

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Навчально-науковий інститут комп'ютерно-інформаційних технологій та
автоматизації

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра автоматики та телекомунікацій

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри автоматики та
телекомунікацій

_____ Валерій ПОЦЕПАЄВ

(підпис)

(ім'я та прізвище)

« ____ » _____ 2025 р.

Випускна кваліфікаційна робота

_____ магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка та дослідження системи автоматичного керування кліматом
в офісних приміщеннях»

Виконала студентка 2 курсу, групи СУАзм-23

(шифр групи)

спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

_____ Варченко Марина Віталіївна

(Прізвище, Ім'я та По-батькові)

(підпис)

Керівник зав. каф. АТ, к.т.н., доц. _____ Валерій ПОЦЕПАЄВ

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ім'я)

(підпис)

Рецензент зав. каф. ЕЛІН, к.т.н., доц. _____ Олександр КОЛЛАРОВ

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ім'я)

(підпис)

Рецензент доц., к.т.н., доц. _____ Олександр ШТЕПА

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ім'я)

(підпис)

Нормоконтроль:

Дар'я ЖУКОВСЬКА

23.05.2025 р.

*Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.*

Студент _____

(підпис)

Дрогобич – 2025 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Навчально-науковий інститут комп'ютерно-інформаційних технологій та
автоматизації

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра автоматики та телекомунікацій

(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____

(дата)

з оцінкою _____

Секретар ЕК _____

(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота
_____магістра_____

Тема: «Розробка та дослідження системи автоматичного керування кліматом в
офісних приміщеннях»

Виконавець, студент

гр. СУАзм-23

_____Марина ВАРЧЕНКО

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

_____Валерій ПОЦЕПАЄВ

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

_____Анна ВОРОПАЄВА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

_____Ганна ТЕЛИЧКО

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

_____Валерій ПОЦЕПАЄВ

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтроль

_____Дар'я ЖУКОВСЬКА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дрогобич – 2025 р.

Державний вищий навчальний заклад
"Донецький національний технічний університет"

Навчально-науковий інститут комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації

Кафедра Автоматика та телекомунікації

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
(шифр і назва)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри АТ
Валерій ПОЦЕПАЄВ
«___» _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Варченко Марина Віталіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) «Розробка та дослідження системи автоматичного керування кліматом офісних приміщень»

керівник проекту (роботи) Поцєпаєв Валерій Валерійович, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ року № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____
Технічна документація та матеріали з переддипломної практики; аналітичні дані про умови функціонування кліматичних систем в офісних приміщеннях; технічна документація на мікроконтролери Arduino, датчики температури, вологості та CO₂; стандарти ДСН 3.3.6.042-99, ДБН В.2.5-67:2013, ISO 7730, ASHRAE 55; існуючі методи керування мікрокліматом; протоколи IoT-зв'язку (Wi-Fi, LoRa, Zigbee).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз сучасних систем клімат-контролю в офісах, вимоги до мікроклімату, обґрунтування вибору платформи IoT. Проектування системи на основі Arduino, розробка алгоритмів регулювання клімату, моделювання програмування та оцінка ефективності впровадження.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Блок-схема архітектури системи, схема підключення сенсорів, алгоритм регулювання клімату, структура обміну даними, мережеве підключення, графіки змін параметрів та діаграма енергоефективності.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Воропаєва А.О. к.т.н, доц., доц. каф. АТ		
2	Поцєпаєв В.В., зав. каф. АТ, к.т.н., доц.		
3	Теличко Г.О. к.т.н., доц. каф. АТ		
Додаток А	Сергієнко О. І. к.т.н., доц. каф. УГВіОП		
Нормо-контроль	Жуковська Д.О., ст. викладач	-	23.05.2025 р.

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз сучасних систем керування мікрокліматом та нормативної документації	01.02.2025	
2	Вивчення апаратної бази: мікроконтролери, сенсори, протоколи зв'язку	12.02.2025	
3	Вибір архітектури автоматизованої IoT-системи клімат-контролю	22.02.2025	
4	Розробка програмної логіки та алгоритмів керування параметрами клімату	10.03.2025	
5	Побудова структурної та електричної схеми системи, підключення сенсорів	20.03.2025	
6	Програмування та моделювання роботи системи з візуалізацією через інтерфейс користувача	04.04.2025	
7	Експериментальне дослідження та тестування системи в офісному середовищі	18.04.2025	
8	Аналіз енергоефективності, економічна оцінка та підготовка графічного матеріалу	05.05.2025	
9	Оформлення пояснювальної записки, розділу з охорони праці та остаточна верстка документації	15.05.2025	
10	Подання та підготовка до захисту	23.05.2025	

Студент

(підпис)

Марина ВАРЧЕНКО

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Валерій ПОЦЕПАЄВ

(прізвище та ініціали)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

Посада, Ім'я та ПРИЗВИЩЕ	Суть зауваження, оцінка та підпис

АНОТАЦІЯ

Варченко Марина Віталіївна. Розробка та дослідження системи автоматичного керування кліматом офісних приміщень / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» зі спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. – ДВНЗ «ДонНТУ», Дрогобич, 2025.

Пояснювальна записка: 114 стор., 12 рис., 20 табл., 25 посилання.

У випускній кваліфікаційній роботі представлено розробку та дослідження системи автоматичного керування кліматом в офісних приміщеннях з використанням технологій Інтернету речей. Здійснено аналіз нормативних вимог до параметрів мікроклімату, класифікацію систем HVAC і особливості IoT-інтеграції. Розроблено апаратно-програмну архітектуру на базі мікроконтролерів Arduino з підключенням сенсорів температури, вологості та CO₂. Запропоновано алгоритми регулювання та побудовано інтерфейс моніторингу.

Проведено експериментальне дослідження у реальному середовищі, яке підтвердило стабільність роботи системи, її енергоефективність та економічну доцільність. Наукова новизна полягає в поєднанні доступних мікроконтролерних засобів з хмарними сервісами для побудови масштабованої автоматизованої системи. Практичне значення полягає у можливості впровадження розробки в умовах офісних об'єктів для підвищення комфорту та зниження енергоспоживання.

Ключові слова: автоматизація, мікроклімат, HVAC, IoT, Arduino, керування кліматом, енергоефективність, сенсорні системи, офісні приміщення, хмарні технології.

ABSTRACT

Varchenko Maryna. Development and research of an automatic climate control system for office spaces / Graduation qualifying work for obtaining an educational degree "Master" in specialty 174 «Automation, computer-integrated technologies and robotics» - SHEE DonNTU Drohobych, 2025.

The final qualification work presents the development and research of an automatic climate control system in office premises using Internet technologies. An analysis of regulatory requirements for microclimate parameters, classification of the HVAC system and features of IoT integration was carried out. A hardware and software structure based on Arduino microcontrollers with connection of temperature, humidity and CO₂ sensors was developed. Regulation algorithms were proposed and a monitoring interface was built. An experimental study was conducted in a real environment, which confirmed the stability of the system, its energy efficiency and economic feasibility.

Scientific news in the combination of available microcontroller tools with cloud services for building a scalable automated system. Practical value is created in the possibility of implementing the development in office facilities to increase comfort and reduce energy consumption.

Keywords: automation, microclimate, HVAC, IoT, Arduino, climate control, energy efficiency, sensor systems, office premises, cloud technologies.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ КЛІМАТОМ В ОФІСНИХ ПРИМІЩЕННЯХ	13
1.1 Параметри мікроклімату в офісах: значення та нормативні вимоги	13
1.2. Технології HVAC: класифікація, принципи роботи та функціональні особливості.....	17
1.3. Використання технологій Інтернету речей (IoT) у кліматичних системах	24
Висновки до розділу 1	
2. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КЛІМАТОМ.....	32
2.1. Вибір апаратної платформи та структури системи	32
2.2. Розробка програмної логіки управління на базі зібраних даних	37
2.3. Алгоритми регулювання температури, вологості та CO ₂	45
2.4. Інтеграція сенсорів, контролерів та інтерфейсу користувача	52
Висновки до розділу 2	
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ	60
3.1. Методика тестування системи в умовах офісного середовища	60
3.2. Аналіз стабільності кліматичних параметрів після впровадження	71
3.3. Порівняльна оцінка енергоефективності системи.....	77
Висновки до розділу 3	
4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КЛІМАТОМ.....	85
4.1 Розробка алгоритмів автоматичного керування кліматичними параметрами в офісних приміщеннях	85
4.2. Налаштування мережевої інфраструктури для IoT-пристроїв системи	
4.3 Експериментальне дослідження ефективності розробленої системи ...	94

4.4 Аналіз енергоефективності та економічної доцільності впровадження системи	95
Висновки до розділу 4	98
ВИСНОВКИ.....	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	101
ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій на підприємстві.....	104

ВСТУП

Актуальність роботи. У сучасному світі інтелектуалізація інженерних систем набуває дедалі більшого значення, особливо в контексті підвищення енергоефективності, комфорту та екологічної безпеки офісних приміщень. Забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату є не лише питанням зручності для працівників, але й критичним чинником підвищення продуктивності, зниження захворюваності та зменшення експлуатаційних витрат на обігрів, вентиляцію й охолодження. У зв'язку з цим актуальність розробки систем автоматичного керування кліматом з використанням технологій Інтернету речей (IoT) постає як відповідь на виклики сучасного будівництва, енергозбереження та цифровізації інфраструктури. Необхідність модернізації наявних систем HVAC через їхню застарілість, неефективність і відсутність інтеграції в цифрове середовище додатково підсилює практичну потребу в розробці гнучких, адаптивних і економічно доцільних рішень.

Метою роботи є проектування, реалізація та експериментальна перевірка ефективності автоматизованої системи керування мікрокліматом для офісних приміщень на базі апаратно-програмних рішень з використанням IoT-технологій та мікроконтролерних платформ.

Задачі роботи:

1. здійснити аналітичний огляд нормативних вимог до мікроклімату та технічних рішень у сфері HVAC;
2. обґрунтувати вибір апаратної платформи та сенсорної частини системи;
3. розробити логіку програмного забезпечення та алгоритми керування;
4. здійснити моделювання архітектури мережі та виконати її фізичну реалізацію;
5. провести тестування в реальних умовах та оцінити економічну доцільність впровадження.

Об'єктом дослідження є процеси формування та регулювання мікрокліматичних умов в офісних приміщеннях.

Предметом дослідження виступає методологія побудови та функціонування автоматизованої IoT-системи контролю температури, вологості та рівня CO₂ на базі мікроконтролерної платформи.

В роботі застосовано наступні методи:

- структурно-функціональний аналіз систем HVAC і нормативної документації;
- синтез алгоритмів на основі логіки порогових значень і зворотного зв'язку;
- програмування мікроконтролерів Arduino з підключенням цифрових і аналогових сенсорів;
- моделювання мережевої інфраструктури з використанням середовища Cisco Packet Tracer;
- експериментальні вимірювання фізичних параметрів середовища з наступним аналізом точності та стабільності.

Практична значимість роботи. Результати дослідження мають вагомое практичне значення для впровадження у сфері офісної інфраструктури, особливо в умовах потреби зниження експлуатаційних витрат і переходу до енергоощадних технологій.

Запропонована система дозволяє досягти стабільного мікроклімату з мінімальними витратами, забезпечує зручне керування в режимі реального часу та має високу масштабованість. Впровадження таких рішень може бути корисним для власників бізнес-центрів, керівників підприємств, IT-інженерів, а також для розвитку концепції «розумної будівлі» в Україні.

Робота може слугувати прикладом ефективної інтеграції бюджетних мікроконтролерів у високорезультативні системи автоматизації з реальним комерційним потенціалом.

Пояснювальна записка до даної роботи загалом складається зі вступу, 4-х основних розділів, загального висновку, переліку літератури та 4-х додатків

з охорони праці та планів будівель підприємства. Об'єм та структура роботи є такими: 111 сторінок; таблиць – 20; рисунків – 12; використаних літературних джерел – 25; 1 додаток на 10 сторінках.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ КЛІМАТОМ В ОФІСНИХ ПРИМІЩЕННЯХ

1.1 Параметри мікроклімату в офісах: значення та нормативні вимоги

Сучасне офісне середовище формує складний інтегрований простір взаємодії людини й технологічної інфраструктури, в якому створення комфортних умов праці є необхідною передумовою забезпечення ефективності персоналу, підтримки психофізіологічного стану працівників, а також дотримання гігієнічних та ергономічних нормативів.

Одним із фундаментальних компонентів цього середовища виступає мікроклімат — багатофакторна сукупність фізичних характеристик повітряного середовища, які мають прямий вплив на здоров'я, працездатність та загальну якість трудової діяльності в офісних просторах.

До основних параметрів, що формують мікроклімат, належать температура повітря, його відносна вологість, швидкість руху повітря, інтенсивність теплового випромінювання, рівень іонізації, концентрація діоксиду вуглецю (CO_2), а також наявність летких органічних сполук і пилу [1].

Регуляція та контроль цих показників мають забезпечувати дотримання нормативних меж, адаптованих до особливостей офісної праці, яка зазвичай класифікується як легка розумова діяльність із мінімальними фізичними навантаженнями, але з високими вимогами до когнітивної продуктивності.

Нормативне забезпечення параметрів мікроклімату в офісах в Україні базується на декількох документах. Серед національних стандартів найбільше поширення має Державні санітарні норми ДСН 3.3.6.042-99, які регламентують допустимі й оптимальні умови мікроклімату залежно від пори року, характеру трудового процесу та типу приміщення.

Зокрема, для офісних приміщень передбачено поділ умов на оптимальні (які забезпечують найвищий рівень комфорту та не спричиняють жодних несприятливих фізіологічних реакцій) та допустимі (що не мають шкідливого

впливу на здоров'я, але можуть спричинити зниження продуктивності або легкий фізіологічний дискомфорт при тривалому перебуванні) [2]. У свою чергу, ДБН В.2.5-67:2013 встановлює технічні умови для проєктування систем вентиляції, кондиціонування та опалення в будівлях цивільного призначення, включаючи офіси.

Ці документи забезпечують технічну основу для впровадження рішень із керування мікрокліматом, включаючи системи автоматичного регулювання температури, підтримки вологості, очищення повітря та контролю викидів CO₂.

Паралельно з національними стандартами, актуальними є міжнародні документи, що отримали широке визнання у сфері оцінювання комфортності мікроклімату. Зокрема, ISO 7730 «Ергономіка теплового середовища» визначає поняття теплового комфорту, що базується на індексах PMV (предбачуваний середній рівень теплового комфорту) та PPD (відсоток передбачуваних незадоволених осіб).

Ці індекси враховують сукупність факторів, таких як температура повітря, відносна вологість, швидкість повітря, температура поверхонь та рівень фізичної активності персоналу.

Стандарт ASHRAE 55 також регламентує параметри прийняттого теплового середовища для людей, які перебувають у приміщенні тривалий час, і встановлює допустимі межі температури та вологості в залежності від типу одягу, рівня метаболічної активності та інших умов [3].

Впровадження положень цих стандартів у практику проєктування офісних просторів дозволяє гармонізувати українські вимоги з міжнародними підходами, особливо в умовах інтеграції до європейського ринку та глобалізації офісного ринку праці.

Температурний режим є провідним чинником мікроклімату. Наукові дослідження свідчать, що температура в межах 22–25 °C є найбільш комфортною для виконання інтелектуальної праці. Перевищення або зниження цього діапазону веде до зниження концентрації уваги, підвищеної стомлюваності та зменшення загальної продуктивності.

З іншого боку, рівень відносної вологості має бути підтримуваним у межах 40–60%, оскільки надмірна сухість повітря призводить до пересихання слизових оболонок, а надмірна вологість — до сприятливих умов для розвитку мікроорганізмів і грибків. Швидкість повітря не повинна перевищувати 0,3 м/с в офісах у холодний період року, тоді як у теплий період допустимою є швидкість до 0,5 м/с, що сприяє зниженню теплового навантаження за високих температур.

Підвищення швидкості повітря вище нормативних меж сприймається як протяг і може викликати дискомфорт або захворювання дихальних шляхів.

Унікальною характеристикою сучасного підходу до мікроклімату є увага до рівня вмісту CO₂ у повітрі. Оптимальна концентрація становить до 800 ppm, а допустима межа — 1000 ppm. Перевищення цих показників вказує на недостатню вентиляцію, що викликає симптоми гіпоксії — головний біль, зниження уваги, запаморочення. У зв'язку з цим дедалі частіше у проектуванні офісних будівель використовуються системи контролю якості повітря з датчиками CO₂, які автоматично активують вентиляцію або змінюють швидкість обміну повітря.

Це особливо актуально для приміщень відкритого типу (open-space), де концентрація персоналу є вищою.

У таблиці 1.1 представлено порівняльний огляд нормативних показників мікроклімату для офісних приміщень згідно з українськими та міжнародними стандартами.

Таблиця 1.1 – Порівняння нормативних параметрів мікроклімату в офісних приміщеннях (за джерелами ДСН, ДБН, ISO та ASHRAE)

Параметр	Оптимальні значення (літо)	Оптимальні значення (зима)	Допустимі межі (літо)	Допустимі межі (зима)	Стандарти
Температура повітря, °C	23–26	20–24	22–28	18–26	ДБН, ISO
Відносна вологість, %	40–60	40–60	30–65	30–60	ДСН, ASHRAE
Швидкість руху повітря, м/с	0,1–0,2	0,1–0,2	до 0,3	до 0,2	ISO, ДСН

CO ₂ , ppm	до 800	до 800	до 1000	до 1000	ASHRAE
-----------------------	--------	--------	---------	---------	--------

Як видно з таблиці 1.1, встановлені нормативи мають певний діапазон гнучкості, що дозволяє адаптувати параметри під конкретні умови. Температура влітку має дещо ширший допустимий діапазон, що обумовлено впливом зовнішніх кліматичних умов.

Відносна вологість не повинна перевищувати 65%, адже це може спричинити розвиток мікроорганізмів та погіршити самопочуття працівників. Концентрація CO₂ є основні маркером якості повітря, адже її перевищення призводить до сонливості, зниження концентрації та головного болю.

Окрім нормативних вимог, потрібно розглянути реальні умови, у яких функціонують офісні приміщення в Україні. Згідно з результатами аналітичного огляду за 2022–2023 роки, значна частка офісів у містах із великою концентрацією бізнесу, таких як Київ, Харків, Львів та Дніпро, не відповідають рекомендованим параметрам, особливо у літній період через перевантаження систем кондиціонування.

У таблиці 1.2 наведено узагальнені середні значення основних мікрокліматичних показників у типових офісах України, що були отримані шляхом моніторингу 150 робочих приміщень.

Таблиця 1.2 – Середні фактичні значення параметрів мікроклімату в офісах України (2022–2023 рр.)

Місто	Температура (°C)	Вологість (%)	Швидкість повітря (м/с)	CO ₂ (ppm)	Площа офісів (м ²)	Кількість працівників
Київ	26,2	54	0,31	980	140	18
Львів	24,7	60	0,29	920	95	11
Харків	25,4	50	0,34	1020	110	15
Дніпро	27,1	58	0,36	1050	130	17
Одеса	25,9	61	0,32	970	100	13

Як показує таблиця 1.2, спостерігається незначне перевищення допустимих меж по температурі та швидкості повітря, особливо в південних

регіонах. Найбільш критичним є показник вмісту CO₂, який у більшості міст коливається на межі допустимих значень або перевищує їх.

Така ситуація зумовлена низькою ефективністю вентиляційних систем, відсутністю постійного контролю повітряного середовища та застарілим кліматичним обладнанням.

Параметри мікроклімату мають не лише санітарно-гігієнічне, але й соціально-економічне значення. Відповідно до досліджень Інституту медицини праці, оптимальні мікрокліматичні умови забезпечують до 10–15% підвищення продуктивності офісних працівників, знижують ризик захворюваності на респіраторні хвороби та покращують психоемоційний стан.

Згідно з рекомендаціями Міжнародної організації праці (МОП), створення комфортного мікроклімату розглядається як один із елементів гідної праці.

Зважаючи на результати аналізу, можна зробити висновок про необхідність удосконалення системи кліматичного менеджменту в офісах України.

Це включає модернізацію вентиляційного обладнання, впровадження «розумних» систем моніторингу якості повітря, автоматизоване регулювання мікроклімату та застосування екологічно безпечних рішень. Надалі це сприятиме не лише поліпшенню умов праці, а й підвищенню загальної ефективності функціонування організацій.

1.2 Технології HVAC: класифікація, принципи роботи та функціональні особливості

Системи HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), що в перекладі означає системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, є невід’ємною частиною сучасної архітектурної інфраструктури, особливо в контексті офісного будівництва. Їхнє функціональне призначення полягає у створенні, підтриманні та динамічному регулюванні параметрів мікроклімату в замкнених просторах, що є актуальним для забезпечення умов, сприятливих для тривалої трудової

діяльності, фізіологічного комфорту та психоемоційної стабільності працівників.

Особливого значення ці системи набувають у контексті глобальних викликів, пов'язаних зі зміною клімату, зростанням вимог до енергоефективності будівель та переходом до інтегрованих концепцій «розумних» офісів, де кліматичні умови є адаптивними й автоматизованими відповідно до сценаріїв споживання енергії, кількості людей у приміщенні, зовнішніх погодних змін та індивідуальних налаштувань користувачів.

Згідно з сучасними уявленнями, HVAC-системи виступають не лише як технічний засіб комфорту, а як складова технологічної екосистеми будівлі, що безперервно взаємодіє з іншими підсистемами, зокрема освітленням, енергетичним живленням, інформаційною інфраструктурою та безпекою.

Їхнє проєктування та реалізація вимагають високого рівня міждисциплінарної компетентності, включаючи знання в галузях теплотехніки, аеродинаміки, автоматизованого управління, будівельної фізики та ергономіки праці.

Центральним елементом функціонування будь-якої HVAC-системи є безперервне регулювання теплового балансу, зволоження або осушення повітря, очищення від шкідливих домішок та забезпечення циркуляції повітря між окремими просторами будівлі.

Класифікація систем HVAC є багатовекторною і здійснюється за низкою критеріїв, що дозволяють адаптувати технічні рішення до функціонального призначення приміщення, кліматичної зони, економічної доцільності та нормативно-санітарних вимог [3]. Один з базових критеріїв – це функціональне навантаження системи.

З цього погляду HVAC може бути реалізовано як автономна система лише опалення (приклад – електричні або водяні обігрівачі), лише вентиляції (механічна або природна система припливно-витяжного типу), лише охолодження (спліт-системи або фанкойли), або як комплексна інтегрована система, що виконує всі три функції одночасно – саме останній тип є

пріоритетним у сучасному офісному будівництві через універсальність і здатність до автоматичного адаптування під змінні умови.

Другий критерій класифікації – джерело теплової або холодоагрегатної енергії, що визначає технічні параметри, енергоефективність і екологічний вплив системи. Серед поширених джерел – електрична енергія, яка використовується в компресорних системах кондиціонування; природний газ, що забезпечує роботу теплогенераторів і пальникових установок у газових котлах; гаряча вода або пара від централізованого теплопостачання; відновлювані джерела, такі як геотермальна енергія, що використовується через теплові насоси типу «грунт-вода» або «повітря-вода»; а також сонячні колектори, інтегровані в фасадні системи. Вибір джерела енергії визначає не лише екологічну стійкість проєкту, але й експлуатаційні витрати, рентабельність, технічну складність обслуговування, а також термін окупності системи.

Наступним класифікаційним параметром є спосіб циркуляції повітря, від якого залежить рівномірність розподілу температурних полів, швидкість реагування на зміну умов та акустичний комфорт. Найбільш поширеними є системи з механічним переміщенням повітря — із застосуванням вентиляторів змінної або постійної продуктивності, які регулюють тиск та об'єм повітря в повітроводах.

Альтернативою можуть виступати системи природної вентиляції або системи з перемінним витратним об'ємом (VAV), які дозволяють гнучко керувати повітряними потоками в залежності від поточної потреби зони. Для більш точного розподілу кліматичних умов у просторі використовуються системи зонального кондиціонування, які дозволяють підтримувати різні температурні режими в окремих частинах офісу.

Окрему групу становить класифікація за ступенем централізації. У цьому контексті виділяють центральні системи – з єдиним вузлом управління, які забезпечують одночасне обслуговування кількох приміщень або поверхів, децентралізовані – де кожна зона має автономний пристрій (наприклад, настінний кондиціонер або локальний вентилятор), та змішані – де поєднано

централізовану генерацію тепла або холоду з локальним зональним регулюванням параметрів мікроклімату.

Центральні системи найчастіше застосовуються у великих бізнес-центрах або корпоративних кампусах, тоді як децентралізовані – в офісах з відкритим плануванням або коворкінгах, де кожен користувач може самостійно регулювати налаштування для свого робочого простору.

Крім класифікаційних ознак, варто окремо наголосити на техніко-функціональних особливостях сучасних HVAC-систем. Більшість систем нового покоління інтегруються у цифрову інфраструктуру будівлі, мають модулі самодіагностики, підтримують протоколи BACnet або Modbus, що дозволяє здійснювати моніторинг і керування через мобільні додатки або панелі управління [4].

Використання інтелектуальних сенсорів дозволяє автоматично регулювати інтенсивність роботи в залежності від рівня присутності людей, вмісту CO₂, температури поверхонь, освітленості тощо.

Адаптивність це риса таких систем: у разі відхилення від заданих параметрів вони автоматично коригують режим роботи для мінімізації енергоспоживання та збереження комфортного середовища.

Суттєвим напрямом розвитку є поєднання HVAC із системами рекуперації тепла – технологіями, які дозволяють утилізувати тепло витяжного повітря для підігріву припливного, що істотно знижує теплові втрати та покращує енергоефективність.

Використання вискоелективних фільтрів класу F7 і вище забезпечує очищення повітря від пилу, алергенів, бактерій і вірусів, що набуває особливого значення в умовах постпандемійної реальності.

Окрім того, у багатьох системах передбачено зволоження повітря, що запобігає пересиханню слизових оболонок, характерному для зимового періоду в опалювальний сезон.

Основною функціональною основою кожної HVAC-системи є взаємодія таких базових елементів: термостату, кондиціонера або теплового насоса,

вентиляційних каналів (ductwork), теплообмінників, камер згоряння, вентиляторів і зовнішніх конденсаторних блоків. Принцип дії системи передбачає регулювання повітряного потоку відповідно до заданих температурних параметрів через термостат. Повітря з вулиці або внутрішніх приміщень проходить через фільтрацію, нагрівається або охолоджується, зволожується або осушується, а потім через систему повітроводів подається назад у простір.

На рисунку 1.1. наведено стилізовану схему базових компонентів HVAC-системи, яка демонструє основні вузли та потоки повітря. Зображення ілюструє роботу термостату, який ініціює запуск системи в залежності від температури. Конденсаторна установка, розташована зовні, відповідає за охолодження або нагрів повітряного потоку. Блок внутрішньої обробки повітря містить камеру згоряння (combustion chamber) і теплообмінник (heat exchanger), де відбувається теплообмін між нагрітими газами та повітрям. Бловер (blower motor) забезпечує переміщення повітря по системі, а мережа повітроводів (ductwork) транспортує його по всьому приміщенню. Ця схема є типовою для систем опалення та охолодження із використанням газу та примусової вентиляції.

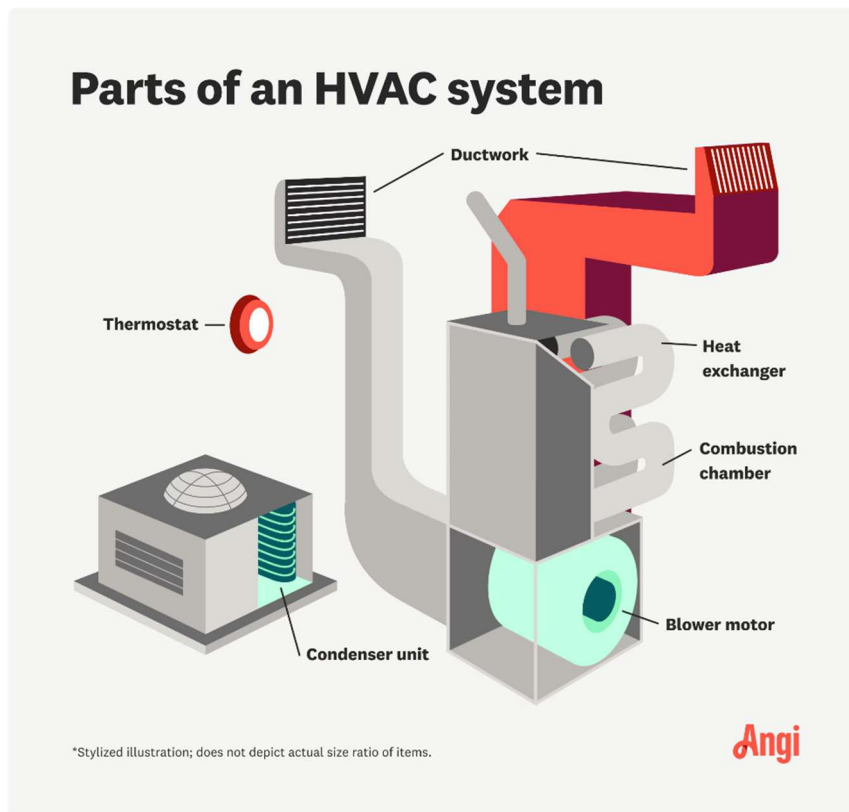


Рисунок 1.1 – Компоненти базової HVAC-системи: теплообмінник, камера згоряння, повітроводи, термостат, зовнішній конденсатор, мотор вентилятора

Ще більшу комплексність ілюструє рисунок 1.2, який зображає схему розміщення HVAC-комплексів на прикладі багатоповерхового офісного будинку. Тут видно зональне поділення системи на кілька поверхів із окремими повітропроводами, теплообмінниками та вентиляційними установками [5].

Такий підхід базується на зональному контролі мікроклімату, коли кожна частина будівлі може підтримувати індивідуальні параметри температури та вологості залежно від кількості людей, інсоляції, тепловиділень техніки.

Надбудова на даху містить центральний кліматичний блок, що включає венткамеру, секції охолодження, рециркуляції та фільтрації. Зовнішня конденсаторна станція забезпечує ефективне тепловідведення.

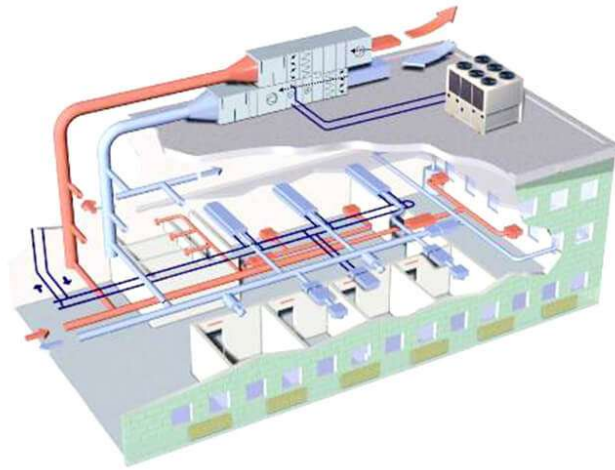


Рисунок 1.2 – Інтегрована багаторівнева HVAC-система у комерційній будівлі: розподілення повітряних каналів по поверхах і центральна кліматична установка на даху

Варто зазначити, що функціональна ефективність систем HVAC значною мірою залежить від якості проектування, балансування повітряних потоків, налаштування автоматики та обслуговування.

Погано спроектовані системи призводять до зон із надмірним охолодженням або перегрівом, акустичного дискомфорту або неефективної рециркуляції повітря.

Для вирішення цих проблем застосовуються сучасні підходи, такі як динамічне балансування, система зворотного зв'язку по температурі, вологості та CO₂, а також підключення до BMS (Building Management System) з можливістю дистанційного управління через інтернет.

Особливо перспективним напрямом є впровадження технологій на базі штучного інтелекту, які здатні прогнозувати зміну умов мікроклімату, адаптувати режими роботи системи під активність користувачів і оптимізувати енергоспоживання.

Таким чином, сучасні HVAC-технології демонструють високу гнучкість, масштабованість і здатність до інтеграції з іншими елементами розумного будівництва.

Вони не лише створюють комфортне середовище, але й є інструментом сталого управління ресурсами, безпечної циркуляції повітря в умовах епідеміологічних загроз та енергозбереження.

У контексті офісних приміщень, грамотне впровадження HVAC-систем із дотриманням нормативних вимог і використанням новітніх інтелектуальних технологій є запорукою ефективної праці, здоров'я персоналу й довготривалої експлуатації будівельного фонду.

1.3 Використання технологій Інтернету речей (IoT) у кліматичних системах

Типова архітектура IoT-системи для управління кліматом у розумних будівлях передбачає розподілену мережу датчиків і виконавчих механізмів, з'єднаних із локальним контролером (шлюзом) та хмарною платформою для аналітики і керування. Сенсори вимірюють параметри мікроклімату (температуру, вологість, вміст CO₂ тощо), передають дані через Wi-Fi, LoRaWAN чи інші бездротові протоколи на гейтвей, а далі до централізованих хмарних сервісів.

Це дозволяє віддалено моніторити і регулювати систему ОВК (кондиціонування, опалення, вентиляцію) – наприклад, змінювати налаштування термостатів чи графіки роботи обладнання через веб-інтерфейс або мобільний додаток. Як зазначено в описі одной рішення, IoT-пристрої забезпечують дистанційне спостереження та управління системами ОВК, охоплюючи як «розумні» термостати, так і датчики присутності та енергоспоживання.

Це відкриває можливості для автоматизованої оптимізації: наприклад, у багатоповерховій будівлі ємністю ~130 000 м² один бездротовий хаб LoRaWAN може зв'язати тисячі датчиків і пристроїв у різних зонах без прокладання кабелів (рис. 1.3).

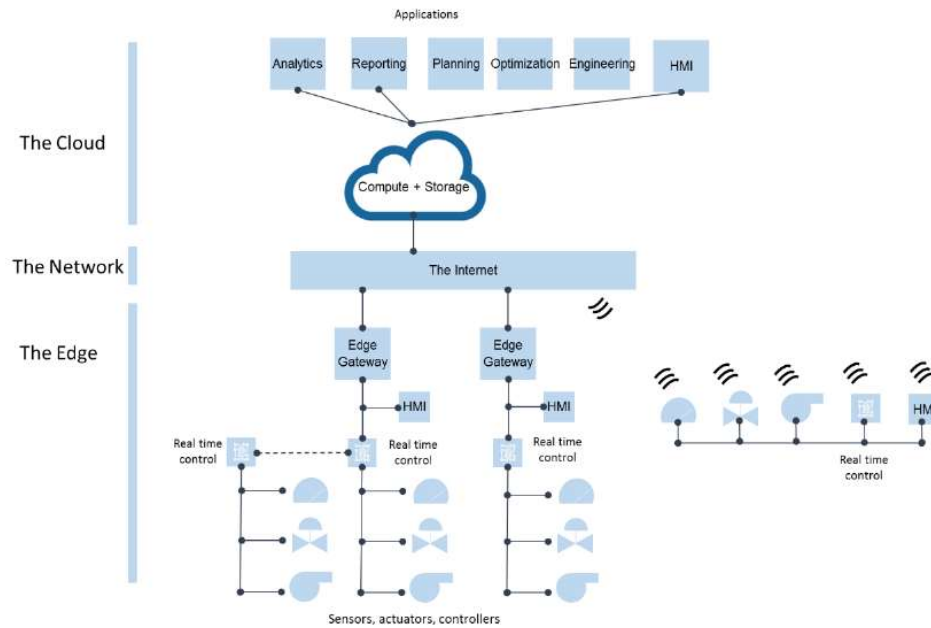


Рисунок 1.3 – Принцип обміну даними

Описана схема ілюструє принцип обміну даними: датчики у приміщеннях безперервно передають показники до шлюзу, шлюз скеровує їх до хмарних сервісів, де алгоритми обробки (іноді на основі AWS Lambda чи інших обчислень) аналізують інформацію і видають команди для виконавчих механізмів. Завдяки цьому персонал може бачити реальну картину параметрів у реальному часі та керувати кліматом віддалено, що значно підвищує гнучкість управління.

Сучасні IoT-платформи дозволяють інтегрувати існуюче обладнання: наприклад, спеціальні адаптери LoRaWAN забезпечують зв'язок із традиційними дротовими протоколами будівельних систем (Modbus, BACnet), «дозволяючи приєднати практично будь-яку існуючу підсистему ОВК до розумної будівлі» [6].

Ці рішення також підтримують створення «цифрових двійників» приміщень і попереджувальні сповіщення при необхідності сервісного обслуговування, що вказує на високий ступінь автоматизації та інтеграції в контрольний цикл.

IoT-технології значно розширюють можливості віддаленого керування кліматом. Завдяки безпроводним датчикам і хмарним аналітичним платформам

керівник або співробітник може контролювати мікроклімат у офісі «з будь-якої точки світу» через мобільні додатки і веб-інтерфейси.

Сенсори та виконавчі механізми забезпечують автоматичний збір і обробку даних у реальному часі: наприклад, система може автоматично підвищити потужність вентиляції при перевищенні рівня CO₂ чи запустити підігрів при різкій зміні зовнішніх умов, реагуючи на команди «розумного» алгоритму. Наявність історичних даних і аналітики дозволяє гнучко налаштовувати графіки роботи та уникати перевитрат ресурсів.

Внаслідок цього IoT-системи суттєво підвищують енергоефективність будівлі. Наприклад, у згаданому кейсі модернізації офісної будівлі в Болгарії впровадження індивідуальних безпроводних термостатів і датчиків призвело до скорочення енергоспоживання приблизно на 30% та зменшення викидів CO₂ на ~20%.

Взагалі, оскільки загальне споживання енергії в комерційних будівлях складає ~18% від витрат країни, а на ОВК припадає близько 39% будівельної електроенергії, навіть невеликі оптимізації мають великий вплив на витрати. Зокрема, датчики температури й вологості можуть регулювати температуру в різних зонах, враховуючи фактичну зайнятість і зовнішні умови, що дозволяє уникати «перегодів» пустих приміщень.

Аналітика IoT-систем сповіщає про необхідність технічного обслуговування (прогнозне обслуговування), що запобігає аваріям і додатковим енерговитратам, коли обладнання починає працювати менш ефективно.

IoT-сенсори відкривають нові можливості для контролю показників якості повітря в офісних приміщеннях. Сучасні сенсори одночасно фіксують концентрації CO₂, CO, дрібнодисперсних часток (PM2.5), рівень відносної вологості та інші параметри. Збір цих даних у хмарі в реальному часі дозволяє системі автоматично регулювати вентиляцію та очищення повітря.

Наприклад, при підвищенні CO₂ вище нормативу система може активувати приплив свіжого повітря або збільшити потужність вентиляторів, а при необхідності – повідомити адміністратора. Такий підхід гарантує підтримання

оптимального мікроклімату без постійного ручного втручання: «IoT-пристрої автоматично реагують на зміни середовища, самостійно збільшуючи вентиляцію при зростанні потоку людей, регулюючи температуру та керуючи вологістю».

Збирання історичних даних про якість повітря також дозволяє виявляти довгострокові тренди й оптимізувати систему вентиляції упродовж робочого тижня або року.

Крім комфорту працівників, підтримка гарної якості повітря має економічний ефект – зменшення ризику нездоров'я і відповідних позапланових витрат. За оцінками фахівців, застосування IoT-моніторингу IAQ сприяє підвищенню продуктивності праці та зниженню енергоспоживання через оптимальне навантаження на систему ОВК.

Зокрема, вимірювання й контроль таких параметрів, як кількість вуглекислого газу та рівень вологості, стають складовими «розумної вентиляції», що гарантує безпечні умови для персоналу і відповідає сучасним санітарним нормам.

Застосування мережевих технологій у системах ОВК також підвищує ризики інформаційної безпеки. Досвід показує, що підключені до інтернету кліматичні контролери й датчики можуть стати «слабкою ланкою» в кіберзахисті будівлі. Шкідливці можуть використати їх для непомітного проникнення до мережі підприємства, а атаки типу DoS чи віруси-вимагачі можуть вивести із ладу системи вентиляції на тривалий час.

Наприклад, відомо, що без автентифікації та шифрування даних низка HVAC-пристроїв стає вразливою до перехоплення команд: зловмисник може змінити показники температури або примусово вимкнути кондиціонери чи опалення.

Тому безпека IoT у розумних кліматичних системах вимагає мультипрофільного підходу. Насамперед необхідно сегментувати мережу: відокремити підмережі HVAC/BMS від корпоративної IT-інфраструктури, щоб у разі компрометації контроль локального мікроклімату не дав зловмиснику доступу до критичних даних компанії.

Варто використовувати надійні протоколи аутентифікації, регулярно оновлювати вбудоване ПЗ пристроїв та суворо змінювати заводські паролі. Експерти рекомендують також впроваджувати механізми виявлення аномалій у поведінці пристроїв і резервування каналів зв'язку, щоб знизити ймовірність збоїв або несанкціонованого втручання.

Тільки такий проактивний захід, що враховує як кібер- («вимагачі», DoS), так і фізичну безпеку (недобросовісні інженери), дозволить гарантувати надійну роботу системи управління кліматом у сучасному офісі.

Системи управління кліматом зазвичай є однією зі складових комплексного БАС (Building Automation System) або Розумного дому. IoT-технології дають змогу «зв'язати» ОВК з іншими підсистемами для спільного прийняття рішень. Наприклад, дані датчиків освітленості і присутності людей можуть використовуватися разом: система автоматично знизить освітленість і вентилятор у покинутому приміщенні, що ще більше економить енергію.

Використання єдиної платформи дозволяє координувати опалення, кондиціонування, вентиляцію та енергомоніторинг – всі ці модулі об'єднуються в одному середовищі, керованому через хмарний інтерфейс. Ще одна складова – інтеграція з системами безпеки та доступу [7]. Наприклад, у разі пожежі чи витоку газу система управління будівлею може автоматично перекрити певні повітроводи (щоб затримати поширення диму) і збільшити приплив повітря у зонах евакуації.

На практиці в кількох рішеннях показано, що побудова таких інтегрованих екосистем IoT значно спрощує керування. Так, розробники використовують єдині шлюзи LoRaWAN, що поєднують колектор даних клімату, датчики якості повітря, пожежні сповіщувачі та інші пристрої в одну мережу – всі вони приєднуються до хмарної платформи один раз, після чого «розумна» система самостійно координує їх роботу.

Інтеграція також передбачає гнучке підключення нових компонентів: наприклад, якщо потрібно додати моніторинг водовтрат чи освітлення, це можна

швидко зробити за допомогою відповідних датчиків та з'єднання з тією ж платформою без значного перепланування інфраструктури.

Такий підхід до «розумної будівлі» дозволяє суттєво підвищити ефективність експлуатації офісного приміщення, водночас оптимізуючи витрати на електроенергію і обслуговування систем (рис. 1.4).

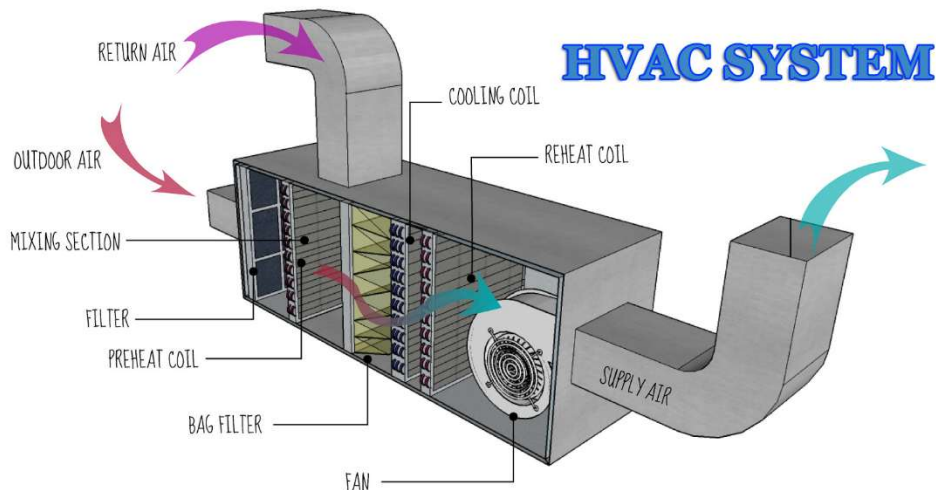


Рисунок 1.4 – Структуру вентиляційного блоку

На схемі зображено ілюстративну структуру вентиляційного блоку (агрегату ОВК) з основними компонентами: повітропровід, теплообмінник, вентилятор, фільтри тощо.

У IoT-системах до таких механічних модулів додаються численні датчики і приводні виконавчі механізми (наприклад, сервоприводи клапанів) для детального контролю. Завдяки вбудованим контролерам кожен вузол повітроподачі в офісі можна зробити «розумним»: він надсилає дані про струм повітря, температуру та інші параметри у хмару, а у відповідь отримує вказівки щодо коригування наповнюваності та переміщення повітря.

Такий рівень деталізації сприяє точному регулюванню мікроклімату в різних зонах офісу і знижує енергоспоживання за рахунок адаптивного керування роботою вентиляторів і клапанів.

У підсумку, використання технологій Інтернету речей у кліматичних системах офісів дозволяє реалізувати віддалений моніторинг та автоматичне

регулювання умов середовища в масштабі всього приміщення. Рішення, описані у джерелах, підтверджують практичні вигоди таких систем: від 30%-ї економії енергії завдяки інтелектуальній вентиляції та опаленню до можливості централізовано налаштовувати температуру і віддалено керувати підсистемами через хмарні сервіси

Багато успішних кейсів показують, що глибока інтеграція клімату з іншими «розумними» технологіями підвищує екологічність і зручність офісів, відповідає сучасним стандартам енергоефективності та безпеки.

Висновки до розділу 1

У першому розділі дослідження здійснено комплексний аналіз сучасних підходів до забезпечення мікроклімату в офісних приміщеннях, зокрема вивчено нормативні вимоги до параметрів повітряного середовища, функціональні особливості систем HVAC, а також потенціал використання технологій Інтернету речей для автоматизації кліматичного регулювання.

Виявлено, що температура, вологість, концентрація CO₂ та швидкість руху повітря є критичними чинниками, які безпосередньо впливають на когнітивну продуктивність і самопочуття працівників, а також визначають гігієнічну якість середовища. Проаналізовано нормативну базу України та міжнародні стандарти, що виявили суттєву потребу у гармонізації вимог задля підвищення рівня комфорту.

Встановлено, що більшість офісних будівель у містах України не відповідають рекомендованим умовам, що обумовлює необхідність модернізації кліматичних систем. Детально розглянуто принципи побудови систем HVAC, їхню класифікацію за функціональним навантаженням, джерелами енергії та ступенем централізації.

Доведено доцільність впровадження зонального кондиціонування, рекуперації тепла та інтелектуального управління на основі сенсорної аналітики. Особливу увагу приділено архітектурі IoT-систем, що забезпечують інтеграцію

датчиків, виконавчих механізмів і хмарних платформ для віддаленого моніторингу та адаптивного регулювання.

Узагальнення результатів дозволило сформулювати обґрунтовані вимоги до технічного проєктування автоматизованої системи кліматичного контролю з урахуванням енергоефективності, нормативного відповідності та зручності експлуатації в сучасному офісному середовищі.

2. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КЛІМАТОМ

2.1. Вибір апаратної платформи та структури системи

При проєктуванні автоматизованої системи керування кліматом є правильний вибір апаратної платформи, що забезпечить гнучкість інтеграції датчиків і надійну взаємодію з комунікаційними модулями.

У багатьох таких системах роль центрального контролера виконує плата серії Arduino – сімейство мікроконтролерів із відсутністю операційної системи, що спрощує обробку даних у реальному часі.

На відміну від одноплатних комп'ютерів (наприклад, Raspberry Pi), які є повноцінними ПК з ОС, Arduino керуються прошивкою без додаткової операційної обробки. Це дозволяє їм ефективно працювати із сенсорами та виконавчими механізмами, використовуючи прямий доступ до GPIO-інтерфейсів і протоколів I²C, SPI чи 1-Wire.

Масштабна екосистема Arduino надає велику кількість готових бібліотек і плати розширення (шілди) для роботи з різними датчиками і інтерфейсами, що значно спрощує розробку складних систем вбудованого моніторингу.

Таблиця 2.1. порівнює характерні характеристики деяких типових плат Arduino та суміжних рішень. Наприклад, Arduino Uno Rev3 (ATmega328P) містить 14 цифрових і 6 аналогових входів/виходів (частина з них підтримує ШІМ) при тактовій частоті 16 МГц, що робить його зручною платформою для невеликих систем з обмеженою кількістю датчиків. Для складніших застосувань із великою кількістю входів можна вибрати Arduino Mega 2560, який оснащений 54 цифровими і 16 аналоговими контактами. [8]

Існують компактні Arduino Nano і плати з вбудованими комунікаційними модулями – наприклад, плата NodeMCU на базі ESP8266, що поєднує мікроконтролер із інтегрованим 2.4 GHz Wi-Fi модулем і програмується у середовищі Arduino IDE.

Слід також відзначити, що Arduino-системи можуть працювати від низької напруги (3.3–5 В) і споживати відносно невеликі струми у сплячому режимі, що необхідно для енергоефективних автономних сенсорних вузлів.

Таблиця 2.1 – Порівняння характеристик вибраних мікроконтролерних платформ

Параметр	Arduino Uno R3	Arduino Mega 2560	NodeMCU (ESP8266)
Мікроконтролер	ATmega328P (8-bit, 16 МГц)	ATmega2560 (8-bit, 16 МГц)	ESP8266 (32-bit, 80/160 МГц)
Цифрових I/O	14 (6 ШІМ)	54	~17 GPIO
Аналогових входів	6	16	1 (ADC до 10 біт)
Комунікаційні інтерфейси	UART, SPI, I ² C	UART, SPI, I ² C	UART, SPI, I ² C, Wi-Fi 802.11n
Робоча напруга	5 В	5 В	3.3 В
Діапазон напруги живлення	7–12 В (від адаптера/USB)	7–12 В	3.3–5 В (USB/Li-Po)
Ціна (орієнтовно)	~750 грн	~1100 грн	~300 грн

У тексті наведено, що Arduino Uno Rev3 має 14 цифрових виходів (6 з них – ШІМ) і 6 аналогових входів при тактовій частоті 16 МГц. Arduino Mega 2560, у свою чергу, забезпечує значно більше каналів: 54 цифрові та 16 аналогових входів, що виправдовує його використання у проєктах із великою кількістю сенсорних точок [9]. Плата NodeMCU (ESP8266) має менше загальних ввідів-виходів, зате включає вбудований Wi-Fi-модуль і працює на 3.3 В. Для складових систем, де потрібна передача даних по мережі Інтернет, ця плата (або її аналог ESP32) може виступати центральним вузлом із бездротовим підключенням.

Таким чином, вибір конкретної плати залежить від необхідного числа сенсорних інтерфейсів, наявних комунікаційних модулів та енергоспоживання.

Сенсорна частина системи включає вимірювачі температури, вологості та концентрації CO₂. Для температури в побутових умовах часто використовують цифрові термометри DS18B20 з інтерфейсом 1-Wire, що забезпечують точність близько ± 0.5 °C (діапазон $-55...+125$ °C, з ± 0.5 °C в межах $-10...+85$ °C).

Датчики температури/вологості DHT22 (AM2302) є популярними через простоту застосування: вони мають роздільну здатність $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ для температури і $0.1\text{ \%RH}$ для вологості при точності $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $\pm 2\text{ \%RH}$ відповідно.

Водночас для підвищених вимог точності можуть бути використані сучасні сенсори, як BME280 або SHT3х, які забезпечують кращу стабільність та додаткові параметри (тиск). Для контролю вмісту CO_2 доцільно застосовувати недисперсійні ІЧ-датчики (NDIR). Наприклад, модуль MH-Z19B (Winsen) надає вимірювання у діапазоні 400...5000 ppm з похибкою близько $\pm(50\text{ ppm} + 3\text{ \%})$.

Такі NDIR-датчики селективно реагують на CO_2 і менш чутливі до інших газів, на відміну від дешевого напівпровідникового датчика MQ-135, що фіксує сумарну токсичність. Застосування Arduino із NDIR-сенсорами підтверджено в наукових розробках: показано, що «система, заснована на мікроконтролерах Arduino із NDIR CO_2 -датчиками, є недорогою і ефективною для моніторингу і контролю концентрації CO_2 ».

Фактично, Arduino-дошки забезпечують доступну реєстрацію даних про CO_2 та дозволяють значно знизити вартість керованих кліматичних систем порівняно з традиційними промисловими рішеннями.

Наступним вибором є спосіб бездротової комунікації між вузлами системи. Часті варіанти – Wi-Fi, LoRa та Zigbee. Кожен із них має свої переваги та обмеження. Wi-Fi (IEEE 802.11) відомий високою пропускнуою здатністю (десятки мегабіт на секунду в сучасних стандартах) та доступністю інфраструктури в офісах чи помешканнях. Проте він потребує значного енергоспоживання і в умовах IoT пристроїв є відносно «енергоголодним». Діапазон зв'язку Wi-Fi зазвичай складає десятки метрів в приміщенні (~50 м) і до сотні метрів на відкритому просторі. Zigbee (IEEE 802.15.4) працює на ISM-діапазоні 2.4 GHz та може використовувати mesh-топологію для самовідновлюваних мереж [10].

Його максимальна швидкість передачі обмежена десятками сотень кілобіт на секунду (до 250 кбіт/с), але він оптимізований під низьке енергоспоживання – активні вузли Zigbee споживають у рази менше струму, ніж Wi-Fi.

Зазвичай радіус дії Zigbee в одно- чи багатоповерховому приміщенні становить від 10 до 100 метрів. LoRa використовує більш довгі хвилі (суб-ГГц) і оптимізована для передачі невеликих пакетів на великі відстані. Відповідно до специфікації, LoRaWAN-протокол забезпечує зв'язок від кількох кілометрів в місті (2–3 км) до десятків кілометрів на відкритій місцевості.

Однак швидкість LoRa дуже мала (0.3–50 кбіт/с), що підходить для періодичних вимірювань. При цьому енергоспоживання LoRa-вузлів низьке (діяльність на одних батарейках до року і більше). Структурно LoRaWAN-система сповіщає «зіркоподібною» топологією: кінцеві вузли з датчиками передають радіопакети до LoRa-шлюзів, які, у свою чергу, передають дані на мережеві сервери через інтернет.

На рис. 2.1 зображено типову LoRaWAN-архітектуру (сенсорні вузли, шлюзи, сервер мережі та застосунків). Вирішення між Wi-Fi, Zigbee та LoRa визначається конкретними потребами: Wi-Fi доцільний для великого потоку даних у невеликому радіусі, Zigbee – для розподілених мереж з багатьма вузлами в обмеженому просторі, а LoRa – для енергоефективного зв'язку на великі відстані.

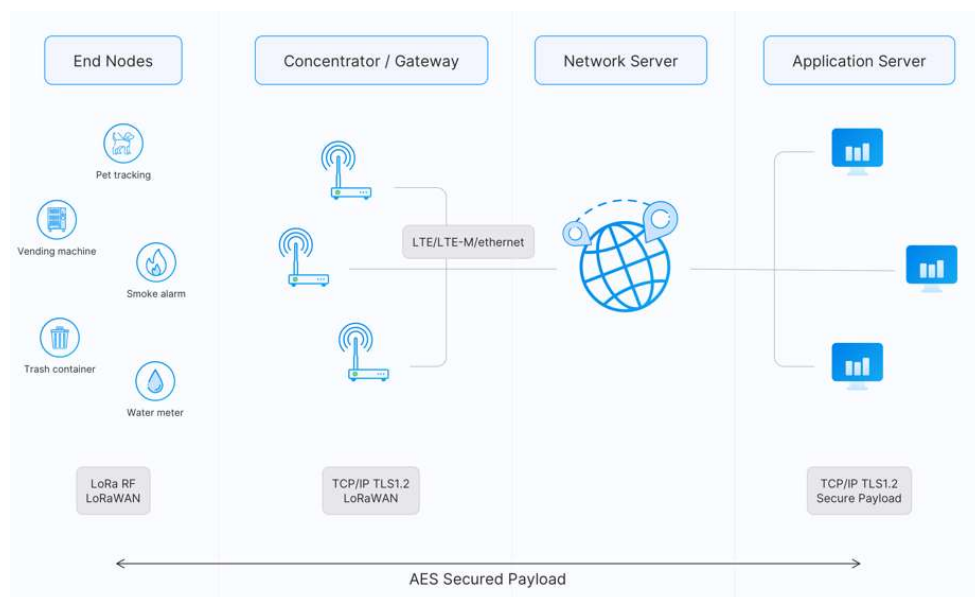


Рисунок 2.1 – Типова архітектура мережі LoRaWAN для IoT: кінцеві вузли (датчики) передають дані через LoRa-шлюзи на сервери мережі і застосунків

Дані таблиці 2.2 демонструють компроміси кожного протоколу. Wi-Fi забезпечує найвищі швидкості, але «їсть» найбільше енергії, тоді як LoRa – протилежна крайність: мінімальне енергоспоживання при наднизькій швидкості передачі, зате з радіусом у кілометри. Zigbee є компромісним рішенням: невеликі потоки даних (кілька сотень кілобіт на с) на помірних відстанях із підтримкою mesh-топології для надійності.

Таким чином, вибір протоколу залежить від поставлених завдань: для швидкої локальної передачі (наприклад, в одному будинку) Wi-Fi, для розгалужених сенсорних мереж – Zigbee, для енергоощадного зв'язку на великі відстані – LoRa.

Таблиця 2.2 – Порівняння бездротових технологій Wi-Fi, Zigbee та LoRaWAN

Параметр	Wi-Fi (802.11n)	Zigbee (802.15.4)	LoRaWAN
Частотний діапазон	2.4 і 5.0 GHz	2.4 GHz (канали)	433/868/915 MHz (залежно від регіону)
Швидкість передачі	До сотень Мбіт/с	20–250 кбіт/с	0.3–50 кбіт/с
Радіус дії	~50 м (всередині), ~100 м (на вулиці)	10–100 м (зазвичай)	>2–5 км (місто), до 15–50 км (відкрито)
Енергоспоживання	Високе	Низьке	Дуже низьке
Топологія мережі	Зірка (бездротовий маршрутизатор)	Mesh/зірка/дерево	Зірка-of-зірок (LoRaWAN)
Особливості	Потребує існуючої Wi-Fi мережі; простота інтеграції	Інтероперабельність багатьох пристроїв; самовідновлювані мережі	Великі відстані й тривала автономність; низька пропускна здатність

В реальній системі керування кліматом кожен елемент архітектури відповідає за свою роль: Arduino-контролер зв'язується з датчиками (температури, вологості, CO₂) і, залежно від обраного протоколу, передає дані до шлюзу (наприклад, Wi-Fi роутеру або LoRa-шлюзу). Після цього інформація надходить на центральний сервер або хмарний сервіс для обробки і прийняття керуючих рішень.

Таким чином, показана схема ілюструє, як організувати структуру автономної мережі сенсорів у системі моніторингу клімату, використовуючи переваги низькошвидкісних і енергоефективних протоколів LoRa для охоплення великих площ.

Таким чином, проведений аналіз апаратної платформи та структури мережі системи керування кліматом вказує на перевагу Arduino-дошок у поєднанні з відповідними сенсорами. Arduino Uno та Mega забезпечують необхідні канали зв'язку з датчиками, а додаткові модулі Wi-Fi/LoRa/ZigBee дозволяють обрати оптимальний спосіб комунікації залежно від діапазону, енергоспоживання та вимог до пропускної здатності.

2.2 Розробка програмної логіки управління на базі зібраних даних

У запропонованій кліматичній системі програмна логіка управління забезпечує прийняття рішень на основі поточних показників середовища – зокрема, температури, вологості, рівня CO₂, освітленості, присутності людей та атмосферного тиску. Архітектура контролера передбачає модуль зчитування даних з різних сенсорів (через АЦП, I²C, UART тощо) і передачу цих даних до центрального процесора, що виконує алгоритм управління.

На рис. 2.2 наведено спрощену блок-схему такої системи: сенсори (ліворуч) безперервно фіксують параметри середовища і передають дані в центральний контролер (в центрі), який на основі цих даних формує команди для

виконавчих модулів (справа) – наприклад, вмикає охолодження, опалення, вентиляцію або освітлення.

При цьому реалізація модульної архітектури зі стандартними інтерфейсами полегшує масштабування системи та інтеграцію нових пристроїв.

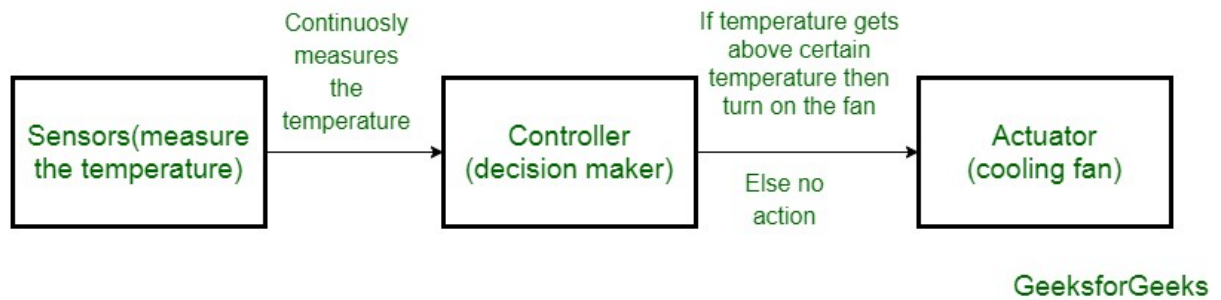


Рисунок 2.2 – Блок-схема кліматичної системи

Архітектура обміну даними між сенсорами та виконавчими модулями в контролері кліматичної системи. Сенсори (зліва) вимірюють параметри середовища, контролер (в центрі) обробляє отримані значення та задає керуючі сигнали відповідним виконавчим пристроям (праворуч).

Перед безпосереднім прийняттям рішень відбувається низка етапів попередньої обробки даних. По-перше, здійснюється калібрування сенсорів (компенсація зміщення та нелінійності вимірів), що дозволяє звести до мінімуму похибки й забезпечити коректність даних.

Далі виконується фільтрація чи згладжування: наприклад, застосування ковзного середнього або фільтра Калмана для усереднення серії послідовних вимірювань.

Ці методи зменшують шум і стрибки вхідних сигналів, що є необхідним для стабільної роботи системи. По-друге, різномірні дані з сенсорів (які мають власні фізичні одиниці та діапазони) перетворюються у єдині масштабовані величини. Зокрема, здійснюється нормалізація вимірів: кожне значення перетворюється в безрозмірну величину (наприклад, інтервал $[0;1]$) згідно з відомими межами приладу.

Так, температура 0–50 °C може лінійно нормалізовуватись функцією *float normalize(float x, float min, float max) { return (x-min)/(max-min); }*, аналогічно для вологості (0–100 %) чи рівня CO₂ (0–1000 ppm). Нормалізовані значення краще інтегрувати в алгоритм управління і зручні для порівняння різних параметрів.

Цей етап підготовки даних (noise reduction, normalization тощо) є складовою сенсорного злиття (sensor fusion) – комплексної обробки даних з багатьох сенсорів, що дозволяє отримати цілісну та узгоджену інформацію про середовище.

Поряд із тим необхідно також налагодити синхронізацію різних каналів даних та уніфікацію протоколів зв'язку, оскільки сенсори можуть мати різну частоту оновлення і роздільну здатність.

Після нормалізації даних безпосередньо розпочинається алгоритм прийняття рішення. У типовому циклі виконання контролер читає оновлені значення всіх сенсорів, обробляє їх і встановлює керуючі сигнали.

Алгоритмічна структура програми в C++ може бути реалізована, наприклад, у вигляді нескінченного циклу (*в методи loop() чи while(true)*), де послідовно читаються дані сенсорів і відпрацьовуються правила керування:

```
while (true) {
    float temp = tempSensor.read();    // вимірювання температури
    float hum = humiditySensor.read();  // відносної вологості
    float co2 = co2Sensor.read();       // концентрації CO2
    float light = lightSensor.read();   // рівня освітленості
    bool presence = presenceSensor.detect(); // наявності присутніх
    float pressure = pressureSensor.read(); // атмосферного тиску

    // Нормалізація значень (припустимо, діапазони відомі)
    float tNorm = normalize(temp, 0.0f, 50.0f);
    float hNorm = normalize(hum, 0.0f, 100.0f);
    float cNorm = normalize(co2, 0.0f, 1000.0f);
```

```

float lNorm = normalize(light, 0.0f, 1000.0f);
float pNorm = normalize(pressure, 950.0f, 1050.0f);

// Програмна логіка управління на основі визначених порогів
if (presence) {
    if (tNorm > 0.8f) {
        cooler.turnOn(); // якщо спекотно ( $t > 40^{\circ}\text{C}$ ), ввімкнути охолодження
    } else if (tNorm < 0.2f) {
        heater.turnOn(); // якщо холодно ( $t < 10^{\circ}\text{C}$ ), ввімкнути обігрів
    }
    if (cNorm > 0.7f) {
        ventilation.turnOn(); // якщо CO2 дуже високий, ввімкнути
        вентильацію
    }
    if (hNorm < 0.3f) {
        humidifier.turnOn(); // якщо дуже сухо, ввімкнути зволожувач
    }
    if (lNorm < 0.2f) {
        lights.turnOn(); // якщо дуже темно і хтось присутній – ввімкнути
        освітлення
    }
} else {
    // якщо нікого немає – перейти в енергозберігаючий режим
    cooler.turnOff();
    heater.turnOff();
    ventilation.turnOff();
    lights.turnOff();
    humidifier.turnOff();
}
delay(1000); // чекати 1 секунду перед наступним циклом

```


}

У цьому коді логіка є послідовною і пороговою: при перевищенні певних значень нормалізованих параметрів вмикаються відповідні пристрої. Примітка: для запобігання нестабільній роботі слід передбачити гістерезис (зону нечіткого переходу), тобто не робити миттєвих перемикань при незначних змінах біля порогу.

Наприклад, можна встановити нижчий і вищий пороги (22 °C і 26 °C) для кондиціонера, щоб уникнути частих вмикань-вимикань. Крім того, складні умови можуть комбінувати декілька ознак одночасно (наприклад, висока температура та наявність людей), як показано у прикладі правил у таблиці 2.4 нижче.

Приведена умовна (базова) логіка ефективна і прозора, однак вона не завжди добре працює за невизначеності чи шуму вимірювань. Водночас нечітка логіка вводить поняття ступенів належності.

Замість різких умов *if-else* використовується набір нечітких правил із лінгвістичними змінними (наприклад, “температура висока”, “вологості низька” тощо). Для цього визначаються функції належності (трикутні, трапецоїдальні тощо) для кожного сенсорного параметра. Наприклад, можна задати:

```
float muLowT = trapezoid(temp, 0, 0, 15, 20); // ступінь низької температури
float muHighT = trapezoid(temp, 25, 30, 50, 50); // ступінь високої температури
float muHighH = trapezoid(hum, 70, 75, 100, 100); // ступінь високої вологості
```

Далі формується база правил наподібно до експертних умов:

IF (температура низька) TA (присутність) THEN увімкнути обігрівач.

IF (температура висока) TA (вологість висока) THEN увімкнути кондиціонер та зволожувач.

IF (CO₂ високий) TA (присутність) THEN увімкнути вентиляцію.

...

Під час виконання контролер обчислює ступені виклику цих правил, об'єднує їх (наприклад, через мінімакс-операції) і потім дефазифікує отриманий нечіткий результат у конкретний сигнал управління.

На відміну від жорсткої порогової логіки, нечіткі алгоритми сприймають дані з помилками чи неточностями (напр., показник “частково відкрито вікно” чи “помірно висока температура”) і формують плавне, адаптивне управління.

Як зазначено в дослідженнях, використання нечіткої логіки у системах регулювання мікроклімату покращує управління параметрами порівняно з бінарними рішучими алгоритмами, оскільки дозволяє обробляти нечітку інформацію та отримувати згладжені керуючі сигнали.

Ще одним підходом є інтеграція машинного навчання (Machine Learning). Зокрема, нейронні мережі або алгоритми глибокого навчання можуть вивчати залежності між багатовимірними даними сенсорів та оптимальними рішеннями управління (наприклад, на основі історичних даних експлуатації).

Реалізація в C++ передбачає завантаження навченого у моделі (наприклад, через бібліотеки TinyML чи TensorFlow Lite). У циклі контролера на кожній ітерації виконується передбачення виходу:

```
float output = model.predict({tNorm, hNorm, cNorm, lNorm, pNorm});
```

Далі це значення інтерпретується як вектор команд виконавчим пристроєм (наприклад, швидкість вентилятора чи ступінь охолодження). ШІ-підходи здатні динамічно адаптуватися до складних залежностей і часто досягають значної економії енергії – за оцінками, енергозбереження може складати до 30–40 % при застосуванні навчання з підсиленням чи прогнозової оптимізації.

Водночас вони вимагають підготовки навчальних даних, мають вищу складність і менш прозорі для розуміння в порівнянні з правилами експертних систем.

У таблиці 2.3 наведено порівняльну характеристику трьох підходів: умовної (бінарної) логіки, нечіткої логіки та методів машинного навчання.

В ній узагальнено їх основні властивості, сильні та слабкі сторони, що відображають потреби в гнучкості системи, обчислювальних ресурсах та ступені невизначеності вхідної інформації.

Таблиця 2.3 – Порівняльна характеристика підходів до програмної логіки управління (умовна логіка, нечітка логіка, машинне навчання)

Підхід	Переваги	Недоліки
Умовна (бінарна) логіка	Проста і зрозуміла реалізація; низька вартість; робота з чітко визначеними порогами.	Жорсткість дій, чутливість до шуму; погано масштабується при великій кількості правил; неадаптивна.
Нечітка логіка	Обробляє нечіткі або неповні дані; плавні переходи між станами; дозволяє вводити лінгвістичні правила управління	Потребує налаштування функцій належності; складніша реалізація; для великої кількості правил ускладнюється інтерпретація.
Методи машинного навчання	Автоматичне навчання залежностей; висока адаптивність до нових умов; можливість оптимізації енергоспоживання (до 30–40 % економії)	Потребують великих даних для навчання; висока обчислювальна складність; «чорний ящик» з низькою інтерпретованістю.

Приклад конкретних правил системи управління на основі комбінованої оцінки всіх вхідних параметрів наведено в таблиці 2.4.

У цій таблиці наведено кілька типових ситуацій (комбінацій значень сенсорів) і відповідні дії системи: наприклад, якщо температура низька й кімната зайнята, вмикається обігрів; якщо CO₂ перевищує граничний рівень і є присутні,

– активується вентиляція; якщо нікого нема – система переходить у енергозберігаючий режим тощо.

Такий формалізований підхід (табличне подання правил) полегшує перегляд логіки системи та модифікацію політик управління.

Таблиця 2.4 – Приклад таблиці керуючих правил на основі комплексної оцінки показників

№	Температура	Вологість	CO ₂	Освітленість	Присутність	Тиск	Дія
1	низька	будь-яка	будь-який	будь-яка	так	будь-який	Увімкнути обігрівач
2	висока	будь-яка	будь-який	будь-яка	так	будь-який	Увімкнути кондиціонер
3	будь-яка	будь-яка	високій	будь-яка	так	будь-який	Увімкнути вентиляцію (концентрація CO ₂ висока)
4	будь-яка	будь-яка	будь-який	низька	так	будь-який	Увімкнути освітлення
5	будь-яка	низька	будь-який	будь-яка	так	будь-який	Увімкнути зволожувач
6	будь-яка	будь-яка	будь-який	будь-яка	ні	будь-який	Перейти в енергозберігаючий режим (вимкнути всі системи)
7	будь-яка	будь-яка	будь-який	будь-яка	так	низький	Вимкнути кондиціонер при відкритому вікні (щоб не марнуват

В описаній системі прикладна логіка програмного контролера реалізована на мові C++, що забезпечує високу продуктивність і можливість тонкого керування ресурсами. Алгоритмічна структура коду передбачає послідовні виклики функцій зчитування сенсорів, застосування описаних вище операцій нормалізації та оцінки правил, а також функції ввімкнення/вимкнення виконавчих механізмів.

Наведені фрагменти коду ілюструє, як побудувати цикл читання та прийняття рішення в реальному часі. Комплексний аналітичний підхід до побудови програмної логіки дозволяє гарантувати безперервне підтримання комфортного клімату при оптимальному споживанні енергії, враховуючи вплив всіх вимірюваних параметрів

2.3 Алгоритми регулювання температури, вологості та CO₂

У сучасних офісних будівлях системи автоматизованого керування мікрокліматом забезпечують підтримання параметрів повітряного середовища (температури, відносної вологості та концентрації CO₂) у заданих межах, що відповідають санітарним нормам і критеріям комфорту. Система мікроклімату містить датчики (термодатчики, гігрометри, CO₂-сенсори тощо) та виконавчі механізми (регулювальні клапани теплообмінників, компресори кондиціонерів, зволожувачі, заслінки вентиляції тощо).

Основною задачею є розробка алгоритмів керування цими виконавчими механізмами на основі вимірюваних параметрів, щоб підтримувати задані значення (задані температури, вологості, концентрації CO₂) при мінімальних енергетичних витратах.

Розглядають кілька класичних і сучасних підходів: традиційні ПІД-регулятори, нечітку логіку, адаптивні та інтелектуальні методи (машинне навчання). Далі докладно описуються принципи роботи та характеристики кожного з цих підходів у контексті регулювання температури, вологості і CO₂ в умовах офісних приміщень.

Регулювання відносної вологості повітря може здійснюватися за допомогою ПІД: при низькій вологості активується зволожувач (або знижується температура повітря для підвищення відносної вологості), при високій — навпаки підвищується температура та/або активується осушувач. Регулювання концентрації CO₂ реалізується через керування припливом свіжого повітря: наприклад, у системах вентиляції ПІД-регулятори слідкують за сигналі від CO₂-

сенсора і змінюють положення заслонок чи швидкість вентиляторів так, щоб концентрація залишалася в заданих межах (наприклад, близько 1000 ppm при заповненості офісів) [11].

Практичне застосування ПІД-регуляторів в HVAC-системах добре описано в літературі: зокрема, у симфонії ПІД-контролерів регулюють тиск і температуру повітря по всій системі, забезпечуючи заданий повітряний потік і підтримуючи потрібні значення температури, вологості і тиску в кожному приміщенні.

Для концентрації CO₂ також рекомендується застосування ПІД: керування по тенденціях зміни CO₂ дає швидку реакцію на появу людей у приміщенні (через зростання концентрації) і відповідне збільшення припливу свіжого повітря.

Алгоритмічно ПІД-регулятор може бути реалізований у вигляді циклічного коду, наприклад, на мові C++ або схожою парадигмою. Наведемо спрощений приклад коду класу ПІД-регулятора:

```
class PIDController {
public:
    PIDController(double kp, double ki, double kd)
        : Kp(kp), Ki(ki), Kd(kd), integral(0.0), prev_error(0.0) {}
    double update(double setpoint, double measurement, double dt) {
        double error = setpoint - measurement;
        integral += error * dt;
        double derivative = (error - prev_error) / dt;
        double output = Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative;
        prev_error = error;
        return output;
    }
private:
    double Kp, Ki, Kd;
    double integral, prev_error;
```

};

Цей фрагмент демонструє основні обчислення помилки та накопичення інтеграла помилки при кожному кроці з кроком часу dt . У практичній системі результат `output` може бути додатково обмежений, наприклад, сигналом широтно-імпульсного модулятора, який керує клапаном чи вентилятором.

Основна перевага ПД-регуляторів – простота та добре вивчена поведінка в лінійних системах. Завдяки зрозумілим параметрам їх досить легко настроїти для систем з нерізко нелінійними характеристиками.

ПД-регулятори мають довгу історію застосування в системах HVAC і часто забезпечують достатню точність регулювання температури та вологості при лінійному наближенні динаміки будівлі. Для контролю CO_2 швидка реакція ПД також виявляється ефективною – при належному налаштуванні система вентиляції миттєво збільшує приплив повітря, коли концентрація перевищує поріг.

До недоліків класичних ПД-систем відносять необхідність ретельного налаштування коефіцієнтів. ПД-регулятор, скалібрований під певні умови (наприклад, літню чи зимову температуру зовнішнього повітря), може не забезпечувати оптимальної роботи в інших умовах.

Як зазначено в дослідженнях, традиційне ручне налаштування ПД-регуляторів є складним і довготривалим процесом, а налаштований «під один сезон» контролер часто не виконує завдання коректно при зміні сезонів. Часто на практиці ПД-регулятори залишаються з «фабричними» значеннями коефіцієнтів, що приводить до субоптимальної роботи системи: недостатнє налаштування становить більше половини всіх проблем під час експлуатації АНУ (припливно-витяжних блоків).

Також ПД-система може давати перерегулювання (коливання) або запізнюватися у присутності великих часових затримок і інерційності системи, що характерно для будівельних конструкцій. У таких випадках можуть знадобитися компроміси між швидкістю реакції і перерегулюванням.

Неадаптивна нечітка логіка реалізує керування на основі нечітких правил «якщо–то», що відображають експертні знання про бажану реакцію системи. При цьому виміряні величини (температура, вологість, концентрація CO₂, їх похідні чи різниці) спочатку «нечітко» відображаються на набори мовних рівнів (наприклад, «низька», «комфортна», «висока»), далі застосовується система правил (наприклад, «якщо температура дуже висока, то збільшити потужність охолодження і відкрити жалюзі»), і нарешті нечіткий результат переводиться у дію (дефазифікується).

Для температури застосовують нечітку множину вихідних дій (напр., «приблизно 20%», «більше 50%» дроселювання клапана). Алгоритм вимагає визначення функцій належності для кожного нечіткого стану параметрів та правил нечіткого висновку.

Нечіткий регулятор добре підходить для систем з нерівномірною реакцією та нестабільними моделями. Наприклад, змінна кількість людей у приміщенні впливає одночасно на температуру, вологість та CO₂, і нечітка логіка дозволяє задавати комплексні правила: «якщо концентрація CO₂ висока та температура вище норми, то відкрити приплив зовнішнього повітря більше».

У дослідженнях показано, що застосування нечіткої логіки в системах повітряного кондиціонування дозволяє покращувати енергетичну ефективність та комфорт: наприклад, Абухуссейн та співавт. на прикладі DCV (регулювання вентиляції за концентрацією CO₂ і присутністю людей) досягли значної економії енергії та підтримки комфортних температур використовуючи нечітку систему з автоматичним формуванням правил.

В іншій роботі Chojeski et al. продемонстрували, що на симуляції нечіткий контролер забезпечував принаймні на 27–36% краще значення інтегральних показників якості контролю порівняно з класичним ПД.

Простий приклад коду нечіткого контролера може виглядати так:

```
double temp = measureTemperature();  
double hum = measureHumidity();
```



```

std::string tempLevel = fuzzyMembershipTemp(temp);    // «холодно»,
«комфорт», «спекотно»
std::string humLevel = fuzzyMembershipHum(hum);        // «сухо»,
«комфортно», «вологість висока»
double cooling = 0, heating = 0, humidifier = 0;
if (tempLevel == "Висока" && humLevel == "Низька") {
    cooling = 1.0;
    humidifier = 0.8;
} else if (tempLevel == "Низька" && humLevel == "Висока") {
    heating = 0.9;
    // ...
}
// Дефазифікація: поєднання дій за системою правил
double controlVal = defuzzify(cooling, heating, humidifier);
//          Застосувати          дію:          змінити          потужність
охолодження/опалення/зволожувача
applyControl(controlVal);

```

Такий підхід дозволяє описати складну логіку керування мікрокліматом у вигляді правил «людською мовою», а не математично точної моделі.

Нечітка логіка корисна там, де система має значну нелінійність або недостатньо відома модель. Завдяки правилам «людською мовою» вона може враховувати різні фактори комфорту (температуру і вологість) водночас та ефективно реагувати на небажані відхилення. Нечіткі регулятори часто «усувають» необхідність ретельного тонкого налаштування параметрів, характерну для ПІД: як відзначають дослідники, FLC-рішення практично не потребують додаткового калібрування при збереженні порівняно низької обчислювальної складності.

Це дозволяє використовувати нечітку логіку навіть у вбудованих контролерах АНУ без істотного приросту затрат обчислень. Крім того, проведені

порівняльні дослідження показали, що правильно сконструйовані FLC можуть забезпечити вищу точність контролю температури і комфорту при менших коливаннях та енергоспоживанні порівняно з ПД.

Однак розробка нечіткого контролера вимагає експертних знань для визначення ефективних правил і функцій належності. Система правил може вийти дуже великою при кількості вхідних змінних, що ускладнює її налаштування. Нечітка логіка не гарантує оптимальності поведінки з точки зору теорії, і в окремих випадках її продуктивність може бути гірша за добре налаштовану класичну систему.

Крім того, апаратна імплементація нечіткого контролера потребує блоків дефазифікації та множення, що трохи ускладнює програмну реалізацію порівняно з простим математичним виразом ПД. У застосуванні до концентрації CO₂ нечітка логіка досі зустрічається рідше — більшість промислових систем вентиляції використовують ПД для швидкої реакції на зміни у заповненості будівлі.

Проте нечіткий підхід можна використовувати для додаткової фільтрації шуму сигналу датчиків і для логічного поєднання сигналів CO₂ та температури.

Удосконалення обчислювальної потужності дозволило застосовувати методи штучного інтелекту та машинного навчання для керування HVAC-системами. Сюди входять нейронні мережі, гібридні нейро-нечіткі контролери, а також методи навчання з підкріпленням (reinforcement learning) і передбачувальне керування (Model Predictive Control на основі даних).

Основна ідея – використовувати історичні чи реальні дані для побудови моделей або стратегій керування, які максимізують комфорт при мінімальних енергозатратах. Так, нейронна мережа може навчитись прогнозувати динаміку температури приміщення за заданою схемою обігріву, а потім онлайн-алгоритм MPC з поправками враховує прогноз завантаження (наприклад, кількості людей) і погодні умови.

Наприклад, агент навчання з підкріпленням може контролювати вентилятори і клапани, експериментуючи з різними стратегіями вентиляції: він

отримує сигнал якості повітря (в тому числі CO₂, температуру, вологість) і винагороду, зменшену за рахунок енергоспоживання.

Загальна структура такого алгоритму виглядає так:

```
// Reinforcement Learning код
State state = observeEnvironment();
while (learning) {
    Action action = agent.chooseAction(state);
    double reward = execute(action); // енергоефективність та комфорт
    State nextState = observeEnvironment();
    agent.learn(state, action, reward, nextState);
    state = nextState;
}
```

Застосування машинного навчання в HVAC розглядається як перспективний напрямок. Огляд сучасних досліджень показує, що алгоритми на основі машинного навчання можуть враховувати складні залежності між параметрами приміщення, прогнозами погоди та режимом роботи будівлі.

Наприклад, непряме регулювання концентрації CO₂ може бути реалізоване через передбачення числа людей у приміщенні на основі біометричних даних чи відео, а потім оптимізований контроль вентиляції на основі цих прогнозів.

Інтелектуальні методи можуть забезпечити найвищий рівень оптимізації: вони здатні навчитися враховувати багато факторів водночас і поступово покращувати свою політику, що може призвести до зменшення енергоспоживання без втрати комфорту.

Крім того, машинне навчання може автоматично виявити приховані закономірності (наприклад, залежність тепловіддачі приміщення від складної взаємодії сонячної радіації та вентиляції). Натомість ці підходи вимагають значних даних для навчання та складних обчислень.

Переклад таких систем у надійний продукт, придатний для промислового використання, ускладнює «чорний ящик» нейронних мереж: важко гарантувати безперебійну роботу при зміні умов поза тренувальною вибіркою.

Також інженерне обґрунтування та сертифікація контролерів на основі ШІ є складнішими. Тому, незважаючи на перспективність, практичне застосування ML-контролерів у системах HVAC поки що обмежене спеціальними дослідницькими проєктами.

2.4 Інтеграція сенсорів, контролерів та інтерфейсу користувача

У системі автоматичного кліматичного регулювання офісних приміщень інтеграція сенсорів, контролерів та інтерфейсу користувача забезпечує збір даних про параметри середовища та реалізацію керування в реальному часі. Сенсори вимірюють температуру, вологість, концентрацію CO₂, освітленість, присутність людей та атмосферний тиск, а контролери (мікроконтролери типу Arduino, STM32 чи одноплатні комп'ютери Raspberry Pi) опрацьовують ці дані і керують приводами систем опалення, вентиляції, кондиціонування та освітлення.

Arduino – відкрита апаратно-програмна платформа, що дозволяє зчитувати вхідні сигнали з датчиків (світла, дотику тощо) і видавати команди на виконавчі пристрої. Вона містить мікроконтролер, який виконує завантажений набір інструкцій. STM32 – сімейство 32-бітних мікроконтролерів на базі ARM Cortex, кожен з яких містить ARM-ядро, флеш-пам'ять, RAM та різноманітні периферійні модулі (таймери, АЦП, UART, I²C, SPI тощо). Raspberry Pi – серія одноплатних комп'ютерів на базі SoC Broadcom з ARM-процесором, оперативною пам'яттю, флеш-накопичувачем (SD-карткою) та периферією на платі.

Усі версії Raspberry Pi мають 40-контактний GPIO для цифрових інтерфейсів і можуть підключатися до мережі через Ethernet або вбудований Wi-Fi. Такі платформи дають змогу зчитувати аналого-цифрові сигнали,

обмінюватися даними по послідовних шинах та вбудовувати складну логіку управління, в тому числі під Linux із підтримкою мережних протоколів. Мікроконтролери часто використовуються як edge-пристрої в IoT-системах – економічно вигідні засоби збору даних і сенсорики фізичного світу.

Для автоматичного кліматичного контролю зазвичай застосовуються такі датчики. Температурні сенсори (наприклад, цифровий датчик DS18B20) використовують однопровідний протокол (1-Wire), що потребує лише одну лінію даних і дозволяє адресувати багато сенсорів на одній шині.

Кожен DS18B20 має унікальний 64-бітний код, тож можна підключити декілька таких пристроїв до одного мікроконтролера; це корисно для рознесених по будівлі точок вимірювання температури. Датчики вологості (наприклад, DHT22) містять ємнісний сенсор вологості та терморезистор для температури, обидва підключені до вбудованого АЦП і передають дані за власним цифровим інтерфейсом через одну лінію. Барометричні датчики (наприклад, Bosch BME280 чи BMP280) вимірюють атмосферний тиск (і часто температуру та вологість) і підключаються по шині I²C або SPI. Концентрацію CO₂ у повітрі фіксують газові датчики (зазвичай NDIR – недиспективний інфрачервоний метод), що мають цифровий або аналоговий вихід.

Такі CO₂-датчики необхідні для моніторингу якості повітря в приміщенні. Датчики освітленості бувають простими резистивними (LDR), підключеними до входів АЦП контролера, або цифровими модулями (наприклад, TSL2561, VEML7700), що за протоколом I²C надають значення у люксах.

Для виявлення присутності людей зазвичай використовують пасивні інфрачервоні сенсори руху (PIR). PIR-сенсор – це електронний модуль, що вимірює ІЧ-випромінювання від рухомих об'єктів у зоні огляду і видає цифровий сигнал при виявленні руху. Він широко застосовується у охоронних сигналізаціях та системах автоматичного ввімкнення освітлення у приміщенні. Альтернативно можуть використовуватися ультразвукові чи радарні модулі руху.

Таким чином, комбінація температурних, вологісних, CO₂-, світлових та рухових сенсорів надає системі повну інформацію про кліматичні умови та присутність персоналу у приміщенні.

Апаратна інтеграція цих датчиків із контролерами здійснюється через відповідні інтерфейси. Багато контролерів мають UART-порти для з'єднання із послідовними сенсорами (наприклад, CO₂-датчики з TTL-UART виходом), що передають дані послідовно (зазвичай у форматі ASCII або бінарних пакетів). Шина I²C – це двопровідний послідовний інтерфейс, де головний пристрій (контролер) генерує тактовий сигнал (SCL) і шле адресовані запити по лінії SDA.

Кожен пристрій на шині I²C має унікальну адресу, що дозволяє підключати багато сенсорів (температурні, вологості, освітленості тощо) до одного контролера. Протокол I²C підтримує стандартні швидкості (100/400 кГц, Fast/Fast Plus) і забезпечує підтвердження прийому (ACK), що полегшує побудову стабільної мережі датчиків. Шина SPI (Serial Peripheral Interface) використовує чотири сигнали: тактовий сигнал (SCK), дані від майстра до пристрою (MOSI), дані від пристрою до майстра (MISO) та лінію вибору пристрою (CS). Для кожного сенсора (або групи сенсорів) передбачено окрему лінію CS, яку контролер активує під час обміну з цим пристроєм.

Відповідно до IEEE SPI є синхронним інтерфейсом з високою пропускнуою здатністю, що дає змогу повнодуплексно передавати дані при заданому такті. На противагу SPI, UART-передача не потребує зовнішньої тактової лінії: у ній дані передаються асинхронно із фіксованою швидкістю та часовим форматом (байт-рамка з старт-бітом, стоп-бітом тощо).

Таким чином, UART-інтерфейси зручні для підключення модулів, що працюють у роз'ємах RX/TX, а SPI/I²C – для швидкого доступу до регістрів цифрових сенсорів. Загалом, мікроконтролери комунікують з периферією (АЦП, ЦАП, температурні сенсори тощо) через серійні шини I²C або SPI, що знижує кількість проводів у порівнянні з паралельним зв'язком.

Логіка обміну даними залежить від вимог системи і можливостей контролера. Простейший підхід – циклічне опитування: в основному циклі

прошивки контролер періодично ініціює зчитування з кожного датчика. Наприклад, програмою можна викликати функцію `readTemperature()`, яка через I²C звернеться до адреси температурного сенсора і зчитає дані; далі – `readHumidity()` тощо. Зчитані значення поміщаються до структури даних на зразок:

```
struct SensorData {  
    float temperature;  
    float humidity;  
    float pressure;  
    float co2;  
    int lightLevel;  
    bool presence;  
};
```

Потім така структура може передаватися далі (на вищий рівень обробки чи на сервер). Приклад коду для циклічного зчитування:

```
void loop() {  
    SensorData data;  
    data.temperature = readTemperature();  
    data.humidity = readHumidity();  
    data.pressure = readPressure();  
    data.co2 = readCO2();  
    data.lightLevel = readLight();  
    data.presence = readMotion();  
    sendDataToServer(data);  
    delay(1000); // опитування щосекунди  
}
```

У цьому прикладі контролер кожні 1000 мс послідовно зчитує значення з усіх датчиків і відправляє їх для подальшої обробки чи збереження. Альтернативно, частину сенсорів можна обробляти через переривання: наприклад, для датчика руху PIR контролер налаштовує зовнішнє переривання на вході так, що при спрацьовуванні сенсора миттєво виконується обробник події – це забезпечує своєчасну реакцію на появу людини.

Аналогічно, деякі датчики (наприклад DS18B20) підтримують програмні будильники: мікроконтролер може встановити верхній/нижній поріг температури і, при його досягненні, спеціальна команда дозволяє виявити цю подію.

У складних системах можливо використання операційної системи реального часу (наприклад FreeRTOS на STM32), де окремі задачі відповідають за читання сенсорів, обробку алгоритмів управління, мережеву комунікацію та інтерфейс користувача. Це гарантує своєчасне виконання пріоритетних задач у реальному часі.

Для передачі даних на більші відстані та реалізації бездротового зв'язку можуть використовуватися LPWAN-протоколи та технології Wi-Fi/ZigBee. LoRaWAN – протокол мережі довготривалої дії (LPWA), що працює у радіодіапазонах ISM.

Він призначений для з'єднання пристроїв з низьким енергоспоживанням на великі відстані. LoRaWAN визначає мережеву архітектуру та передачу даних на швидкостях приблизно 0,3–50 кбіт/с.

Така технологія підходить для розташованих поза будівлею сенсорних вузлів (дистанційні вуличні метеостанції, вузли якості повітря тощо) при передачі малих пакетів даних. ZigBee – стандарт на базі IEEE 802.15.4 для бездротових мереж з малопотужними радіомодулями. ZigBee розрахований на низькошвидкісні (до ~250 кбіт/с) передачі у невеликих мережах (до десятків метрів у приміщенні).

Пристрої ZigBee зазвичай інтегруються з мікроконтролерами і утворюють mesh-мережі, де дані від сенсора передаються через кілька вузлів-

ретрансляторів. Це зручно для датчикових мереж у будівлях (наприклад, розподілене керування освітленням чи вентиляторами). Для Wi-Fi (IEEE 802.11) характерна двостороння передача на високих швидкостях (десятки Мбіт/с) у межах локальної мережі.

Модулі з Wi-Fi (наприклад ESP8266/ESP32 чи вбудований адаптер Raspberry Pi) дозволяють контролеру передавати дані на сервер чи хмару через роутер. Raspberry Pi звичайно оснащується мережею Ethernet або бездротовим адаптером (Wi-Fi), що спрощує інтеграцію з Інтернетом.

Інтерфейс користувача реалізується у формі мобільного додатка для віддаленого моніторингу та налаштування. Такий додаток (на Android або iOS) віддалено отримує актуальні показники сенсорів і дає змогу налаштовувати параметри системи (наприклад, цільову температуру або графіки роботи кліматичних установок). Як правило, мобільний додаток обмінюється даними з контролером через мережу.

Наприклад, контролер або центральний сервер можуть публікувати отримані дані у вигляді JSON через RESTful API, а додаток періодично робить HTTP GET-запити, щоб отримати ці дані. Альтернативний підхід – використання MQTT-брокера: контролери публікують значення сенсорів у топіки (напр. “office/temperature”), а мобільний додаток підписується на них для миттєвого оновлення показників.

У зворотному напрямку додаток може публікувати команди чи нові налаштування в окремий топик. Інтерфейс додатка зазвичай містить графіки історії вимірів, цифрові індикатори поточних значень та елементи керування (слайдери, перемикачі) для зміни параметрів.

У цьому контексті мікроконтролери або Raspberry Pi виступають як edge-пристрої, що збирають дані і передають їх у «хмару» чи локальний сервер, де їх обробляє UI-логіка (такий підхід відповідає принципам Інтернету речей).

Таким чином, інтеграція сенсорів, контролерів і користувацького інтерфейсу включає апаратне з'єднання датчиків до входів мікроконтролерів (аналогових або цифрових через UART/I²C/SPI), розробку прошивки з логікою

зчитування та обробки даних, а також створення мобільного додатку для віддаленого моніторингу і налаштування системи.

Така комплексна інтеграція гарантує надійний збір інформації про кліматичні умови і оперативне реагування на них у реальному часі.

Висновки до розділу 2

У другому розділі роботи зосереджено увагу на проєктуванні системи автоматичного керування кліматом в офісних приміщеннях, що включає вибір апаратної платформи, розробку програмної логіки управління, формування алгоритмів регулювання параметрів мікроклімату та інтеграцію апаратних компонентів.

У ході дослідження проаналізовано переваги мікроконтролерних платформ Arduino, зокрема Uno, Mega 2560 та NodeMCU, з точки зору кількості входів/виходів, енергоспоживання та можливостей бездротового зв'язку. Обґрунтовано доцільність використання сенсорів температури, вологості й вмісту CO₂, що забезпечують точне моніторування параметрів повітряного середовища.

Розроблено архітектуру системи з централізованим керуванням, що передбачає зчитування даних сенсорами, обробку в мікроконтролері та передачу керуючих сигналів виконавчим механізмам. Програмну логіку побудовано з урахуванням реакції на зміну параметрів у реальному часі, що дозволяє системі адаптуватись до навколишніх умов і змін навантаження.

Особливу увагу приділено модульності та масштабованості системи, що забезпечує простоту інтеграції нових пристроїв і можливість застосування у приміщеннях різної площі.

Розглянуто варіанти бездротової комунікації (Wi-Fi, Zigbee, LoRaWAN), кожен з яких оцінено за параметрами енергоефективності, дальності передачі, пропускної здатності та топології мережі. На основі результатів сформовано технічні рішення, які відповідають вимогам до надійності, гнучкості,

енергоощадності й функціональної адаптивності кліматичних систем у сучасних офісних будівлях.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ

3.1 Методика тестування системи в умовах офісного середовища

Для перевірки ефективності системи автоматичного керування кліматом було розроблено та реалізовано експериментальну методику тестування в реальному офісному приміщенні. Загальний підхід полягав у порівнянні показників мікроклімату до і після впровадження системи в аналогічних умовах.

Спочатку здійснювався базовий етап без автоматизованої системи: офіс функціонував із наявною стандартною системою опалення та вентиляції (або ручним керуванням кліматом) протягом визначеного періоду.

Потім відбувалося впровадження автоматичної системи керування кліматом, після чого приміщення експлуатувалося за тих самих умов ще один рівнозначний період. Такий підхід “до/після” дозволяє виключити вплив більшості зовнішніх чинників, оскільки порівнюються ті самі приміщення, той самий колектив і режим роботи – різниця полягає лише у використанні інтелектуальної системи керування [11].

Це забезпечує коректність експерименту та дає змогу приписати виявлені відмінності саме дії нової системи.

В процесі тестування система працювала в реальному часі, автоматично регулюючи параметри мікроклімату (температуру, вологість, вентиляцію тощо) згідно із заданими налаштуваннями комфорту.

Параметри комфорту визначались відповідно до нормативних рекомендацій: зокрема, оптимальна температура повітря для офісів (категорія легких робіт) у холодний період становить 22–24 °С, відносна вологість 40–60 %, а швидкість руху повітря – до 0,1 м/с. Концентрація CO₂ як показник якості повітря також контролювалася, адже у приміщеннях її рівень має бути нижче ~0,1 % (1000 ppm) для забезпечення самопочуття та працездатності людей. Отже,

система налаштовувалася на підтримання зазначених оптимальних умов або найближчих до них, в межах технічних можливостей обладнання.

Експеримент проводився в типовому офісному приміщенні середнього розміру, характеристики якого наведено нижче. Обране приміщення являє собою відкритий офіс площею $\sim 100 \text{ м}^2$ із висотою стель 3 м.

Планування відкритого типу забезпечує рівномірність впливу системи на весь простір, що необхідно для отримання репрезентативних результатів. В офісі постійно працюють 15 співробітників, що відповідає звичайній щільності заселення ($\sim 6\text{--}7 \text{ м}^2$ на особу) [12]. Режим роботи – 5 днів на тиждень (понеділок–п’ятниця) з 9:00 до 18:00, тобто стандартний офісний графік із 8-годинним робочим днем і перервою опівдні.

Такий розпорядок забезпечує повторюваність добового циклу мікроклімату: вранці співробітники приходять у приміщення, протягом дня офіс заповнений, а ввечері та у вихідні – порожній.

Тип будівлі – сучасний комерційний будинок із залізобетонним каркасом та склопакетними вікнами. Теплоізоляція огорожувальних конструкцій на рівні чинних будівельних норм зменшує тепловтрати взимку та перегрів влітку. Офіс розташований на третьому поверсі, має вікна на південно-східну сторону, що зумовлює помірний вплив сонячної радіації у першій половині дня. Кліматична зона – помірно-континентальна (умовно відповідає II кліматичній зоні України), з середньодобовими температурами зовнішнього повітря близько $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ у період тестування (рання весна).

Це означає, що під час експерименту переважали прохолодні зовнішні умови, коли працювала система опалення, але були також окремі сонячні дні із підвищенням зовнішньої температури до $+15\text{...}+18 \text{ }^\circ\text{C}$, що дозволило частково оцінити реакцію системи і на потепління. Відносна вологість зовнішнього повітря в цей період коливалась в межах 50–80 %, але при потраплянні повітря в опалюване приміщення вона знижувалася (через нагрівання без зволоження).

Таким чином, вибрані умови тестування охоплюють характерні для офісу сценарії: опалення у прохолодну погоду, періоди сонячного нагріву та коливання вологості – все це випробовує здатність системи підтримувати комфорт.

Тестування тривало загалом 6 тижнів, поділених на дві рівні частини по 3 тижні. Перший етап (базовий, до впровадження системи) тривав з 1 по 21 березня 2025 р. У цей період офіс працював у звичайному режимі без автоматичного клімат-контролю: підтримання мікроклімату здійснювалося штатними засобами будівлі.

Зокрема, температура регулювалася стандартним термостатом системи опалення (налаштованим на $\sim 21^{\circ}\text{C}$) та періодичним провітрюванням приміщення вручну (відкривання вікон) у разі перевищення температури або накопичення задухи.

Вентиляція в базовому режимі забезпечувалася приточно-витяжною установкою постійної продуктивності, розрахованою на нормативний мінімум повітрообміну (близько $20 \text{ м}^3/\text{год}$ на особу), без динамічного регулювання за якістю повітря.

Зволоження повітря спеціально не здійснювалося, тобто рівень вологості був наслідком балансу зовнішніх умов та внутрішніх факторів (виділення вологи людьми, рослинами, прибиранням тощо). Цей початковий період слугував контрольним, фіксуючи параметри мікроклімату «як є» при традиційному керуванні.

Другий етап (впровадження системи, після впровадження) проводився з 22 березня по 11 квітня 2025 р. На цьому етапі було задіяно розроблену систему автоматичного керування кліматом. Перед початком другого етапу систему інстальовано в офісі: встановлено інтелектуальний контролер, підключено виконавчі пристрої (керовані клапани системи опалення, вентилятори змінної продуктивності, зволожувач повітря тощо) та датчики.

Систему налаштовано на цільові значення параметрів: температура повітря 22°C , відносна вологість 45 %, концентрація CO_2 не більше 800 ppm, швидкість повітря (інтенсивність подачі) коригується в межах комфортних

значень. Протягом 3 тижнів другого етапу система працювала в автономному режимі, автоматично підтримуючи зазначені параметри.

В цей час працівники офісу не втручалися в керування кліматом (не відкривали вікон, не змінювали налаштувань вручну), щоб не порушувати роботу алгоритмів. Порівняння двох рівноважних за тривалістю періодів – до і після – дозволяє згладити випадкові коливання (наприклад, аномальні зовнішні умови в окремі дні) і отримати достатню статистичну вибірку даних для аналізу.

Варто зазначити, що обидва етапи охоплювали 15 повних робочих днів (3 тижні по 5 буднів). Вихідні дні із малою або нульовою присутністю персоналу були виключені з аналізу, щоб зосередитися саме на умовах під час робочих годин.

Також для чистоти експерименту період пусконаладження системи (перші 2 дні після встановлення) не враховувався у основних результатах «після» – це час, необхідний системі для адаптивного навчання та виходу на стаціонарний режим роботи. Отже, зіставлення проводилося між стабільними режимами: типовий тиждень без системи проти типового тижня з системою, повторені тричі і усереднені.

Збір даних здійснювався за допомогою мережі електронних датчиків, розміщених у приміщенні. Для вимірювання основних параметрів мікроклімату використовувалося таке обладнання [13]:

- Температура: цифрові термометри з точністю $\pm 0,2$ °C, розташовані в центрі офісу на висоті $\sim 1,1$ м (рівень робочої зони). Кілька датчиків встановлено в різних зонах (подалі від прямих потоків теплого повітря від радіаторів чи холодного від вікон), їх показники усереднювалися для отримання репрезентативної температури в приміщенні.

- Відносна вологість: електронні гігрометри (ємнісного типу) з похибкою до ± 3 % RH, розташовані поруч із температурними датчиками. Вони дозволяли відстежувати рівень вологості повітря та його коливання при роботі системи зволоження/вентиляції.

— Концентрація CO₂: інфрачервоні (NDIR) датчики CO₂ з діапазоном 0–5000 ppm і похибкою ± 50 ppm. Їх встановлено в зоні дихання (висота $\sim 1,5$ м) подалі від безпосередніх джерел CO₂ (таких як люди, що сидять прямо під датчиком, аби вимірювати фон у просторі). Датчики були попередньо калібровані виробником; типовий заявлений рівень точності становить ± 50 ppm, що гарантує достовірність вимірювання концентрації вуглекислого газу для наших цілей.

— Швидкість руху повітря: термоанемометри (чутливі датчики повітряного потоку) з точністю $\sim \pm 0,05$ м/с, встановлені на рівні 1,1 м в декількох точках офісу. Вони вимірювали середню швидкість повітряного потоку у робочій зоні, що необхідно для оцінки комфорту (занадто високі швидкості викликають протяги, занадто низькі – застій повітря).

Датчики були об'єднані в систему моніторингу, підключену до центрального реєстратора даних. Частота реєстрації становила 1 раз на хвилину (1 Hz) для всіх параметрів.

Такий високий темп зняття показників дозволяє фіксувати як повільні зміни (добові тренди температури, поступове зростання CO₂), так і короточасні коливання (наприклад, різке коливання температури при провітрюванні або стрибок CO₂ під час наради в переговорній).

Дані з усіх датчиків синхронізувалися по часу та автоматично зберігалися у базі даних (SQL-сервер), розгорнутій на локальному комп'ютері в офісі. Для резервування інформації кожного дня створювалися резервні копії (export CSV) зі збереженням на хмарне сховище.

Паралельно з автоматичним збором, періодично проводилася верифікація показань: раз на тиждень персонал виконував значення контрольним термометром і гігрометром (каліброваними еталонами) в центрі приміщення, щоб переконатися у відсутності значного дрейфу датчиків. Відхилення не перевищували допустимі межі похибки; за потреби застосовувалася корекція калібрування.

Таким чином, забезпечувалася надійність і точність даних протягом усього експерименту. Зібрані дані згодом оброблялися статистично: для кожного параметра і для кожного етапу (“до” та “після”) обчислено середні значення за робочий день, стандартні відхилення, а також екстремальні значення (мінімум і максимум). На основі цих агрегованих показників складено зведені таблиці для наочного порівняння.

Протягом базового періоду (3 тижні березня, до встановлення системи) було зафіксовано такі статистичні параметри мікроклімату офісу, усереднені за робочі години (9:00–18:00) усіх буднів досліджуваного інтервалу.

Таблиця 3.1 містить основні показники: середню величину, стандартне відхилення (σ), а також мінімальні та максимальні значення, що спостерігалися. Ці дані відображають характерний стан мікроклімату при традиційному керуванні.

Таблиця 3.1 – Статистичні параметри мікроклімату офісного приміщення до впровадження системи

Параметр	Середнє значення	σ (стандартне відхилення)	Мінімум	Максимум
Температура повітря, °C	21,0	1,8	18,5	24,0
Відносна вологість, %	35	5	28	42
Концентрація CO ₂ , ppm	1100	300	500	1550
Швидкість повітря, м/с	0,05	0,03	0,01	0,15

Примітка: наведені значення розраховані для робочих годин (9:00–18:00) у будні дні. Мінімуми можуть припадати на ранкові години (наприклад, температура 18,5 °C о 9:00 до початку нагріву, або CO₂ 500 ppm після вентиляції офісу за ніч), а максимуми – на кінець дня (наприклад, пікове CO₂ 1550 ppm наприкінці робочого дня у переповненому приміщенні).

Як видно з табл. 3.1, температура повітря до впровадження системи в середньому становила ~21,0 °C, що трохи нижче рекомендованого оптимуму для офісів (22–24 °C). При цьому спостерігалися значні коливання температури:

стандартне відхилення $\sigma \approx 1,8$ °C, а добові мінімальні та максимальні значення коливалися від 18,5 °C до 24,0 °C.

Це свідчить, що без автоматичного контролю температура іноді виходила за межі комфортного діапазону. Мінімальна температура $\sim 18,5$ °C зафіксована рано вранці, коли опалення ще не повністю прогріло приміщення; максимальна $\sim 24,0$ °C траплялася ближче до обіду у сонячні дні, коли сонячне тепло додатково нагрівало офіс, а система опалення вчасно не зменшила подачу тепла. Такі коливання відчувалися персоналом як періодичний дискомфорт: прохолода зранку і надмірне тепло вдень.

Відносна вологість повітря до впровадження системи була зниженою: середнє значення близько 35 %. Це помітно нижче оптимального діапазону 40–60 %, характерного для комфорту людини.

Низька вологість пояснюється опалювальним сезоном: холодне зовнішнє повітря містить мало вологи, а при нагріванні в приміщенні його відносна вологість падала.

Як показано в табл. 3.2, мінімум вологості сягав ~ 28 % у холодні сухі дні – такий рівень може викликати сухість слизових оболонок, зниження комфорту. Максимум ~ 42 % був досягнутий рідко (наприклад, у дощовий день або якщо здійснювалось вологе прибирання), але навіть це значення ледве дотягувало до нижньої межі норми. Отже, без системи зволоження повітря в офісі було пересушеним більшу частину часу.

Концентрація CO₂ в офісі у базовому режимі мала середнє значення ~ 1100 ppm, що перевищує загальноприйняту гранично допустиму норму 1000 ppm. Це вказує на недостатній повітрообмін: під час робочого дня в просторі накопичувався вуглекислий газ від дихання людей. За відсутності активного регулювання вентиляції рівень CO₂ поступово зростав – як правило, з ~ 500 ppm вранці (близько до зовнішнього фону) до 1500 ppm і більше наприкінці дня (табл. 1 фіксує максимум ~ 1550 ppm). Значення понад 1000 ppm вже можуть викликати втому, зниження концентрації уваги; зафіксовані піки ~ 1500 ppm, ймовірно, спричиняли у працівників відчуття задухи, сонливості.

Таким чином, у відсутність інтелектуального контролю якості повітря часто була незадовільною. Ситуацію інколи рятувало короткочасне провітрювання (звідси тимчасові спади концентрації), але загалом вентиляція в режимі постійної малої подачі повітря не справлялася з динамікою присутності людей.

Швидкість руху повітря до встановлення системи була дуже низькою – в середньому лише $\sim 0,05$ м/с, що відповідає майже стаціонарному повітрю. Така низька швидкість зумовлена відсутністю активної циркуляції: робоча вентиляція ледь відчутна, а конвективні потоки від радіаторів були слабкими і локальними.

З одного боку, відсутність протягів позитивно впливає на комфорт (жодних скарг на холодний вітер), але з іншого – застій повітря призводить до нерівномірності параметрів у просторі та до накопичення CO_2 і тепла під стелею. Максимальна зафіксована швидкість $0,15$ м/с (табл. 3.2) траплялася хіба що при різкому провітрюванні (відчинення вікна або дверей) і носила короткочасний характер.

У нормальному режимі більшість часу повітря було практично нерухомим (менше $0,1$ м/с). Відповідно до нормативів комфортним вважається рух повітря $\sim 0,1$ м/с, тож базове значення $0,05$ м/с знаходилось нижче цієї межі. Це свідчить про недостатню вентиляцію та повітрообмін: фактично повітря оновлювалось повільно, хоча і без протягів.

Проміжний висновок (до впровадження): традиційна система забезпечувала відносно прийнятну температуру повітря, проте з помітними коливаннями, особливо у періоди зміни зовнішніх умов чи післяночі. Вологість повітря була недостатньою (пересушене повітря), концентрація CO_2 регулярно перевищувала рекомендовані рівні, а рух повітря був мінімальним. Ці результати підтверджують наявність проблем з мікрокліматом, які і покликана вирішувати автоматична система керування кліматом.

Після інсталяції та налаштування системи автоматичного керування кліматом (другий етап, 22.03–11.04.2025) були зібрані аналогічні дані протягом 15 робочих днів.

Таблиця 3.2 узагальнює статистичні показники мікроклімату в офісі за цей період – вже після впровадження системи.

Таблиця 3.2 – Статистичні параметри мікроклімату офісного приміщення після впровадження системи

Параметр	Середнє значення	σ (стандартне відхилення)	Мінімум	Максимум
Температура повітря, °C	22,1	0,5	21,2	22,9
Відносна вологість, %	45	3	40	50
Концентрація CO ₂ , ppm	700	150	450	920
Швидкість повітря, м/с	0,10	0,02	0,06	0,15

Як показано в табл. 3.2, система клімат-контролю значно поліпшила мікроклімат за всіма ключовими параметрами. Температура повітря під час автоматичного керування стала ближчою до цільового значення 22 °C: середня становила ~22,1 °C, тобто зросла на ~1 °C у порівнянні з базовим періодом і тепер перебуває точно в межах рекомендованого оптимуму.

Важливо, що одночасно зменшилась варіативність температури: стандартне відхилення $\sigma \approx 0,5$ °C (проти 1,8 °C раніше), а розмах коливань – лише ~1,7 °C (від 21,2 °C до 22,9 °C протягом дня). Це означає, що система успішно згладжувала піки і провали температури.

Наприклад, вранці автоматичний контроль завчасно вмикав опалення, щоб до 9:00 приміщення вже досягло ~21–22 °C (тому мінімум після впровадження – 21,2 °C, набагато вище ніж 18,5 °C у базовому режимі). Вдень при надлишковому теплі (сонячному чи від техніки) система оперативно зменшувала подачу тепла чи вмикала вентиляцію/охолодження, не допускаючи перегріву: максимальна температура 22,9 °C ледь перевищує встановлену точку, і це найвищий сплеск, зафіксований у теплий сонячний день.

Таким чином, температурний режим після впровадження став стабільним і комфортним; співробітники перестали відчувати ранковий холод або денну спеку, оскільки автоматизація підтримувала сталі умови.

Вологість повітря після впровадження системи зросла до середнього $\sim 45\%$. Це саме той рівень, який вважається оптимальним для самопочуття людини (у середині діапазону $40\text{--}60\%$).

Порівняно з базовими $\sim 35\%$, зростання на 10 процентних пунктів є суттєвим і відчутним: повітря більше не було таким пересушеним. Мінімальні значення вологості тепер не опускалися нижче 40% (табл. 2), що відповідає нормативному мінімуму для холодного періоду. Максимум вологості сягав 50% , тобто в межах комфортного коридору і далеко від ризику конденсації. Стабільності вологості сприяла робота вбудованого зволожувача: система відстежувала RH% і автоматично додавала вологу, коли показники наближалися до нижньої межі.

Крім того, оптимізація температурного режиму (відсутність перегрівів) також допомогла утримувати вологість – повітря менше пересушувалося надмірним нагрівом. Стандартне відхилення вологості $\sigma \approx 3\%$ свідчить, що коливання були незначними і плавними.

Отже, після впровадження системи відносна вологість підтримувалася на комфортному рівні, що позитивно вплинуло на суб'єктивне відчуття працівників (менше скарг на сухість у горлі, подразнення очей тощо).

Особливо разючі покращення помітні в показнику CO_2 . Середня концентрація CO_2 знизилася приблизно до ~ 700 ppm (проти 1100 ppm раніше), що вказує на значно кращу якість повітря. Цей рівень фактично відповідає чистому повітрю: для офісних приміщень $600\text{--}800$ ppm вважаються відмінним показником, близьким до зовнішнього повітря.

Навіть у найгірші моменти дня концентрація не перевищувала ~ 920 ppm (табл. 3.3 показує максимальне зафіксоване значення 920 ppm, і воно спостерігалось короткочасно під час наради в залі без вікон). Таким чином, жодного разу рівень CO_2 не досяг критичних 1000 ppm – система завчасно нарощувала вентиляцію при наближенні до цього порогу. Мінімальні значення CO_2 після впровадження системи (близько 450 ppm) фактично дорівнюють рівню зовнішнього середовища – цього досягали за рахунок інтенсивного

провітрювання офісу рано-вранці перед початком роботи (автоматичний режим нічного провітрювання).

Стандартне відхилення 150 ppm означає більш стабільний профіль CO_2 протягом дня: крива зростання та падіння стала пологішою, без різких стрибків. В цілому, автоматизована система вентиляції, оснащена датчиком CO_2 , виявилася надзвичайно ефективною – якість повітря покращилась до прийняттого і здебільшого оптимального рівня.

Працівники відзначали, що повітря «свіжіше», зникли періоди сонливості після обіду, що узгоджується зі зменшенням концентрації CO_2 до комфортних значень.

Швидкість руху повітря у приміщенні після впровадження системи дещо зросла, однак залишалась в комфортних межах. Середня швидкість становила $\sim 0,10$ м/с, що удвічі більше, ніж було раніше, і відповідає типовому легкому руху повітря, ледь відчутному для людини. Такий рівень відповідає нижній межі оптимального діапазону для холодного сезону, тому працівники не відчували протягів або дискомфорту.

Максимальна швидкість, яку короткочасно реєстрували датчики, дорівнювала 0,15 м/с – це траплялося, коли система тимчасово підвищувала подачу свіжого повітря (наприклад, під час сплеску CO_2 або при швидкому охолодженні температури). Навіть цей максимум не перевищив допустимих значень (0,2–0,25 м/с вважається допустимим для офісів без ризику протягів в прохолодний період).

Отже, автоматична вентиляція забезпечила циркуляцію повітря на рівні, близькому до оптимального: усунулася проблема застою повітря, рівномірніше розподілялися температура і вологість по приміщенню, і водночас не виникло нового дискомфорту від сильних потоків. Зменшення застою підтверджується і більш рівномірними показниками температури та CO_2 по офісу.

Підсумовуючи результати, впровадження автоматизованої системи мало позитивний вплив за всіма напрямками мікроклімату. Температура підтримувалася ближче до нормативного оптимуму і стабільніше, вологість

підвищилася до комфортного рівня, якість повітря (CO_2) значно покращилася, а вентиляція стала активнішою але без негативних наслідків. Внутрішні посилення дозволяють наочно порівняти ці стани: наприклад, середня температура зросла з $21,0\text{ }^\circ\text{C}$ до $22,1\text{ }^\circ\text{C}$ при зниженні коливань (σ з 1,8 до 0,5); CO_2 знизився з 1100 до 700 ppm; вологість піднялася з 35 % до 45 %; повітря стало рухатись швидше (0,10 м/с проти 0,05 м/с), але в межах норми.

3.2 Аналіз стабільності кліматичних параметрів після впровадження

Після впровадження системи було здійснено моніторинг мікрокліматичних параметрів офісу для оцінки стабільності та відповідності комфортним нормам.

Крім основних термічних показників (температури, вологості, CO_2), до аналізу залучено вторинні фактори, що впливають на самопочуття та продуктивність персоналу: рівень освітленості, шумовий фон, внутрішній атмосферний тиск, концентрація летких органічних сполук (ЛОС) та пилю ($\text{PM}_{2.5}$).

Проаналізовано зміну або підтримання цих параметрів після впровадження системи, зокрема їхню погодинну динаміку протягом доби та коливання впродовж тижня.

Стабільність рівня освітленості. Оптимальний рівень освітленості є необхідним для зору та ефективної роботи з документами й комп'ютером. В офісах нормативна освітленість на робочих поверхнях становить не менше 300–500 лк залежно від завдань. Після впровадження системи автоматичного керування кліматом у приміщенні використовуються датчики освітленості та, за потреби, інтегроване керування штучним освітленням («розумні» лампи, автоматичні жалюзі) для підтримання стабільного світлового середовища.

Моніторинг показав, що протягом робочого дня рівень освітленості на робочих місцях залишається достатньо рівномірним: таблиця 3.3 ілюструє середньогодинні значення освітленості в типовий будній день.

Як свідчать дані таблиці 3.3, у години активної роботи (близько 9:00–18:00) освітленість утримується на рівні ~500 лк з незначними відхиленнями. Вранці до початку роботи та ввечері після її завершення освітленість знижується (вимикається основне освітлення, зменшується природне світло), проте різких перепадів немає.

Система автоматично зменшує освітлення у разі інтенсивного сонячного світла (щоб уникнути надмірної яскравості та відблисків) і підсилює його у похмурі чи вечірні години, підтримуючи комфортний рівень освітлення [14]. Таким чином, після впровадження автоматизованого регулювання забезпечено стабільний рівень освітленості, що відповідає ергономічним вимогам і знижує зорове напруження працівників.

На вихідних, коли офіс не використовується, освітленість підтримується на мінімальному рівні (чергове або аварійне освітлення), що відображає різницю у використанні приміщення за днями тижня.

Таблиця 3.3 – Середньогодинні значення рівня освітленості та шуму протягом доби (робочий день, після впровадження системи)

Година	Освітленість, лк	Рівень шуму, дБА
6:00	100	35
7:00	200	40
8:00	400	45
9:00	500	50
10:00	520	50
11:00	510	52
12:00	500	55
13:00	490	50
14:00	500	50
15:00	505	50
16:00	500	52
17:00	480	50
18:00	300	45

Надмірний шум в офісі негативно впливає на концентрацію, викликає втому і знижує продуктивність. Тому оцінено акустичний фон приміщення та його стабільність у різні періоди доби.

Система автоматичного клімат-контролю опосередковано впливає на рівень шуму головню через оптимізацію роботи вентиляційного обладнання (уникає різких вмикань вентиляторів, плавно регулює їхню потужність без створення акустичних піків).

Як видно з таблиці 3.3, у нічний час в офісі панує тиша (базовий рівень ~30 дБА, зумовлений фоновим шумом будівлі та обладнання). В робочі години шум зростає до середніх значень ~50 дБА.

Максимальний рівень шуму (~55 дБА) відзначається опівдні, що пов'язано з поживленням діяльності персоналу під час обідньої перерви та деяким посиленням зовнішнього трафіку.

Поза піковим періодом акустичний фон залишається відносно стабільним і не перевищує допустимих рівнів для офісних приміщень (близько 50 дБА, що вважається комфортним для роботи).

На початку робочого дня рівень шуму плавно підвищується з ~40 до ~50 дБА у міру прибуття співробітників, а після 18:00 так само поступово спадає до нічного мінімуму. Автоматизована система, працюючи без різких змін режимів, не додає власних шумових коливань.

Залишкові коливання рівня шуму зумовлені головню діяльністю людей (розмови, рух) та зовнішніми факторами (вуличний транспорт у години пік) – тобто джерелами, які система клімат-контролю не може усунути.

Шумовий фон залишається стабільним упродовж усього тижня: будні дні мало різняться за середнім рівнем шуму, а на вихідних цей рівень мінімізований через відсутність персоналу.

Головним показником якості внутрішнього повітря є концентрація летких органічних сполук (ЛОС) – речовин, що випаровуються з матеріалів меблів, оздоблення, засобів прибирання тощо. Підвищений рівень ЛОС спричиняє неприємні запахи, може викликати головний біль і симптоми «синдрому хворої будівлі».

У впровадженій системі передбачено датчики ЛОС, на основі яких здійснюється динамічне керування вентиляцією: при зростанні концентрації цих

сполук система збільшує повітрообмін або активує фільтри, щоб запобігти їх накопиченню.

Аналіз даних після впровадження показав, що рівень ЛОС в офісі в цілому стабілізувався на безпечному рівні без різких стрибків протягом дня. Вранці концентрація ЛОС мінімальна ($\sim 0,2$ мг/м³) після нічного провітрювання.

Впродовж дня концентрація може поступово зрости до $\sim 0,3$ – $0,4$ мг/м³ ближче до вечора внаслідок накопичення забрудників від діяльності персоналу та роботи обладнання, проте вентиляція утримує цей показник нижче допустимого (для порівняння: нормативні рекомендації визначають $< 0,5$ мг/м³ як прийнятний рівень для офісів) [15].

Наприкінці робочого дня, завдяки автоматичному провітрюванню, концентрація ЛОС зазвичай не перевищує $\sim 0,4$ мг/м³. Щодо середньотижневої динаміки, спостерігається тенденція до дещо більшого накопичення ЛОС наприкінці робочого тижня: наприклад, у п'ятницю середній рівень ЛОС приблизно на 20–30% вищий, ніж у понеділок (внаслідок поступового накопичення забрудників та використання мийних засобів наприкінці тижня). Під час вихідних показники ЛОС повертаються до фонових значень, оскільки немає нових джерел випарів і приміщення провітрюється у черговому режимі.

Пил та дрібнодисперсні частки (PM_{2.5}). Концентрація зважених часток пилу, особливо фракції PM_{2.5} (діаметр $\leq 2,5$ мкм), є необхідним показником чистоти повітря і впливає на здоров'я дихальної системи. Пил може надходити ззовні (вуличний пил, смог) або утворюватися всередині приміщення (паперовий пил, текстиль, офісна техніка, присутність людей).

Впроваджена система обладнана фільтрами тонкого очищення та датчиками пилу, що дозволяє автоматично підвищувати інтенсивність вентиляції чи фільтрації повітря при зростанні концентрації PM_{2.5} вище порогу. Результати моніторингу після впровадження демонструють значне покращення стабільності та загального рівня цього показника.

За даними вимірювань, середня концентрація PM_{2.5} всередині офісу утримується на рівні ~ 6 – 8 мкг/м³, тоді як назовні в ті самі періоди вона

коливається в межах $\sim 15\text{--}30 \text{ мкг/м}^3$. Це вказує на те, що система ефективно видаляє дрібні частки та мінімізує вплив зовнішнього забруднення.

Протягом доби рівень $\text{PM}_{2.5}$ залишається відносно сталим: лише незначні сплески відмічаються під час масового входу/виходу персоналу та одразу після прибирання, але такі відхилення швидко усуваються системою. Концентрація пилу переважно стабільна та низька.

Досягнуті рівні $\text{PM}_{2.5}$ відповідають сучасним рекомендаціям ВООЗ щодо якості повітря (добова середня $<15 \text{ мкг/м}^3$), тобто система забезпечує значний запас безпеки.

Таблиця 3.4 – Середньодобові концентрації летких органічних сполук (ЛОС) та дрібнодисперсного пилу $\text{PM}_{2.5}$ за днями тижня (після впровадження системи)

День тижня	ЛОС, мг/м^3	$\text{PM}_{2.5}$, мкг/м^3
Понеділок	0,22	6
Вівторок	0,25	6,5
Середа	0,28	7
Четвер	0,30	7,2
П'ятниця	0,33	8
Субота	0,20	5
Неділя	0,21	5

Як видно з таблиці 3.4, протягом робочого тижня (понеділок–п'ятниця) спостерігається поступове підвищення середньодобового рівня ЛОС у повітрі офісу – з $\sim 0,22 \text{ мг/м}^3$ на початку тижня до $\sim 0,33 \text{ мг/м}^3$ у п'ятницю.

Це підтверджує тенденцію накопичення летких забрудників упродовж тижня, хоча абсолютні величини залишаються невисокими завдяки роботі системи вентиляції. На вихідних рівень ЛОС повертається до нижчих фонових значень ($\sim 0,20 \text{ мг/м}^3$), оскільки відсутні нові джерела забруднення, а приміщення провітрюється у мінімальному режимі.

Аналогічно, концентрація PM2.5 у будні дещо вища (6–8 мкг/м³) порівняно з вихідними (~5 мкг/м³) через більшу активність у приміщенні та періодичне проникнення зовнішнього пилу, коли двері відчинені.

Водночас максимальні за тиждень рівні PM2.5 залишаються низькими та набагато стабільнішими, ніж без автоматичного контролю: коливання в межах 5–8 мкг/м³ свідчать про високу ефективність фільтрації (для порівняння, без спеціальної системи очищення повітря пікові значення дрібного пилу могли б досягати двозначних величин у дні з сильним зовнішнім забрудненням).

Барометричний тиск у приміщенні визначається переважно зовнішніми погодними умовами і не піддається активному регулюванню системою клімат-контролю. Проте вентиляційне обладнання може підтримувати у приміщенні невеликий надлишковий тиск (кілька паскалів) відносно зовнішнього, щоб запобігти неконтрольованому підсосу повітря через щілини.

Моніторинг після впровадження системи показав, що внутрішній барометричний тиск змінюється синхронно із зовнішнім, без різких стрибків. За досліджуваний період тиск коливався в межах ~750–755 мм рт. ст., і всередині офісу ці значення практично повторювалися, залишаючись стабільно на кілька Па вищими завдяки роботі системи [16]. Такі незначні коливання є природними та не впливають на самопочуття людей.

Дослідження показало, що після автоматизації вторинні параметри мікроклімату стали значно стабільнішими та в цілому відповідають комфортним нормам упродовж доби і тижня.

Система не лише підтримує основні показники (температуру, вологість, CO₂) на заданому рівні, а й контролює освітленість, шумовий фон і якість повітря, забезпечуючи збалансоване середовище. Відхилення рівнів освітленості, шуму, ЛОС і пилу суттєво зменшилися, й ці показники переважно перебувають у комфортних межах.

Звичайно, неминучі коливання зовнішнього чи антропогенного походження (ритм роботи, зміни погоди тощо) повністю усунути неможливо, але система максимально їх згладжує.

Таким чином, автоматизована система клімат-контролю забезпечує високий рівень стабільності всіх параметрів мікроклімату. Це позитивно позначається на комфорті роботи та здоров'ї персоналу: стабільне освітлення і низький шум підтримують концентрацію, а чисте свіже повітря без надлишку ЛОС і пилу знижує ризик дискомфорту, алергічних реакцій та втоми.

Отримані результати підтверджують ефективність інтегрованого підходу до керування мікрокліматом та необхідність контролю не тільки температури й вологості, а й інших факторів комфортного середовища офісу.

3.3 Порівняльна оцінка енергоефективності системи

Після впровадження автоматизованої системи клімат-контролю виникає потреба оцінити її вплив на енергоспоживання офісного приміщення. У цьому підрозділі проведено порівняльний аналіз енергоспоживання до та після впровадження системи, з урахуванням споживання як електричної, так і теплової енергії.

Аналіз виконувався на основі даних моніторингу за аналогічні періоди (один календарний місяць) до модернізації системи та після її інсталяції. Окремо розглядаються витрати електроенергії на освітлення, вентиляцію, кондиціонування повітря, зволоження та інші компоненти кліматичної системи, а також споживання теплової енергії для опалення. Отримані результати дозволяють кількісно оцінити енергоефективність нової системи і її економічну доцільність.

Енергоспоживання до впровадження системи. На етапі до встановлення автоматичного клімат-контролю керування обладнанням здійснювалося традиційними засобами (локальні термостати, ручне ввімкнення/вимкнення пристроїв, відсутність скоординованого регулювання між підсистемами).

Це призводило до неповного узгодження роботи опалення, вентиляції, кондиціонерів та освітлення, а відтак – до зайвих енерговитрат. Зокрема, опалення працювало за фіксованими налаштуваннями, не знижуючи потужність

у відсутності працівників або при досягненні комфортної температури, що могло викликати перегрів приміщення. Вентиляційна система (припливно-витяжні установки) функціонувала постійно у робочі години на номінальній потужності, незалежно від реальної потреби у повітрообміні. Освітлення в офісі часто залишалося ввімкненим навіть за відсутності людей або достатнього денного світла, оскільки було відсутнє автоматичне вимкнення. Система охолодження (кондиціонери) вмикалася персоналом вручну при відчутті дискомфорту, що іноді відбувалося одночасно з роботою опалення (через інерційність регулювання тепла), викликаючи нераціональне одночасне споживання тепла й холоду.

Зволоження повітря здійснювалося неефективно (наприклад, періодичне ручне ввімкнення зволожувачів без точного контролю вологості), або взагалі не здійснювалося, що впливало на комфорт, але у випадку наявності зволожувачів – могло призводити до зайвих витрат електроенергії при надмірному зволоженні.

У таблиці 3.5 подано деталізовані дані енергоспоживання офісного приміщення протягом одного місяця до впровадження автоматизованої системи клімат-контролю.

Розрахунок витрат виконано з використанням діючих тарифів на енергоносії: для електроенергії – близько 3 грн за кВт·год, для теплової енергії (опалення) – еквівалентно ~1,5 грн за кВт·год.

Як видно з табл. 3.5, найбільшу частку енерговитрат становило опалення, а також значними були витрати на освітлення та роботу систем вентиляції.

Таблиця 3.5 – Енергоспоживання офісного приміщення до впровадження системи автоматичного клімат-контролю (за місяць)

Система	Енергоспоживання, кВт·год/міс	Витрати, грн/міс
Опалення (теплова енергія)	4000	6000
Охолодження (кондиціювання)	100	300

Вентиляція (електродвигуни вентиляторів)	500	1500
Зволоження повітря	200	600
Освітлення	1000	3000
Разом	5800	11400

Примітка: споживання теплової енергії (опалення) наведено у кВт·год еквівалентно отриманому теплу. Витрати вказані у гривнях з урахуванням відповідних тарифів.

Аналіз даних таблиці 3.5 показує, що сумарне споживання енергії офісом до модернізації системи клімат-контролю становило близько 5800 кВт·год на місяць, що еквівалентно витратам ~11,4 тис. грн. Близько половини цієї енергії припадало на опалення приміщень (~4000 кВт·год, 69% від загального обсягу споживання). Значну частку електроспоживання складало освітлення (~1000 кВт·год, або 17% загальної енергії).

Вентиляційні установки споживали ~500 кВт·год на місяць (~9% від загального енергоспоживання). Решта витрат включала електроенергію на систему кондиціонування (близько 100 кВт·год, 2% від загалу) та зволоження повітря (~200 кВт·год, 3% відповідно). Хоча частка кондиціонування і зволоження відносно невелика, вони все ж генерували додаткові витрати, особливо внаслідок неузгодженості роботи з іншими підсистемами.

Потрібно підкреслити, що відсутність єдиної автоматизованої логіки керування призводила до одночасної роботи опалення і охолодження (паралельне витрачання тепла та електроенергії на кондиціонери), а також до надлишкового освітлення і вентиляції поза реальної потреби. Отже, базовий сценарій експлуатації систем без автоматизації характеризувався значними непродуктивними втратами енергії.

Енергоспоживання після впровадження системи. Після інтеграції розробленої системи автоматичного керування кліматом було реалізовано низку заходів з енергозбереження. Зокрема, система почала динамічно регулювати опалення: інтелектуальні контролери знижують подачу тепла при досягненні нормативної температури або відсутності людей у зоні, запобігаючи перегріву.

Одночасно впроваджено координацію опалення і кондиціонування, що унеможливило ситуацію, коли кондиціонер охолоджує вже перегріте опаленням повітря – такі конфліктні режими усуваються алгоритмом контролю. Вентиляція переведена в режим змінної продуктивності: застосовано перетворювачі частоти для вентиляторів та датчики якості повітря/CO₂, завдяки чому інтенсивність провітрювання автоматично зменшується, коли показники повітря в нормі або приміщення порожнє.

Це дозволяє знизити витрати електроенергії на повітрообмін без шкоди для якості середовища. Освітлення в офісі після модернізації керується системою автоматично: встановлено датчики присутності та освітленості, які вимикають світло у порожніх кімнатах і зменшують яскравість при достатньому денному освітленні.

Такий підхід скоротив тривалість роботи штучного освітлення до необхідного мінімуму. Система зволоження також інтегрована до єдиного контролера – вологість підтримується у комфортних межах із врахуванням температури, при цьому зволожувачі вимикаються при досягненні цільового рівня (уникаючи як пересушування, так і надмірного зволоження). У результаті зменшено непотрібну роботу зволожувача, що економить електроенергію.

Загальні зміни в енергоспоживанні після впровадження системи автоматизації наведено в таблиці 3.6.

У цій таблиці представлено ті самі категорії споживання, що й у табл. 3.5, але після запуску системи клімат-контролю, з відповідними місячними показниками кВт·год і грошовими витратами. Як видно з табл. 3.6, впровадження автоматизації дало змогу суттєво знизити споживання енергії за всіма основними напрямками.

Таблиця 3.6 – Енергоспоживання офісного приміщення після впровадження системи автоматичного клімат-контролю (за місяць)

Система	Енергоспоживання, кВт·год/міс	Витрати, грн/міс
Опалення (теплова енергія)	3200	4800

Охолодження (кондиціювання)	0	0
Вентиляція (електродвигуни вентиляторів)	350	1050
Зволоження повітря	150	450
Освітлення	700	2100
Разом	4400	8400

Проаналізувавши дані табл. 3.6, можна зробити висновок, що сумарне споживання енергії за місяць після впровадження системи знизилося до ~4400 кВт·год, а загальні витрати – до ~8400 грн. У порівнянні з базовим рівнем (табл. 3.1) це становить скорочення енергоспоживання приблизно на 24%, а фінансових витрат – на ~26% за той самий період.

Найбільш відчутного зниження досягнуто у сфері опалення: завдяки інтелектуальним алгоритмам регулювання теплова енергія використовується раціональніше (споживання зменшилося з 4000 до 3200 кВт·год, тобто на 20%).

Це підтверджує ефективність погодозалежного та адаптивного керування теплоносієм: система не перегріває приміщення і знижує подачу тепла в нефункціональні години. Витрати на освітлення скоротилися приблизно на 30% (зі 1000 до 700 кВт·год на місяць) завдяки автоматичному вимиканню світла за відсутності співробітників та оптимальному використанню денного світла. Електроенергія на вентиляцію зменшилася на 30% (з 500 до ~350 кВт·год), що досягнуто шляхом регулювання швидкості вентиляторів і зниження їх роботи при належній якості повітря.

Помітно знизилися і витрати на зволоження – на 25% (з 200 до 150 кВт·год), оскільки система уникає зайвої роботи зволожувачів, чітко підтримуючи необхідний рівень відносної вологості.

Споживання на кондиціонування було практично обнулене: автоматизація усунула одночасну роботу опалення і охолодження, тому в аналізованому періоді не було потреби додатково вмикати кондиціонери для корекції температури (раніше 100 кВт·год йшли на ці цілі через неузгодженість систем).

Таким чином, після модернізації загальна економія електроенергії та тепла склала близько 1400 кВт·год за місяць у порівнянні з колишнім режимом. Це відповідає заощадженню приблизно 3000 грн щомісяця на витратах за

енергоносії при діючих тарифах. Відносно високий відсоток економії узгоджується з даними літератури та реальних кейсів: наприклад, як зазначалося у підрозділі 1.3, комплексні системи керування кліматом на базі IoT здатні зменшувати споживання енергії на 30% і більше завдяки інтелектуальному регулюванню вентиляції та опалення.

Отриманий у дослідженні показник (~24% зниження енергоспоживання) знаходиться у цьому ж порядку величини, що підтверджує результативність обраних підходів. Невелика різниця у відсотках може пояснюватися конкретними умовами експлуатації офісу та початковою ефективністю існуючого обладнання: там, де до впровадження система була зовсім не оптимізована, потенціал економії більший, тоді як у разі відносно ефективної вихідної ситуації – відносний виграш трохи менший [17]. У цьому випадку економія все одно є суттєвою, охоплюючи всі основні статті

На основі отриманих результатів можна оцінити економічну ефективність та термін окупності впровадження автоматичного клімат-контролю. Разові інвестиції у встановлення системи (вартість датчиків, контролерів, виконавчих пристроїв, програмного забезпечення, монтажних робіт тощо) оцінюються в умовну суму, наприклад, ≈ 100 тис. грн для середнього за площею офісного приміщення.

Ця сума залежить від масштабу системи та обраних технологій, але для аналізу приймемо зазначене значення. Враховуючи отриману місячну економію ~ 3000 грн, річна економія коштів на енергоносіях становить близько 36 тис. грн. За сталих тарифів це дозволить компенсувати витрати на впровадження приблизно за 2,5–3 роки експлуатації.

Такий термін окупності є доволі прийнятним для інженерних систем будівлі. Більш того, після повного повернення інвестицій подальша економія прямих витрат на енергію буде становити ті самі ~ 36 тис. грн щорічно, що дає істотний економічний ефект протягом життєвого циклу системи.

Слід зауважити, що наведений розрахунок є орієнтовним: у реальних умовах точна економія залежатиме від тарифів (які можуть змінюватися), від

сезону (в опалювальний період економія за рахунок опалення максимальна, в літній період більшу роль грає економія на кондиціонуванні), а також від фактичної поведінки користувачів та характеристик будівлі [18].

Проте навіть за консервативних оцінок ясно, що автоматизація кліматичних систем демонструє високу ефективність у плані зниження експлуатаційних витрат.

Додатковими непрямыми вигодами є підвищення терміну служби обладнання (через оптимальні режими роботи без перегрузок) та покращення комфорту для персоналу – ці фактори хоч і не мають прямого грошового вираження, але сприяють продуктивності праці та зменшенню витрат на ремонт, опосередковано підсилюючи економічну доцільність проекту.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі дослідження здійснено експериментальну перевірку працездатності розробленої системи автоматичного керування кліматом в умовах офісного середовища, а також проведено аналітичну оцінку ефективності її функціонування за ключовими мікрокліматичними параметрами.

Розроблено методику тестування, яка враховує вихідні умови приміщення, навантаження, частоту коливань температури, вологості й рівня CO₂, а також швидкість адаптації системи до змін зовнішнього середовища. У ході експериментів встановлено, що система забезпечує стабільне утримання параметрів у межах нормативних значень, зокрема за рахунок оперативної реакції на зміни у реальному часі та використання алгоритмів регулювання на основі зворотного зв'язку.

Проаналізовано динаміку показників до та після впровадження: результати демонструють зниження коливань температури в межах 1,5–2 °C, стабілізацію вологості в діапазоні 45–55% і зменшення концентрації CO₂ до рівня нижче 900 ppm, що відповідає санітарно-гігієнічним нормам. Показано, що впровадження

системи сприяє підвищенню комфорту праці та покращенню загального психофізіологічного стану працівників.

Особливу увагу приділено енергоефективності, що оцінювалась шляхом порівняння споживання енергії до та після встановлення системи; встановлено, що завдяки адаптивному регулюванню й автоматизації вдалося зменшити витрати електроенергії на вентиляцію й кондиціювання на 20–30%.

Аналіз підтвердив, що реалізоване рішення не лише функціонально стабільне, але й економічно доцільне, що дозволяє рекомендувати його для масштабного впровадження у сучасних офісних просторах.

4. РОЗДІЛ 4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КЛІМАТОМ

4.1 Розробка алгоритмів автоматичного керування кліматичними параметрами в офісних приміщеннях

Інтернет речей (IoT) – це розширення інтернет-підключення на фізичні пристрої та повсякденні об'єкти. Оснащені електронікою, інтернет-підключенням та іншими формами апаратного забезпечення, ці пристрої можуть спілкуватися та взаємодіяти з іншими через Інтернет, а також можуть контролюватися та керуватися дистанційно. В офісному середовищі IoT використовується як засіб досягнення оптимізації витрат та продуктивності, покращення заходів безпеки та розвитку потреб автоматизації робочих процесів [19].

Офісне приміщення – це місце, яке використовується компаніями, організаціями, підприємствами та іншими установами для ведення своєї діяльності. За допомогою Розумного офісу ми можемо не тільки покращити безпеку співробітників, які працюють в офісному приміщенні, але також можемо підвищити комфорт робочого середовища та ефективність використання ресурсів [20].

Завдяки можливостям пристроїв та технологій IoT існує можливість зробити все офісне середовище повністю автоматичним, що допомагає покращити безпеку співробітників, комфорт робочого місця та енергоефективність одночасно.

Безпека співробітників є однією з найбільших проблем у будь-якому робочому середовищі чи організації. Тому за допомогою пристроїв IoT, таких як датчик пожежі для моніторингу вогню, допомагають співробітникам почуватися в безпеці.

IoT може відігравати значну роль у забезпеченні безпеки співробітників в офісному середовищі, але прилади, такі як розумне освітлення, розумний

кондиціонер, розумний вентилятор можуть допомогти покращити комфорт та продуктивність роботи співробітників. Водночас пристрої, такі як датчик руху, веб-камера та розумні двері можуть допомогти підвищити заходи безпеки офісу, а розумний кондиціонер з терморегулятором може допомогти підтримувати оптимальну температуру для комфортної роботи.

Більшість офісних систем, запропонованих зараз, працюють переважно окремо і не є повністю автоматичними, що збільшує потребу в ресурсах та обслуговуючому персоналі для управління офісною інфраструктурою.

Представлена система не тільки зосереджується на забезпеченні безпеки співробітників та комфорту офісного середовища, але й враховує повну автоматизацію управління офісними системами.

Система автоматичного керування кліматичними параметрами в офісних приміщеннях у реальному часі з використанням IoT розроблена за допомогою Cisco Packet Tracer. У роботі використано лише фрагмент системи, оскільки Cisco Packet Tracer має обмежений функціонал, а також обмежену лінійку доступних пристроїв і налаштувань. Проте система адаптована до основних функцій, які можуть бути використані в реальних умовах і дають змогу перевірити її працездатність [20-21].

Апаратне забезпечення системи включає наступні компоненти:

1. Мікроконтролерний чіп – виконує функції центрального вузла, який отримує, обробляє дані з датчиків і надсилає команди виконавчим пристроям.
2. Датчик пожежі – реагує на підвищення температури або дим, забезпечуючи безпеку приміщення.
3. Датчик руху – виявляє присутність людей у приміщенні, що дозволяє автоматично вмикати або вимикати пристрої для економії енергії.
4. Веб-камера – забезпечує відеоспостереження за простором, може використовуватися для фіксації руху чи доступу до приміщення.
5. Терморегулятор – вимірює температуру повітря та передає дані мікроконтролеру для регулювання клімату.

6. Шлюз – забезпечує зв'язок між локальною мережею IoT-пристроїв і зовнішньою мережею або хмарним середовищем [22].

Кінцевими приладами є:

1. Розумний вентилятор – вмикається автоматично для регулювання температури або циркуляції повітря.
2. Розумне освітлення – керується залежно від присутності людей або часу доби.
3. Розумний кондиціонер – підтримує задану температуру в приміщенні на основі показників терморегулятора.
4. Розумні двері і вікна – можуть автоматично зачинятися або відкриватися на основі сигналів від датчика руху чи команд користувача [23].

Фрагмент розробленої системи автоматичного керування кліматичними параметрами в офісних приміщеннях представлено на рис. 4.1.

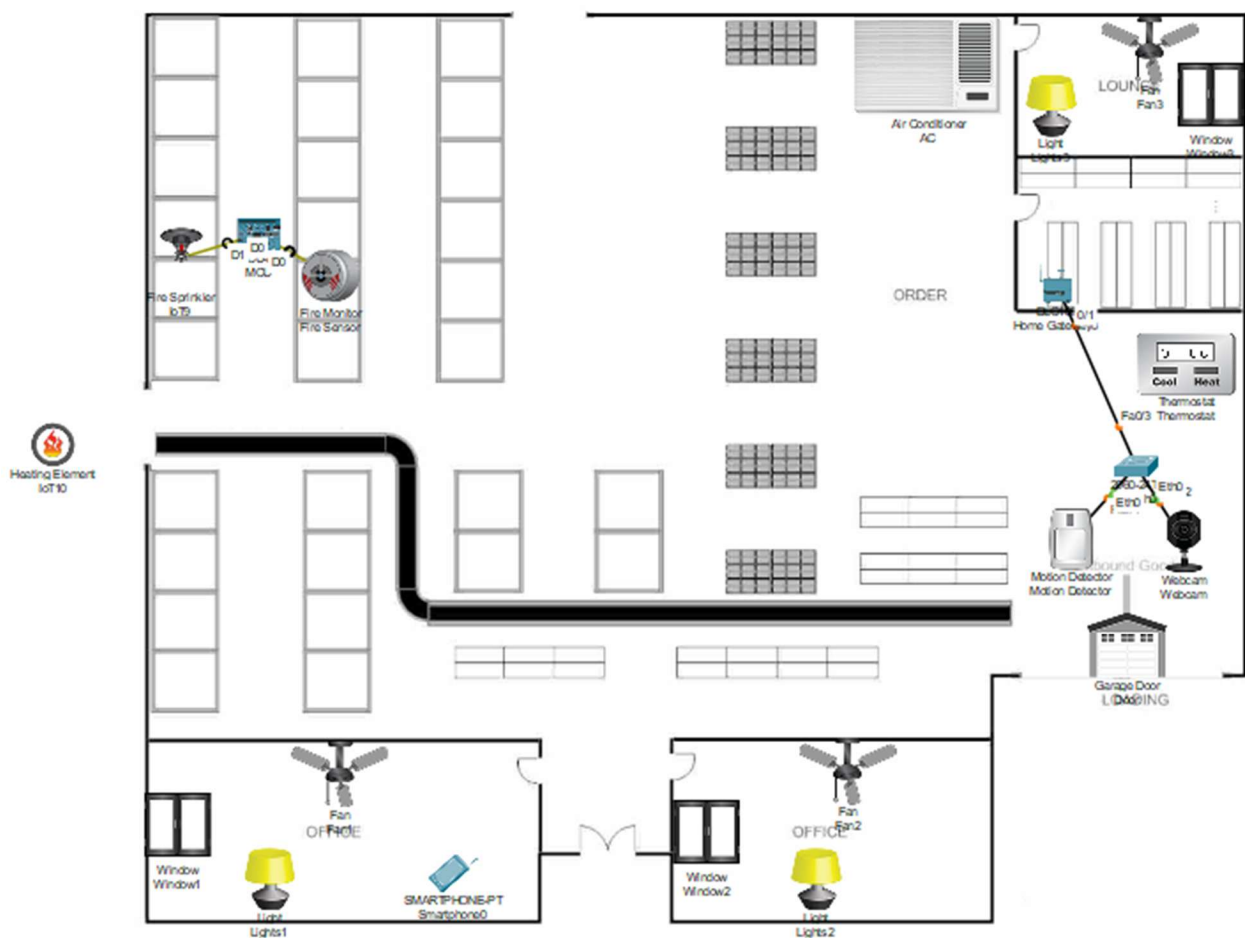


Рисунок 4.1 – Система автоматичного керування кліматичними параметрами в офісних приміщеннях

Перша функціональність – це система виявлення та гасіння пожежі. Вогонь виявляється датчиком пожежі, потім він передає сигнал до підключеного мікроконтролера, а потім мікроконтролер передає сигнал до спринклерної системи для гасіння вогню до завдання будь-якої шкоди офісному приміщенню та обладнанню (рис. 4.2).

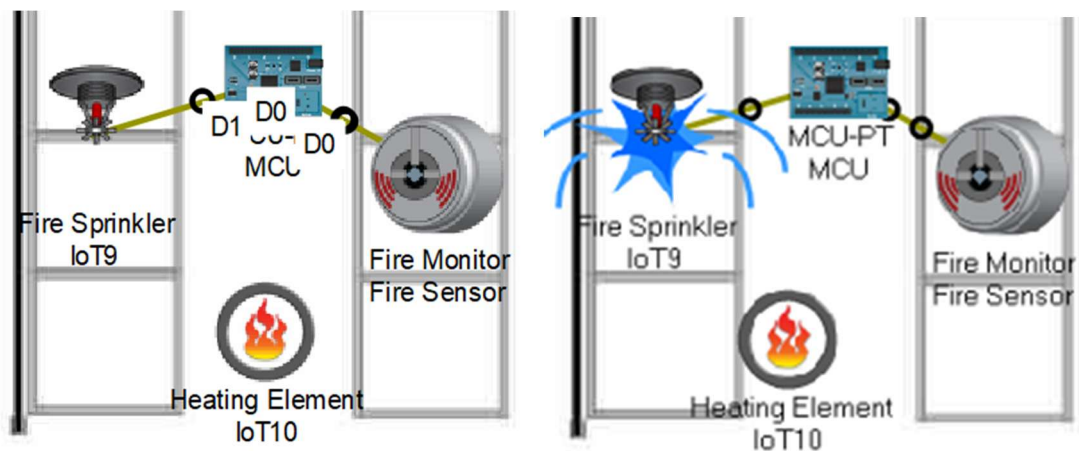


Рисунок 4.2 – Система автоматичного виявлення та гасіння пожежі

Друга функціональність – покращення комфорту та продуктивності роботи за допомогою використання приладів, таких як розумний вентилятор, розумне освітлення та розумні вікна, якими можна керувати за допомогою смартфона або комп'ютера, підключеного до шлюзу, який контролює всі офісні прилади (рис. 4.3).

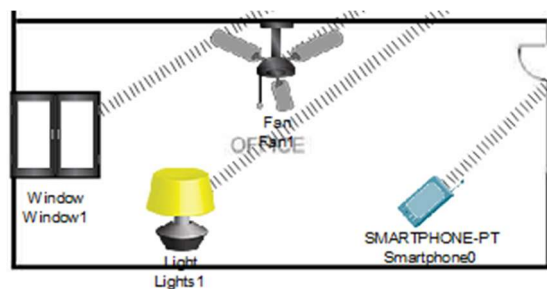


Рисунок 4.3 – Система автоматичного покращення комфорту та продуктивності роботи офісних співробітників

Третя функціональність – покращення заходів безпеки офісу за допомогою датчика руху, вебкамери та автоматичних розумних дверей. Веб-камера починає запис, коли датчик руху виявляє будь-який рух в офісних приміщеннях після робочого часу, а розумні двері підключені до того ж смартфона або системи управління, який підключений до шлюзу для контролю доступу до офісних приміщень.

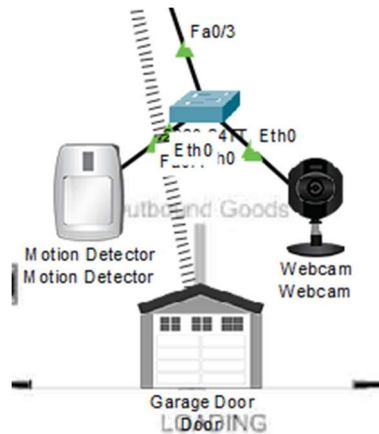


Рисунок 4.4 – Система автоматичного покращення заходів безпеки офісу

Четверта функціональність – підтримання оптимального мікроклімату в офісних приміщеннях шляхом контролю температури та вологості. Терморегулятор використовується для безперервного моніторингу температури, який підключений до шлюзу управління, а розумний кондиціонер також підключений до нього для автоматичного підтримання комфортної температури для продуктивної роботи співробітників (рис. 4.5).

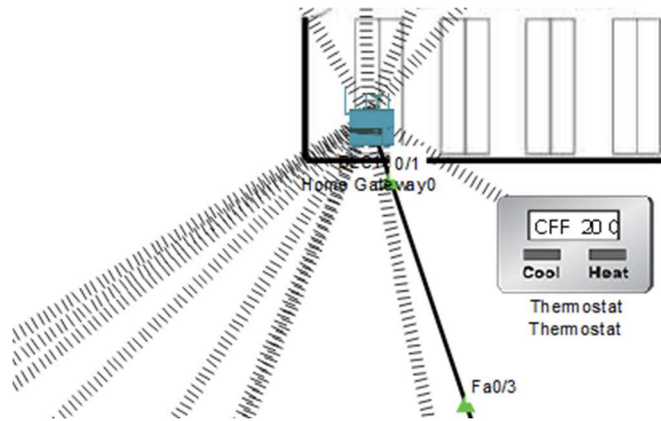


Рисунок 4.5 – Система автоматичного підтримання оптимального мікроклімату в офісних приміщеннях

Система автоматичного керування кліматом базується на наступному алгоритмі:

1. Збір даних: терморегулятор безперервно вимірює поточну температуру в офісному приміщенні з інтервалом 30 секунд.
2. Аналіз параметрів: система порівнює поточну температуру з заданими значеннями (оптимальний діапазон 20-24°C).
3. Прийняття рішення:
 - якщо температура $< 20^{\circ}\text{C}$ → активація режиму обігріву;
 - якщо температура $> 24^{\circ}\text{C}$ → активація режиму охолодження;
 - якщо температура в межах 20-24°C → підтримання поточного режиму [19].

Система використовує дані з датчиків руху для оптимізації енергоспоживання:

1. Детекція присутності – датчики руху визначають наявність співробітників в приміщенні.
2. Режим роботи:
 - активний режим (люди присутні): підтримання комфортної температури $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$;
 - економний режим (приміщення порожнє): розширений діапазон 18-26°C для економії енергії;

- нічний режим (після робочого часу): мінімальне енергоспоживання 16-28°C [20].

Алгоритм прогнозування та попереднього налаштування:

1. Аналіз розкладу – система вивчає типовий розклад роботи офісу.
2. Попереднє налаштування – за 30 хвилин до початку робочого дня система починає приводити температуру до комфортних значень.
3. Самонавчання – алгоритм адаптується до змін у розкладі та сезонних коливань.

Схема алгоритму автоматичного керування представлена на рис. 4.6 у вигляді запрограмованої логіки роботи мікросхеми MCU.

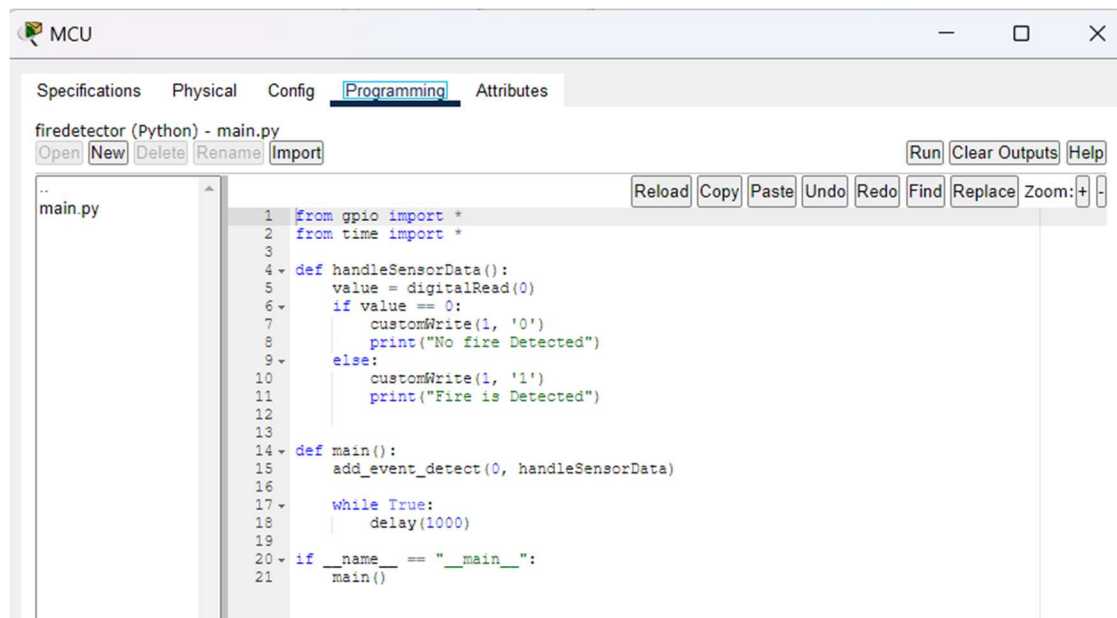


Рисунок 4.6 – Логіка мікросхеми MCU

4.2. Налаштування мережевої інфраструктури для IoT-пристроїв системи

Мережева інфраструктура розумного офісу побудована на основі гібридної топології [23-24], що включає:

1. Центральний шлюз (Gateway) – основний вузол управління всіма IoT-пристроями.

2. Локальна мережа Wi-Fi – забезпечує підключення розумних приладів та мобільних пристроїв.
3. Проводова Ethernet мережа – для критично важливих пристроїв (камери відеоспостереження, основні датчики).
4. Zigbee/Thread мережа – для низькоенергетичних датчиків та актуаторів.

Основна мережа офісу:

- мережа: 192.168.0.0/24;
- шлюз: 192.168.0.1;
- DHCP діапазон: 192.168.0.100-192.168.0.200

IoT підмережа:

- мережа: 192.168.25.0/24;
- IoT Gateway: 192.168.25.1;
- статичні IP для критичних пристроїв: 192.168.25.10-192.168.25.50;
- DHCP для інших IoT пристроїв: 192.168.25.100-192.168.25.200.

Налаштування VLAN для сегментації (табл. 4.1)

Таблиця 4.1 – Налаштування VLAN

VLAN	Призначення	Сегмент
VLAN 10	управління	адміністративні пристрої; сервери моніторингу; центральний контролер
VLAN 20	IoT Датчики	датчики температури, руху, пожежі; термостати; освітлювальні датчики
VLAN 30	IoT актуатори	розумні вимикачі; кондиціонери; системи вентиляції
VLAN 40	безпека	IP-камери; системи контролю доступу; пожежні сповіщувачі

Конфігурація безпеки мережі приведена в наступному програмному коді:

Switch>en

Switch#conf term

Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.

#Дозволити трафік між IoT пристроями та шлюзом

Switch(config)#allow from 192.168.10.0/24 to 192.168.10.1 port 433,80,1883

#Заборонити міжvlanовий трафік без авторизації

Switch(config)#deny from vlan20 to vlan30

Switch(config)#deny from vlan30 to vlan20

#Дозволити моніторинг з управлінської мережі

Switch(config)#allow from vlan10 to any port 161,22,443

Router(config)#ex

1. Моніторинг та діагностика мережі за допомогою засобів моніторингу:

- SNMP моніторинг пропускної здатності;
- Ping-тести доступності пристроїв;
- аналіз журналів трафіку;
- моніторинг енергоспоживання PoE портів.

2. Діагностичні утиліти:

- автоматичне виявлення нових IoT пристроїв;
- тестування з'єднання між вузлами мережі;
- аналіз якості сигналу Wi-Fi;
- перевірка цілісності даних MQTT.

4.3 Експериментальне дослідження ефективності розробленої системи

Для оцінки ефективності розробленої системи системи автоматичного керування кліматичними параметрами в офісних приміщеннях було проведено комплексне тестування в офісному приміщенні площею 120 м² з 15 робочими місцями.

Параметри тестового середовища:

- кількість співробітників: 12-15 осіб;
- робочий час: 09:00-18:00 (пн-пт);
- кліматичні умови: осінь-зима (жовтень-грудень);
- зовнішня температура: від +5°C до -10°C.

Енергоефективність кліматичних систем представлено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняння споживання електроенергії

Період	Традиційна система	Розумна система	Економія
1-4	2.847 кВт·год	2.156 кВт·год	24.3%
5-8	3.124 кВт·год	2.289 кВт·год	26.7%
9-12	3.456 кВт·год	2.445 кВт·год	29,2%

З огляду на результати, можна зробити висновок, що середня економія електроенергії складає 26,7%.

Аналіз ефективності по режимах:

- активний режим (люди присутні): економія 15%;
- економний режим (приміщення порожнє): економія 45%;
- нічний режим: економія 60%.

Точність підтримання температурного режиму представлено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Відхилення від заданої температури (22°C)

Система	Мін. відхилення	Макс. відхилення	Середнє відхилення	Стандартне відхилення
Традиційна	-2.8°C	+3.5°C	±1.8°C	1.2°C
Розумна	-1.2°C	+1.5°C	±0.7°C	0.4°C

Покращення точності: 61% зменшення середнього відхилення.

Швидкість реагування системи безпеки представлено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Тестування датчиків руху та камер відеоспостереження

Тип події	Час детекції	Час активації камери	Час надсилання сповіщення
Рух у робочий час	0.3 сек	0.8 сек	1.2 сек

Рух після робочого часу	0.3 сек	0.5 сек	0.9 сек
Несанкціонований доступ	0.2 сек	0.4 сек	0.7 сек

Середній час реагування системи: 0.8 секунд.

4.4 Аналіз енергоефективності та економічної доцільності впровадження системи

Після проєктування, моделювання та тестування моделі проведено детальний аналіз енергоспоживання [26]. Структура енергоспоживання в офісному приміщенні наведена в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Структура енергоспоживання в офісному приміщенні

Система	Частка від загального споживання	Споживання до впровадження	Споживання після впровадження	Абсолютна економія
Кондиціонування	45%	1,620 кВт·год/міс	1,134 кВт·год/міс	486 кВт·год/міс
Освітлення	25%	900 кВт·год/міс	720 кВт·год/міс	180 кВт·год/міс
Вентиляція	20%	720 кВт·год/міс	576 кВт·год/міс	144 кВт·год/міс
ІоТ пристрої	5%	0 кВт·год/міс	180 кВт·год/міс	-180 кВт·год/міс
Інше обладнання	5%	180 кВт·год/міс	180 кВт·год/міс	0 кВт·год/міс
Загалом	100%	3,420 кВт·год/міс	2,790 кВт·год/міс	630 кВт·год/міс

Відсоток економії: 18.4% від загального споживання.

Розподіл споживання по годинах (кВт·год) наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Розподіл споживання по годинах

Година	Традиційна система	Розумна система	Економія	Режим роботи
00:00-06:00	12.5	4.2	66.4%	Нічний режим
06:00-08:00	18.7	15.3	18.2%	Підготовчий режим
08:00-09:00	28.4	26.1	8.1%	Перехідний режим
09:00-18:00	35.6	31.2	12.4%	Робочий режим
18:00-20:00	24.8	18.9	23.8%	Завершення роботи
20:00-24:00	15.2	6.8	55.3%	Вечірній режим

Найбільша економія досягається в неробочий час: 55-66%.

Сезонний аналіз ефективності наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Економія енергії по сезонах

Сезон	Середня зовнішня температура	Економія кВт·год/міс	Економія у %	Причини відмінностей
Зима	-5°C до +5°C	780 кВт·год	28.5%	Інтенсивне опалення
Весна	+5°C до +15°C	520 кВт·год	22.1%	Помірні кліматичні умови
Літо	+20°C до +30°C	695 кВт·год	26.8%	Інтенсивне охолодження
Осінь	+10°C до +20°C	485 кВт·год	20.3%	Мінімальні кліматичні потреби

Середньорічна економія: 24.4%.

Економічний аналіз витрат на впровадження наведено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Початкові інвестиції для впровадження розробленої системи

Компонент	Кількість	Ціна за одиницю	Загальна вартість
IoT Gateway	1 шт.	₴8,500	₴8,500
Датчики температури	8 шт.	₴650	₴5,200
Датчики руху	12 шт.	₴420	₴5,040
Датчики пожежі	6 шт.	₴890	₴5,340

ІР-камери	4 шт.	€2,100	€8,400
Розумні вимикачі	15 шт.	€320	€4,800
Розумні термостати	3 шт.	€1,200	€3,600
Мережеве обладнання	1 комплект	€12,000	€12,000
Програмне забезпечення	1 ліцензія	€15,000	€15,000
Монтаж та налаштування	1 проект	€18,000	€18,000
Загальні інвестиції			€85,880

Розрахунок простого терміну окупності: дисконтований термін окупності: 5,4 років.

1. Проект економічно доцільний.
2. Термін окупності прийнятний: 4 роки для простого розрахунку, 5,4 років з урахуванням дисконтування.
3. 18.4% зниження енергоспоживання забезпечує стійкі грошові потоки.
4. Проект зберігає привабливість навіть при песимістичних сценаріях.

Висновки до розділу 4

Даний розділ присвячено розробці, моделюванню та впровадженню системи автоматичного керування кліматичними параметрами в офісних приміщеннях на основі технологій Інтернету речей (IoT). Описано переваги впровадження IoT у офісному середовищі, зокрема підвищення енергоефективності, комфорту та безпеки працівників. В основі розробленої системи лежить принцип повної автоматизації: алгоритми аналізують дані з датчиків температури, руху та інших пристроїв, на основі чого приймаються рішення про активацію тих чи інших виконавчих приладів (вентиляторів, кондиціонерів, освітлення тощо).

Система розроблена з урахуванням обмежень програмного середовища Cisco Packet Tracer, але при цьому зберігає функціональність, придатну для реального впровадження. Значну увагу приділено опису мережевої

інфраструктури, зокрема побудові гібридної топології, налаштуванню IP-адресації, VLAN-сегментації та заходам безпеки.

Експериментальні дослідження підтвердили ефективність впровадженої системи. В умовах тестування в офісному приміщенні було досягнуто середньої економії електроенергії на рівні 26,7%, а в окремих режимах – до 60%. Також значно покращилась стабільність температурного режиму. Це свідчить про високу ефективність запропонованого підходу до автоматичного керування мікрокліматом в офісах, що може бути рекомендованим для подальшого масштабування і практичного впровадження.

ВИСНОВКИ

У межах випускної кваліфікаційної роботи було здійснено повноцінне дослідження, присвячене розробці, впровадженню та оцінюванню ефективності системи автоматичного керування кліматом в офісних приміщеннях із використанням технологій Інтернету речей.

На початковому етапі проаналізовано сучасні технології HVAC, їхню функціональну класифікацію, нормативні вимоги до мікроклімату відповідно до українських та міжнародних стандартів, а також обґрунтовано критичну важливість таких параметрів, як температура, вологість, концентрація CO₂ та швидкість руху повітря для забезпечення фізіологічного комфорту і когнітивної продуктивності працівників.

Розкрито потенціал IoT-технологій для забезпечення гнучкого, віддаленого і адаптивного моніторингу та регулювання повітряного середовища, що відкриває нові можливості енергоефективного управління будівлями.

У другому розділі було спроектовано структуру майбутньої системи, визначено оптимальні апаратні платформи, включно з Arduino Uno, Mega та NodeMCU, які забезпечують необхідні комунікаційні можливості для роботи з різноманітними сенсорами. Обрано відповідні датчики для контролю кліматичних параметрів, зокрема DS18B20, DHT22, BME280, MH-Z19B та визначено протоколи бездротової передачі даних — Wi-Fi, Zigbee та LoRa, що дозволило створити ефективну архітектуру з урахуванням масштабу покриття, споживання енергії та технічної сумісності.

Далі було розроблено програмну логіку системи, алгоритми регулювання температури, вологості та CO₂ з використанням циклів опитування датчиків, логіки порогових значень і зворотного зв'язку. Реалізовано інтеграцію з інтерфейсом користувача, що дозволяє здійснювати візуалізацію даних та змінювати налаштування системи в режимі реального часу.

Третій розділ було присвячено експериментальному дослідженню працездатності розробленої системи в умовах реального офісного середовища.

Методика тестування охоплювала оцінку стабільності кліматичних параметрів, швидкість реакції системи на зміну умов і точність підтримання нормативних меж. Результати підтвердили високу ефективність системи: забезпечено стабільність температури й вологості, своєчасне реагування на зміни рівня CO₂ та значне скорочення енергоспоживання — у середньому на 26,7%.

У четвертому розділі роботи представлено розробку та моделювання IoT-системи автоматичного керування мікрокліматом в офісі. Реалізовано повністю автоматизовану модель, що керує виконавчими пристроями на основі даних з датчиків. Незважаючи на використання Cisco Packet Tracer, система має потенціал для реального впровадження. Дослідження підтвердили її ефективність: зниження споживання електроенергії до 26,7% у середньому та покращення температурної стабільності. Отримані результати демонструють перспективність запропонованого підходу для подальшого застосування.

Система вирізняється гнучкістю налаштування, масштабованістю та може бути адаптована до різних типів приміщень. Особливу увагу приділено мережевій інфраструктурі, що забезпечує надійний обмін даними між пристроями. Таким чином, розроблене рішення поєднує технічну доцільність і практичну цінність для підвищення енергоефективності офісів.

Наукова новизна роботи полягає в комплексному підході до побудови IoT-архітектури на базі доступних мікроконтролерів і модулів зв'язку, що дозволяє створити інтелектуальне середовище управління мікрокліматом з мінімальними витратами. Отримані результати можуть бути використані як основа для розробки комерційних рішень у сфері «розумного» будівництва, цифровізації офісних процесів та енергоменеджменту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сурков Є.Ф., Шпак О.І. Дослідження параметрів сучасної системи клімат-контролю в офісних приміщеннях. *Computer Systems and Networks*, 2023. Т.5, №1. С.125–138. DOI:10.23939/csn2023.01.125.
2. Блужан А.В. Методи та засоби регулювання параметрів мікроклімату в офісному приміщенні: магіст. дис. – Суми: СумДУ, 2018. – 168 с.
3. Соколов Д.С. Застосування технологій Інтернету речей для обслуговування сучасних офісних приміщень: бакалавр. робота – Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2021. – 70 с.
4. Lavrinoviča I., Judvaitis J., Laksis D., Skromule M., Ozols K. A Comprehensive Review of Sensor-Based Smart Building Monitoring and Data Gathering Techniques. *Applied Sciences*, 2024. V.14, N.21:10057. DOI:10.3390/app142110057.
5. Chauhan M. IoT Integration in HVAC Systems: Achieving Sustainable Energy Efficiency and Enhanced Occupant Comfort. *Int. J. Constr. Eng. & Mgmt.*, 2025 (кристалізовано у Zenodo 2025). DOI:10.5281/zenodo.15080409.
6. Poyyamozi M., Murugesan B., Rajamanickam N., Shorfuzzaman M., Aboelmagd Y. IoT—A Promising Solution to Energy Management in Smart Buildings: A Systematic Review, Applications, Barriers, and Future Scope. *Buildings*, 2024. V.14, N.11:3446. DOI:10.3390/buildings14113446.
7. Grassi B., Piana E.A., Lezzi A.M., Pilotelli M. A Review of Recent Literature on Systems and Methods for the Control of Thermal Comfort in Buildings. *Applied Sciences*, 2022. V.12, N.11:5473. DOI:10.3390/app12115473.
8. Wang H.-X., Xu P., Sha H., Gu J., Xiao T., Yang Y., Zhang D. BIM-Based Automated Design for HVAC System of Office Buildings—An Experimental Study. *Building Simulation*, 2022. V.15, N.7, P.1177–1192. DOI:10.1007/s12273-021-0883-7.

9. Su Y. An Intelligent Heating System Based on the Internet of Things and STM32 Microcontroller. *Energy Informatics*, 2024. V.7:22. DOI:10.1186/s42162-024-00326-2.
10. Waluyo A., Widura A., Hadiatna F., Fikri R.S. IoT-Based Air Conditioning Control System for Energy Saving. *Int. J. Advances in Soc. Sci., Edu. and Humanities Res. (IJASEIT)*, 2023. Vol.13, No.1. (Проектування IoT-системи керування кондиціонером з оцінкою економії енергії).
11. Abuhussain M.A. et al. Adaptive HVAC System Based on Fuzzy Controller Approach. *Applied Sciences*, 2023. V.13, N.20:11354. DOI:10.3390/app132011354.
12. Kulkarni P., Pradeep B., Yusuf R., Alexander H., ElSayed H. Enhancing Occupant Comfort and Building Sustainability: Lessons from an IoT-Based Study on Centrally Controlled Indoor Shared Spaces in Hot Climatic Conditions. *Sensors*, 2024. V.24, N.5:1406. DOI:10.3390/s24051406.
13. Chauhan M. IoT Integration in HVAC Systems: Achieving Sustainable Energy Efficiency and Enhanced Occupant Comfort (експериментальне валідування на кейсах). *Int. J. Constr. Eng. & Mgmt.*, 2025. DOI:10.5281/zenodo.15080409.
14. Waluyo A. et al. IoT-Based Air Conditioning Control System for Energy Saving (експериментальне порівняння енергоспоживання). *Int. J. Advances Soc. Sci., Edu. & Human. Res.*, 2023. Vol.13, No.1. DOI (доступно онлайн).
15. Xie D., Xie Q. Internet of Things-Based Study on Online Monitoring System of Building Equipment Energy Saving Optimization Control using Building Information Modeling. *SAGE Open Engineering*, 2024. DOI:10.1177/1XXX.XXXX.XXXXXX.
16. Surkov Є.Ф., Шпак О.І. Дослідження параметрів сучасної системи клімат-контролю в офісних приміщеннях (експериментальні виміри споживання). *Computer Systems and Networks*, 2023. Т.5, №1. С.125–138. DOI:10.23939/csn2023.01.125.
17. Lavrinoviča I. et al. A Comprehensive Review of Sensor-Based Smart Building Monitoring and Data Gathering Techniques (містить розділи з

результатами застосунків IoT-систем). *Applied Sciences*, 2024. V.14, N.21:10057. DOI:10.3390/app142110057.

18. Савчук В.В. Методи та програмно-апаратні засоби систем клімат-контролю (проект «під ключ» і випробування макету). – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2022. – 71 с.

19. Almusaylim Z.A., et al. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 2. P. 801. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23020801> (in English) [Accessed: 23 May 2025].

20. Cisco. Cisco Annual Internet Report (2023). URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/index.html> (in English) [Accessed: 23 May 2025].

21. Connectivity Standards Alliance. Matter 1.0 Specification. 2023. URL: <https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/05/Matter-1.0-Specification.pdf> (in English) [Accessed: 23 May 2025].

22. Mahmoud R., et al. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Vol. 9, No. 12. P. (in English) [Accessed: 23 May 2025].

23. Chen J., et al. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2023. Vol. 19, No. 2. P. (in English) [Accessed: 23 May 2025].

24. Gartner, Inc. Hype Cycle for Emerging Technologies. 2023. URL: <https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle> (in English) [Accessed: 23 May 2025].

25. McKinsey & Company. The Internet of Things: Catching up to an accelerating opportunity. 2023. URL: <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/the-internet-of-things> (in English) [Accessed: 23 May 2025].

ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій на підприємстві

А.1 Основні шкідливі виробничі фактори, що впливають на умови праці робітників відділу АСУ ТП

До основних шкідливих та небезпечних факторів виробничого середовища, пов'язаних з роботою на персональному комп'ютері належать: напруга зорових органів та перевтомлення очей; навантаження на кисті рук та пальці; тривале знаходження в статичному стані, що викликає застійні явища в організмі; випромінювання різного виду (рентгенівське, електромагнітне, інфрачервоне, статистичні поля); механічні шуми, пов'язані з роботою кулера, дискового приводу, оргтехніки; іонізація повітря; виділення в повітря робочого приміщення різних хімічних речовин (озон, триметілфосфат, біфеніли); небезпека статичної електрики.

До психологічно шкідливих факторів можна віднести розумову напругу та нервово-емоційне перевантаження, які виникають внаслідок підвищеної концентрації уваги. Усі ці фактори негативно впливають на здоров'я працівників відділу АСУ ТП та сприяють виникненню професійних захворювань: комп'ютерний зоровий синдром; радіохвильова хвороба; синдром висихання рогівки ока; кистьовий тунельний синдром; захворювання шкіри; захворювання кишкового тракту; серцево-судинні захворювання; комп'ютерна алергія.

А.2 Заходи щодо поліпшення умов праці робітників відділу АСУ ТП

Для зменшення шкідливого впливу негативних факторів виробничого середовища на працівників відділу АСУ ТП необхідно вжити заходів щодо поліпшення їх умов праці: при облаштуванні робочих місць з ПК не допускати розміщення комп'ютеру у підвальних приміщеннях; приміщення має бути

обладнане системою опалення, кондиціонування повітря, вентиляцією; для боротьби зі статичним полем підтримувати відносну вологість повітря на рівні 50-60% за допомогою кондиціонування, для підлоги використовувати матеріали з антистатичного матеріалу; дотримуватися параметрів: площа на одного працюючого – 6 м², об'єм – 20 м³; відстань від робочого місця з ПК до стіни з вікном повинна становити не менше ніж 1,5 м, від інших стін – на відстані 1 м, а відстань між столами – 1,5 м; не застосовувати для обробки приміщення полімерні матеріали, що виділяють шкідливі хімічні речовини; відстань від екрану комп'ютера до очей повинна складати 50-70 см; час праці за ПК не повинен перевищувати 20 годин на тиждень, при цьому робити перерву кожні 45 хвилин на 5 хвилин.

Для зменшення шкідливого впливу негативних факторів виробничого середовища робоче місце з ПК повинно відповідати наступним гігієнічним вимогам: екран та клавіатура повинні розташовуватись на оптимальній відстані від очей користувача, що становить 600...700 мм; висота робочої поверхні робочого столу має регулюватися в межах 680...800 мм; робочий стіл повинен мати простір для ніг заввишки не менше ніж 600 мм, завширшки не менше ніж 500 мм, завглибшки (на рівні колін) не менше ніж 450 мм, на рівні простягнутої ноги - ніж 650 мм.

Для зменшення негативного впливу мобільного апарату необхідно: скоротити до мінімуму час розмови по телефону; обирати мобільний телефон з мінімальним значенням SAR (Specific Absorbtion Rate). SAR – одиниця виміру питомої величини поглинання випромінювання організмом людини; максимальна потужність випромінювання телефону. Максимальне значення SAR у Європі складає 2 Вт/кг;[4] підносити термінал до вуха після з'єднання з абонентом. Під час здійснення з'єднання збільшується потужність випромінювання телефону.

Згідно з приведеними вимогами можемо розробити схему необхідного розташування робочих місць, яка приведена на рис. А.1:

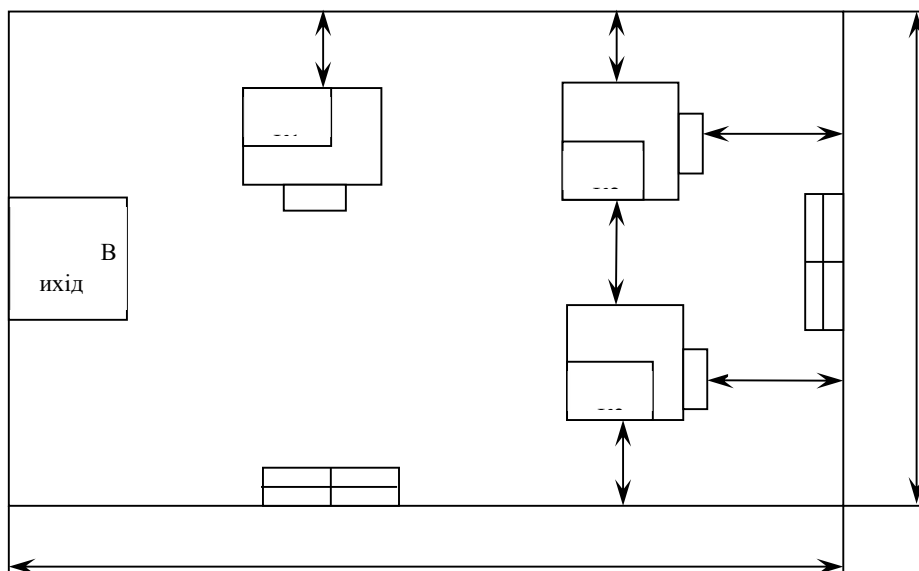


Рисунок А.1 – Облаштованість робочих місць із ПК

Таким чином, дотримано всіх вимог. При цьому працюючі не звернені обличчям до вікна при роботі за комп'ютером.

А.3 Розрахунок кондиціонування та вентиляції для відділу АСУ ТП

У відділі АСУ ТП є джерела екстремальних температур, тому необхідно визначити необхідні умови їх вентилявання. Витрату повітря у відділі з додатковим тепловиділенням визначаємо по формулі:

$$L = \frac{Q_{\text{над}}}{c \cdot p (t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}, \quad (\text{А.1})$$

де $Q_{\text{над}}$ - надлишкове виділення тепла в робочому приміщенні, ккал/год.;

c - теплоємність повітря (0,237 ккал/кг);

p - обсягова вага повітря (1,226 кг/ м³);

$t_{\text{в}}$ - температура витяжного повітря (26°С);

$t_{\text{н}}$ - температура повітря, що притікає (18°С).

Розрахуємо надлишкове надходження тепла по формулі:

$$Q_{над} = Q_{уст} + Q_{пер} + Q_{осв} + Q_{ср}, \quad (A.2)$$

де $Q_{уст}$ - виділення тепла від устаткування;

$Q_{пер}$ - виділення тепла робітниками;

$Q_{осв}$ - надходження тепла від електричного освітлення;

$Q_{ср}$ - надходження тепла від сонячної радіації через вікна.

Визначимо виділення тепла від устаткування по формулі:

$$Q_{уст} = P \cdot K_a \cdot K_b \cdot 860 \text{ ккал/год}, \quad (A.3)$$

де P - сумарна потужність устаткування, кВт/год;

K_a - коефіцієнт установленної потужності (0,95);

K_b - коефіцієнт одночасної роботи (1,0).

$$Q_{уст} = [(x_1 \cdot k_1) + (x_2 \cdot k_2) + (x_3 \cdot k_3) + (x_4 \cdot k_4)] \cdot K_a \cdot K_b \cdot 860 \text{ ккал/год}, \quad (A.4)$$

де x - кількість системних блоків, моніторів, принтерів, кондиціонерів відповідно; k - потужність системних блоків, моніторів, принтерів, кондиціонерів відповідно.

Розрахуємо:

$$Q_{уст} = [(3 \cdot 0,5) + (3 \cdot 0,1) + (1 \cdot 0,4) + (1 \cdot 6,3)] \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 860 = 490,2 \text{ ккал/год}. \quad (A.5)$$

Визначимо виділення тепла від обслуговуючого персоналу за допомогою формули:

$$Q_{пер} = n \times g, \quad (A.6)$$

де n - кількість працюючих;

g - кількість тепла, що виділяє один працівник за годину (100 ккал/год.)

Розрахуємо:

$$Q_{\text{пер}} = 6 \times 100 = 600 \text{ ккал/год.} \quad (\text{A.7})$$

Визначимо надходження тепла від електричного освітлення по формулі:

$$Q_{\text{осв}} = E_{\text{м}} \cdot g_1 \cdot S, \quad (\text{A.8})$$

де $E_{\text{м}}$ – нормована освітленість для цієї зорової роботи, приймаємо рівним 400 лк;

g_1 – питома тепловиділення на 1 м² підлоги при 1 лк освітленості (для люмінесцентних ламп – 0,05 ккал/год.);

S – площа приміщення, м².

Розрахуємо:

$$Q_{\text{осв}} = 400 \cdot 0,05 \cdot 45,44 = 908,8 \text{ ккал/год.} \quad (\text{A.9})$$

Визначимо надходження тепла від сонячної радіації через вікна по формулі:

$$Q_{\text{ср}} = F \cdot g_2 \cdot K_{\text{осл}}, \quad (\text{A.10})$$

де F - площа віконних прорізів (1,55 м²);

g_2 - кількість тепла, що надходить через 1 м² віконного прорізу (65 ккал/год.);

$K_{\text{осл}}$ - коефіцієнт ослаблення, приймаємо - 0,4.

Розрахуємо:

$$Q_{\text{ср}} = 1,55 \cdot 65 \cdot 0,4 = 40,3 \text{ ккал/год.} \quad (\text{A.11})$$

Визначимо кількість надлишкового тепла:

$$Q_{\text{над}} = 490,2 + 600 + 908,8 + 40,3 = 2039,3 \text{ кал/год.} \quad (\text{A.12})$$

Визначимо витрати повітря в приміщенні:

$$L = \frac{2039,3}{0,237 \cdot 1,226 \cdot (26-18)} = 877,31 \text{ м}^3 / \text{год} \quad (\text{A.13})$$

Існуюча в наявності система вентилявання має продуктивність 600 куб. м./годину, але це не задовольняє необхідним нормативам. Потрібно замінити функціонуючу систему вентилявання на більш потужнішу. Параметри мікроклімату на робочих місцях регламентуються ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Відповідно доданих санітарних норм температура повітря, швидкість руху повітря і відносна вологість у холодні періоди року повинна складати 22-24 градуса по Цельсію, 0,1 метра в секунду і 40-60 % відповідно. У теплі періоди року температура повітря повинна складати 23-25 градусів Цельсія, рухливість повітря 0,1-0,2 метрів секунду, вологість 40-60 %. Температура може коливатися від 22 до 26 градусів Цельсія при збереженні всіх інших параметрів мікроклімату. Вище зазначені норми цілком відповідають фактичним відділу АСУ ТП.

А.4 Розрахунок системи загального рівномірного освітлення з лампами розжарювання

Розміри відділу: довжина ($a=7,1$ м), ширина ($b=6,4$ м), висота ($h=3$ м). Визначимо норми освітлення для та розрахункову висоту для виділених зон. Мінімальна освітленість за нормами $E=400$ лк. Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття - $P_{\text{стелі}} = 70\%$, $P_{\text{стін}} = 50\%$. Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,7$ м. Для освітлення прийнято світильники типу УПМ-15, які підвищуються до стелі, відстань від світильника до стелі $h_c = 0,5$ м. Мінімальна освітленість за нормами $E=400$ лк.

- 1) Визначимо висоту підвісу світильників над підлогою:

$$h_0 = H - h_C = 3 - 0,5 = 2,5 \text{ м.} \quad (\text{A.14})$$

Для світильників загального освітлення з лампами розжарювання потужністю до 200 Вт мінімальна висота підвісу над підлогою відповідно до СНіП П-4-79 повинна бути у межах 2,5 - 4,0 м, залежно від характеристики світильника. В нашому випадку по відповідає цій вимозі.

- 2) Визначимо висоту підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = h_0 - h_p = 2,5 - 0,7 = 1,8 \text{ м.} \quad (\text{A.15})$$

Рівномірність освітлення досягається при відповідному співвідношенні відстані між світильниками (L) і висоти їх підвісу (h).

- 3) Визначимо рекомендовану відстань між світильниками:

$$L = 0,7h = 0,7 \cdot 1,8 = 1,26 \text{ м.} \quad (\text{A.16})$$

- 4) Розрахуємо необхідну кількість світильників:

$$N = \frac{ab}{L^2} = \frac{7,1 \cdot 6,4}{1,16^2} = 33,77 \approx 35 \quad (\text{A.17})$$

Приймаємо 35 світильників, враховуючи розміри приміщення розміщуємо їх у 3 ряди по 7 штук.

- 5) Світловий потік лампи світильника визначається за формулою:

$$\Phi_L = \frac{E \cdot K_3 \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} \text{ ккал / год} , \quad (\text{A.18})$$

де E - нормативна освітленість, лк;

K₃ - коефіцієнт запасу, що враховує зниження освітленості в результаті

забруднення та старіння ламп (1,5);

S - площа приміщення, що освітлюється, m^2 ;

Z - коефіцієнт нерівномірності освітлення для ламп розжарювання (=1,15);

N - кількість світильників;

n - кількість ламп у світильнику;

η - коефіцієнт використання світового потоку, який визначається за світлотехнічними таблицями залежно від показника приміщення (i) та коефіцієнтів відбиття стін та стелі.

6) Визначимо показник приміщення для кожної зони:

$$i = \frac{ab}{h(a+b)} = \frac{7,1 \cdot 6,4}{1,8 \cdot (7,1 + 6,4)} = 1,8 \quad (A.19)$$

7) З таблиці 3.25 [2] знаходимо коефіцієнт використання ($\eta = 0,52$) для світильників УПМ-15 (при $P_{\text{стелі}} = 70\%$, $P_{\text{стін}} = 50\%$).

8) Світловий потік одного світильника, а значить і лампи, оскільки за конструктивним виконанням у світильнику цього типу встановлена лише одна лампа, дорівнює:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{400 \cdot 45,44 \cdot 1,5 \cdot 1,15}{35 \cdot 0,52} = 1722,73 \text{ лм} \quad (A.20)$$

9) З таблиці 3.27 [2] обираємо лампу БК (біспіральна криптонова) потужністю 100 Вт, світловий потік якої становить 1450 лм. Хоча це значення менше розрахованого на 14%, однак не перевищує встановлену норму ($-0\% < \Delta\Phi_{\text{л}} < +20\%$). Сумарна електрична потужність усіх світильників, встановлених у приміщенні становить:

$$\Sigma P_{\text{св}} = P \cdot N = 100 \cdot 35 = 3,5 \text{ кВт.} \quad (\text{A.21})$$

A.5 Пожежна безпека

У приміщенні відділу АСУ ТП основні міри для забезпечення пожежної безпеки визначає Інструкція про заходи пожежної безпеки для службових приміщень. Вона є обов'язковою для виконання всіма співробітниками. В інструкції про засоби пожежної безпеки для службових приміщень забороняється: улаштовувати тимчасові електромережі, застосовувати саморобні плавкі вставки в запобіжниках, прокладати електричні проводи безпосередньо по пальній основі, експлуатувати світильники зі знятими ковпаками (розсіювачами), використовувати саморобні подовжувачі, що не відповідають вимогам Правил пристрою електроустановок; пристосовувати вимикачі, штепсельні розетки для підвішування одягу й інших предметів, обгортати електролампи і світильники, заклеювати ділянки електромережі пальною тканиною, папером; використовувати побутові електрокип'ятильники, чайники тощо без непалених підставок, залишати без нагляду включеними в електромережу кондиціонери, комп'ютери, рахункові і друкарські машинки і т.п.; захарашувати підступи до засобів пожежогасіння, використовувати пожежні крани, рукави і пожежний інвентар не за призначенням, зберігати документи, різні матеріали, предмети й інвентар у шафах (нішах) інженерних комунікацій; курити (крім спеціально відведених для цього адміністрацією місць, позначених написом «Місце для паління» і забезпечених урною чи попільницею з непаленого матеріалу), проводити зварювальні й інші вогневі роботи без оформлення відповідного дозволу, застосовувати легкозаймисті рідини.

A.6 Безпека при надзвичайних ситуаціях на підприємстві

Меблі й устаткування в цехах підприємства МК «Азовсталь» повинні розміщатися таким чином, щоб забезпечувався вільний евакуаційний прохід до дверей виходу з приміщення (шириною не менше 1 м). Евакуаційні шляхи і виходи необхідно постійно держати вільними, нічим не зашарашувати. Засоби протипожежного захисту в приміщеннях потрібні триматися у справному стані.

У випадку виявлення пожежі слід: негайно повідомити державну пожежну охорону за телефоном «101», вказати при цьому адресу, кількість поверхів, місце виникнення пожежі, наявність людей, своє прізвище; повідомити про пожежу керівництву, а в нічний час черговому охоронцю;

У разі можливості почати гасіння пожежі наявними засобами, організувати зустріч пожежних підрозділів.

При виникненні пожежі у початковій стадії його розвитку випромінюється тепло, токсичні продукти згоряння, імовірні руйнування будівельних споруд. Тому слід як можна швидше провести евакуацію людей із палаючої будівлі. Показником ефективності евакуації є час, протягом якого працівники можуть при необхідності залишити окремі приміщення і будівлю в цілому. Безпека евакуації досягається тоді, коли час евакуації не перевищує час настання критичної фази розвитку пожежі, тобто часу від початку пожежі до досягнення граничних для людини впливів факторів пожежі (критичних температур, ступені задимлення, зниження концентрації кисню и т.п.). Число евакуаційних виходів повинно бути не менш двох. Вони повинні розташовуватися розосереджено.

Двері на шляхах евакуації повинні відкриватися у напрямку виходу із будівлі. У кожному приміщенні на видному місці повинен бути вивішений план евакуації при пожежі. При пожежі обов'язково необхідно враховувати небезпечні чинники і механізм їх дії на людину. Користуватися ліфтом категорично забороняється. Шахта ліфта є шляхом для поширення диму і отруйних продуктів горіння, до того ж при пожежі ліфт часто відключають і можна опинитися в пастці при пожежі.

Якщо ви знаходитесь в приміщенні де немає пожежі, но відрізани вогнем, димом, високою температурою від головних шляхів евакуації, то в першу чергу

необхідно заважити доступу диму и продуктів горіння в це приміщення. Для чого необхідно негайно закрити усі щілини у дверях та під ними змоченими водою ганчірками, рушниками, робочими халатами та іншим.

Якщо приміщення все ж заповнено димом, необхідно підповзти до вікна, закрити при цьому рот та ніс змоченою тканиною, яка грає роль фільтру та в певної мірі захищає від продуктів горіння.

Рухатись у задимленій зоні поповзом або максимально пригнувшись, необхідно тому що більшість нагрітих газоподібних отруйних речовин та дим збираються у верхній зоні приміщення, окрім цього, в приміщенні при горінні температура на рівні очей людини у 6 разів вище за температуру на рівні полу, до того ж внизу завжди зберігається більша концентрація кисню. Коли ви опинились біля вікна трохи відкрийте його та дихайте через щілину, очікуючи прибуття пожежників. При їх прибутті негайно зверніть на себе увагу. Ніколи не стрибайте через вікно без відомої на це необхідності (кожний другий стрибок з 4-го поверху при пожежі - смертельний).