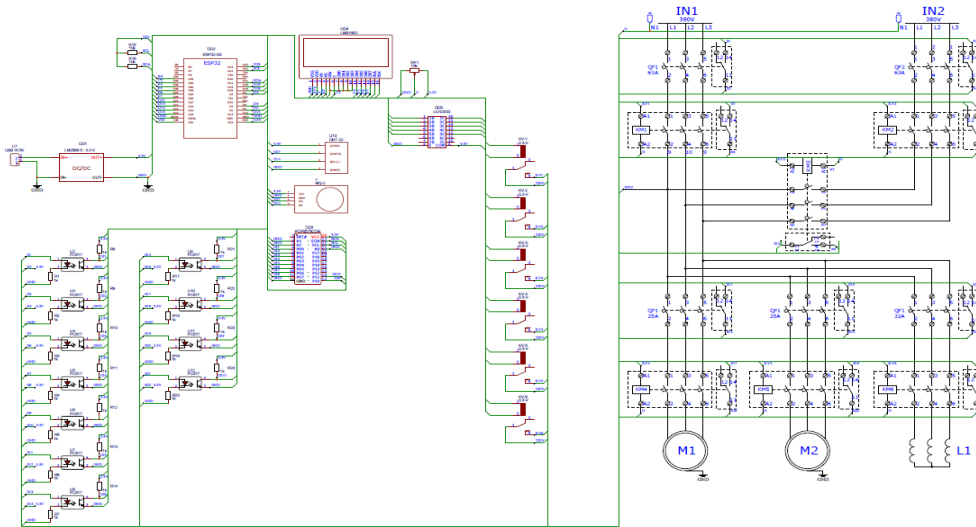


Рис 2. Схема електрична принципова системи керування мікрокліматичними параметрами виробничого приміщення.

Робоча програма системи на мові сходиноквих діаграм приведена на рис. 3.

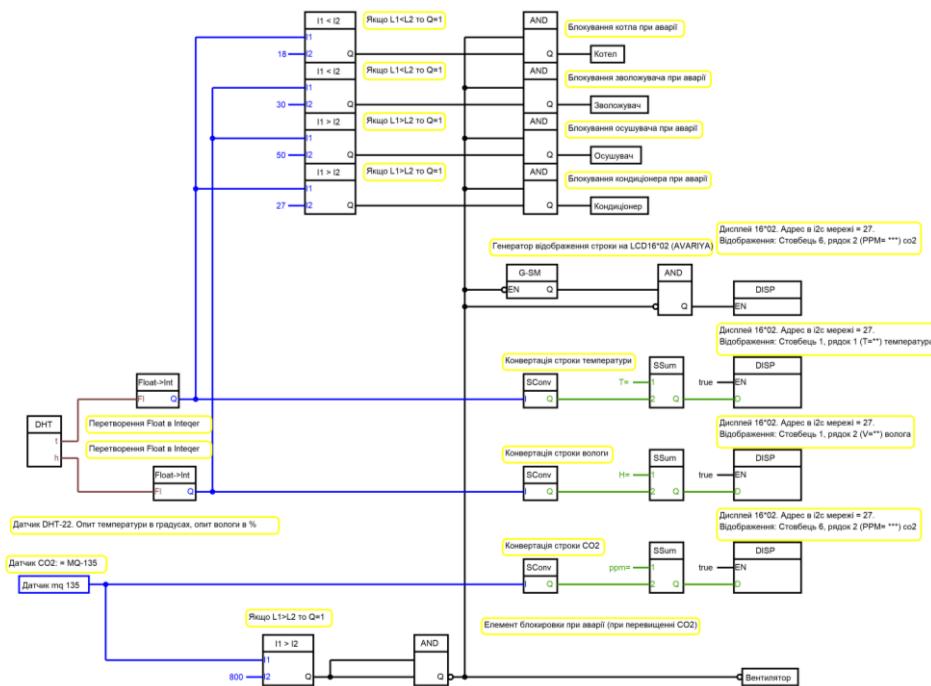


Рис. 3. Робоча програма системи керування мікрокліматичними параметрами виробничого приміщення

$$\begin{aligned}
 R_{in} &:= 0.133 & R_{ex} &:= 0.05 & \delta_1 &:= 0.015 & \delta_2 &:= 0.64 & t_{in} &:= 20 & t_{out} &:= 14 \\
 \lambda_1 &:= 0.6 & \lambda_2 &:= 0.7 & S_{windows} &:= 1.45 \cdot 1.5 & S_{windows} &= 2.175 \\
 R_1 &:= \frac{\delta_1}{\lambda_1} & R_2 &:= \frac{\delta_2}{\lambda_2} & S_{walls} &:= (8 \cdot 3 + 5 \cdot 3) \cdot 2 - 2 \cdot S_{windows} - 1.9 \cdot 2.10 \\
 & & & & S_{walls} &= 69.66 \\
 R_c &:= R_{in} + R_1 + R_2 + R_{ex} & R_c &= 1.122 \\
 K_{walls} &:= \frac{1}{R_c} \cdot 4.19 & K_{walls} &= 3.733 \\
 K_{gl} &:= 1.96 & S_{gl} &:= 1.5525 & K_f &:= 0.2 & S_f &:= 0.6225 \\
 S_t &:= 2.175 \\
 K_{windows} &:= \frac{K_{gl} \cdot S_{gl} + K_f \cdot S_f}{S_t} \cdot 3600 \cdot 2 & K_{windows} &= 1.049 \times 10^4 \\
 Q_{walls} &:= K_{walls} \cdot S_{walls} \cdot (t_{in} - t_{out}) & Q_{walls} &= 1.56 \times 10^3 \\
 Q_{windows} &:= K_{windows} \cdot S_{windows} \cdot (t_{in} - t_{out}) & Q_{windows} &= 1.368 \times 10^5
 \end{aligned}$$

Рис. 4. Розрахунок тепловтрат приміщення в системі MathCad

Для забезпечення більш ефективного керування ми пропонуємо використовувати контролер нечіткої логіки (Fuzzy logic controller), який на відміну від стандартних контролерів володіє більшою гнучкістю в керуванні. Це пов'язано з тим, що у класичних контролерах використовують булеву алгебру (значення 0 або 1), тобто більшість сигналів приводяться до уніфікованих форм (сигнал 0,1 або 0,2 буде приведено до логічного 0). Контролери нечіткої логіки не мають цих недоліків, тому програмне впровадження такого контролера на нашу думку забезпечить більш якісне керування, що забезпечить економію енергоресурсів.

Моделювання роботи системи на базі класичного регулятора та контролера нечіткої логіки проводили в програмному пакеті Matlab Simulink.

Для Києва максимум зафіксованої температури становить +39,9°C, а мінімум -32,2°C. Для моделювання нашої системи створюємо правила для контролера нечіткої логіки, які представлені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Значення параметрів для налаштування контролера нечіткої логіки

Різниця температур встановлена -всередні °C	Режим роботи нагрівача/ охолоджувача	
	Нагрівання	Охолодження
Негативно сильно (від -20 до -10)	0	Висока потужність (60-100%)
Негативно середньо (від -15 до -5)	0	Середня потужність (30-60%)
Негативно мало (від -10 до 0)	0	Низька потужність (0-30%)
Нуль (від -5 до +5)	0	0
Позитивно мало (від 0 до +10)	Низька потужність (0-30%)	0
Позитивно середньо (від +5 до +15)	Середня потужність (30-60%)	0
Позитивно сильно (від +10 до +20)	Висока потужність (60-100%)	0

Система керування була розроблена в пакеті Simulink для двох варіантів: з використанням регулятора (рис. 5) та контролера нечіткої логіки (рис.6). для налаштувань параметрів регулятора використовували функцію Autotune.

В результаті моделювання система забезпечує регулювання температури всередині приміщення з коефіцієнтом перерегулювання 0,269% порівняно з 7,86% до налаштування та з часом встановлення 0,728 с порівняно з 0,793 до налаштування. Для моделювання втрат тепла створили модуль приміщення, в якому використано попередньо розраховані параметри теплопередачі (рис. 4.). На рис. 6 представлені результати моделювання системи керування з використанням контролера нечіткої логіки.

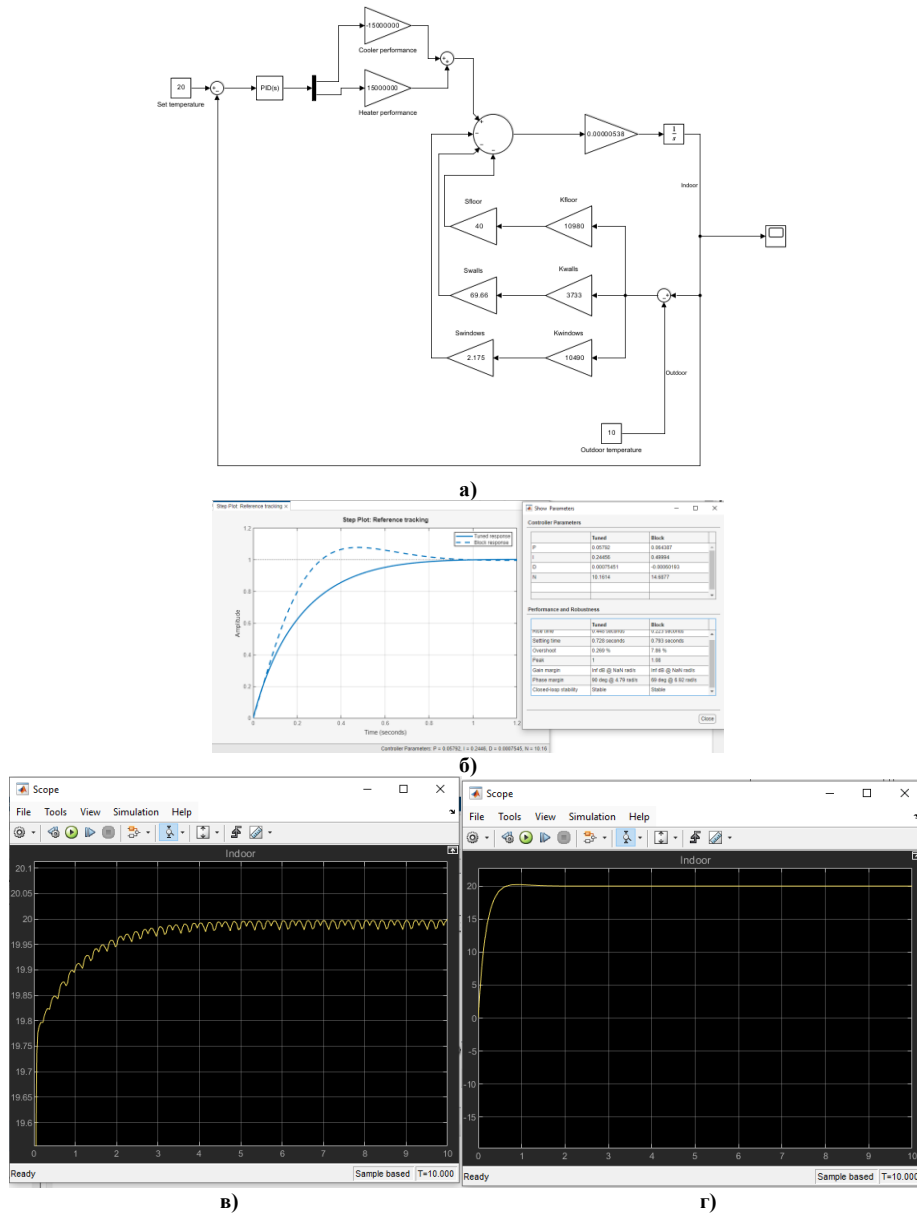
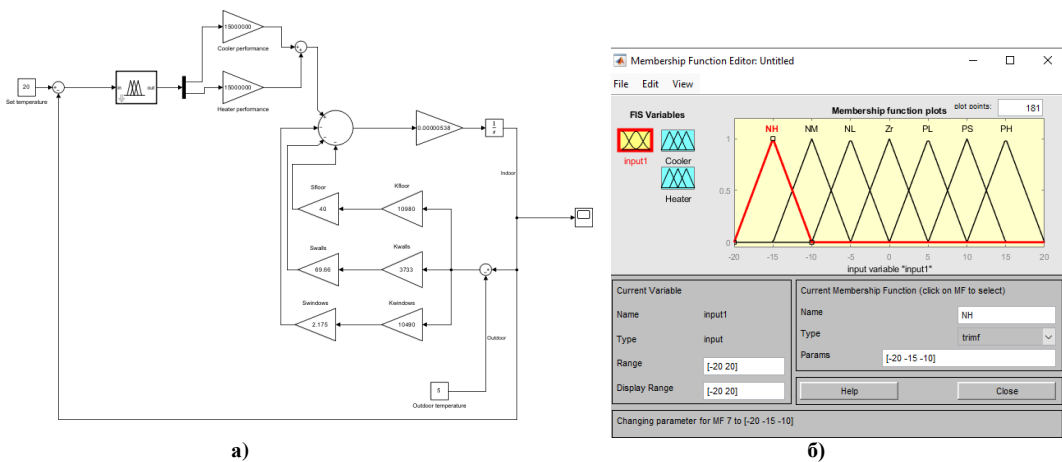


Рис. 5. Моделювання роботи системи керування з використанням регулятора: а) схема моделі; б) параметри налаштування регулятора; в) форма вихідного сигналу до налаштування; г) форма вихідного сигналу після налаштування регулятора



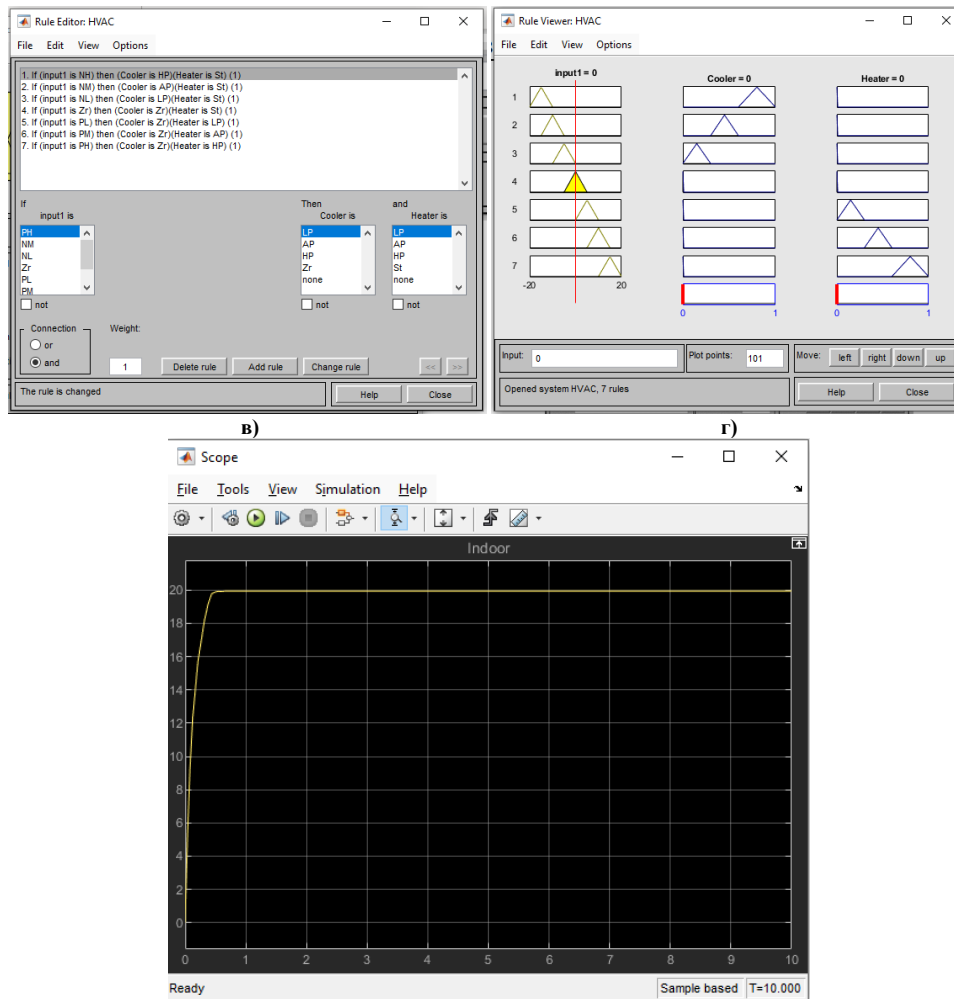


Рис. 6. Моделювання роботи системи керування з використанням контролера нечіткої логіки: а) схема моделі; б) параметри налаштування вхідного каналу; в) вікно налаштувань правил; г) схема налаштованих правил; г) форма вихідного сигналу

В результаті моделювання системи з використанням контролера нечіткої логіки перерегулювання в системі немає і час виходу на встановлене значення 0,462 с, що є кращим показником порівняно з регулятором. Також перевагою використання контролера нечіткої логіки є те, що він обслуговує відразу кілька каналів, тоді як регулятор лише один.

Промислове використання контролера нечіткої логіки при забезпеченні роботи системи вентиляції дозволяє більш ефективно використовувати енергоресурси для регулювання мікрокліматичних параметрів за рахунок більш якісного керування.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Розроблено систему керування на базі мікроконтролеру, що забезпечує надійність, точність складання, а також зниження собівартості та підвищення продуктивності виробництва. Проведено моделювання роботи системи керування в пакеті Matlab Simulink, з застосуванням регулятора та контролера нечіткої логіки, що дало можливість створити надійну та точну систему керування. Аналіз результатів показав точну та надійну роботу системи керування з використанням контролера нечіткої логіки. В подальшому планується вдосконалити систему керування параметрами мікроклімату для виробничих приміщень шляхом додавання альтернативних джерел енергії (теплого насосу, сонячних панелей, тощо), що може забезпечити зниження енерговитрат на процес забезпечення мікроклімату.

Література

1. Bhattacharya A., Nikoopyan M.S., Shoai-Naini S., Betz F., Mousavi E. A Systematic Literature Review of Cleanroom Ventilation and Air Distribution Systems // Aerosol Air Qual. – 2023. – Vol. 23. – Iss. 7. – <https://doi.org/10.4209/aaqr.220407>.

2. Rizwan M., Ahmad S., Shah S.N., Ali M., Shah M.H., Zaman M., Suleman H., Habib M., Tariq R., Krzywanski J. Optimizing the Air Conditioning Layouts of an Indoor Built Environment: Towards the Energy and Environmental Benefits of a Clean Room // *Buildings*. – 2022. – Vol. 12. – Iss. 12. – P. 2158.
3. Senave M., Roels S., Reynders G., Verbeke S., Saelens D. Assessment of data analysis methods to identify the heat loss coefficient from on-board monitoring data // *Energy and Buildings*. – 2020. – Vol. 209. – 109706. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109706>.
4. Longhitano A., Costanzo V., Evola G., Nocera F. Microclimate Investigation in a Conference Room with Thermal Stratification: An Investigation of Different Air Conditioning Systems // *Energies*. – 2024. – Vol. 17. – Iss. 5. – P. 1188. – <https://doi.org/10.3390/en17051188>.
5. Matvienko S., Shevchenko V., Tereshchenko M., Kravchenko A., Ivanenko R. Determination of composition based on thermal conductivity by thermistor direct heating method // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – P. 19-29. – DOI: 10.15587/1729-4061.2020.193429.
6. Zoras S., Veranoudis S., Dimoudi A. Micro-climate adaptation of whole building energy simulation in large complexes // *Energy and Buildings*. – 2017. – Vol. 150. – P. 81-89. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.060>.
7. Baç U., Alaloosi K., Turhan C. A comprehensive evaluation of the most suitable HVAC system for an industrial building by using a hybrid building energy simulation and multi criteria decision making framework // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 37. – <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102153>.
8. Faddel S., Zhou Sun Q., Tian G., Parlato A. Scheduling of the HVAC system in a real commercial building considering equipment cycling and rebound effects // *Front. Energy Res.* – 2023. – Vol. 11. – <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1283369>.
9. Pang Z., Chen Y., Zhang J., O'Neill Z. How much HVAC energy could be saved from the occupant-centric smart home thermostat: A nationwide simulation study // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 283. – P. 116251. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116251>.
10. Cvok I., Škugor B., Deur J. Control trajectory optimisation and optimal control of an electric vehicle HVAC system for favourable efficiency and thermal comfort // *Optimization and Engineering*. – 2021. – Vol. 22. – No. 6. – P. 83-102.
11. Balali Y., Stegen S. Review of energy storage systems for vehicles based on technology, environmental impacts, and costs // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – Vol. 135. – P. 110185. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110185>.
12. Oliinyk H. Use of energy-efficient systems for ensuring the microclimate of the premises // *Scientific Journal of TNTU*. – Tern.: TNTU, – 2022. – Vol. 106. – No. 2. – P. 75–82.
13. Gładyszewska-Fiedoruk K., Sulewska M. J. Thermal Comfort Evaluation Using Linear Discriminant Analysis (LDA) and Artificial Neural Networks (ANNs) // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – No. 3. – P. 538.
14. Васильченко Є.В., Шевченко В.В. Автоматизована система контролю та керування параметрів мікроклімату для виробничого приміщення // *Збірник праць XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”*. – 20-21 грудня 2023 р. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, – 2023. – С. 97-100.
15. Shevchenko V. Details Processing Control System at the Automated Manufacturing // In Bezuglyi M., Bouraou N., Mykytenko V., Tymchuk G., Zaporozhets A. (eds) *Advanced System Development Technologies I. Studies in Systems, Decision and Control*. – Springer, Cham, – 2024. – Vol. 511. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3_10.

References

1. Bhattacharya A., Nikoopayan M.S., Shoai-Naini S., Betz F., Mousavi E. A Systematic Literature Review of Cleanroom Ventilation and Air Distribution Systems // *Aerosol Air Qual.* – 2023. – Vol. 23. – Iss. 7. – <https://doi.org/10.4209/aaqr.220407>.
2. Rizwan M., Ahmad S., Shah S.N., Ali M., Shah M.H., Zaman M., Suleman H., Habib M., Tariq R., Krzywanski J. Optimizing the Air Conditioning Layouts of an Indoor Built Environment: Towards the Energy and Environmental Benefits of a Clean Room // *Buildings*. – 2022. – Vol. 12. – Iss. 12. – P. 2158.
3. Senave M., Roels S., Reynders G., Verbeke S., Saelens D. Assessment of data analysis methods to identify the heat loss coefficient from on-board monitoring data // *Energy and Buildings*. – 2020. – Vol. 209. – 109706. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109706>.
4. Longhitano A., Costanzo V., Evola G., Nocera F. Microclimate Investigation in a Conference Room with Thermal Stratification: An Investigation of Different Air Conditioning Systems // *Energies*. – 2024. – Vol. 17. – Iss. 5. – P. 1188. – <https://doi.org/10.3390/en17051188>.
5. Matvienko S., Shevchenko V., Tereshchenko M., Kravchenko A., Ivanenko R. Determination of composition based on thermal conductivity by thermistor direct heating method // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – P. 19-29. – DOI: 10.15587/1729-4061.2020.193429.
6. Zoras S., Veranoudis S., Dimoudi A. Micro-climate adaptation of whole building energy simulation in large complexes // *Energy and Buildings*. – 2017. – Vol. 150. – P. 81-89. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.060>.

7. Baç U., Alaloosi K., Turhan C. A comprehensive evaluation of the most suitable HVAC system for an industrial building by using a hybrid building energy simulation and multi criteria decision making framework // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 37. – <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102153>.
8. Faddel S., Zhou Sun Q., Tian G., Parlato A. Scheduling of the HVAC system in a real commercial building considering equipment cycling and rebound effects // *Front. Energy Res.* – 2023. – Vol. 11. – <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1283369>.
9. Pang Z., Chen Y., Zhang J., O'Neill Z. How much HVAC energy could be saved from the occupant-centric smart home thermostat: A nationwide simulation study // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 283. – P. 116251. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116251>.
10. Cvok I., Škugor B., Deur J. Control trajectory optimisation and optimal control of an electric vehicle HVAC system for favourable efficiency and thermal comfort // *Optimization and Engineering*. – 2021. – Vol. 22. – No. 6. – P. 83-102.
11. Balali Y., Stegen S. Review of energy storage systems for vehicles based on technology, environmental impacts, and costs // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – Vol. 135. – P. 110185. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110185>.
12. Oliinyk H. Use of energy-efficient systems for ensuring the microclimate of the premises // *Scientific Journal of TNTU*. – Tern. : TNTU, – 2022. – Vol. 106. – No. 2. – P. 75–82.
13. Gładyszewska-Fiedoruk K., Sulewska M. J. Thermal Comfort Evaluation Using Linear Discriminant Analysis (LDA) and Artificial Neural Networks (ANNs) // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – No. 3. – P. 538.
14. Vasylychenko Ye.V., Shevchenko V.V. Avtomatyzovana systema kontroliu ta keruvannia parametriv mikroklimatu dla vyrobnychoho prymishchennia // *Zbirnyk prats XIX Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh "Efektyvnist ta avtomatyzatsiia inzhenernykh rishen u prykladobuduvanni"*. – 20-21 hrudnia 2023 r. – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, – 2023. – S. 97-100.
15. Shevchenko V. Details Processing Control System at the Automated Manufacturing // In Bezuglyi M., Bouraou N., Mykytenko V., Tymchyk G., Zaporozhets A. (eds) *Advanced System Development Technologies I. Studies in Systems, Decision and Control*. – Springer, Cham, – 2024. – Vol. 511. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3_10.