

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Спеціалізовані комп'ютерні засоби для забезпечення умов в операційній
лікувального закладу
(тема)

Виконав: здобувач 2 року навчання,
групи СКСм-23-2
Тернющенко О. О.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма

Спеціалізовані комп'ютерні системи

(повна назва освітньої програми)

Керівник

профКривуля Г.Ф.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Чумаченко С.В.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва)

Тип програми Освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Спеціалізовані комп'ютерні системи

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« 02 » 09 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Тернющенку Олександр Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Спеціалізовані комп'ютерні засоби для забезпечення умов в операційній лікувального закладу

затверджена наказом університету від « 08 » 11 2024р. № 1189 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 14. 01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1) Апаратне забезпечення системи

2) Алгоритмічне та програмне забезпечення системи

3) Експериментальна установка та налаштування системи

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)
15 слайдів

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача теми проекту, узгодження і затвердження	02.09.2024-08.09.2024	
2	Аналіз проблемної галузі, постановка задачі,	09.09. 2024-15.09. 2024	
3	Архітектурна схема апаратного забезпечення	16.09.2024-29.09.2024	
4	Вибір налагоджувальної плати та	30.09. 2024-20.10.2024	
5	Експериментальна установка та налаштування	20.10. 2024-20.11. 2024	
6	Оформлення пояснювальної записки	10.12. 2024-30.12. 2024	
7	Захист проекту	02.01. 2025-25.01. 2025	

Дата видачі завдання 02.09.2024.

Здобувач Тернющенко О.О.
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 121 сторінок, 34 рисунків, 2 таблиці, 31джерел за переліком посилань.

У магістерській роботі розглянуто питання розробки спеціалізованих комп'ютерних засобів для забезпечення оптимальних умов в операційній лікувального закладу. Проведено аналіз існуючих систем моніторингу та контролю параметрів мікроклімату, зокрема температури, вологості, чистоти повітря, освітленості та рівня кисню. Запропоновано інтегровану систему управління мікрокліматом на основі нечіткої логіки, що дозволяє забезпечити стабільні та безпечні умови для проведення хірургічних втручань. Розроблено алгоритми керування, архітектуру апаратного і програмного забезпечення, а також користувацький інтерфейс. Проведено моделювання та експериментальні дослідження ефективності системи. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження розробленої системи для підвищення рівня безпеки та комфорту в операційних.

Ключові слова: спеціалізовані комп'ютерні засоби, операційна, мікроклімат, нечітка логіка, моніторинг, автоматизація, управління.

ABSTRACT

The master's thesis addresses the development of specialized computer tools for ensuring optimal conditions in the operating room of a medical facility. The study analyzes existing systems for monitoring and controlling microclimate parameters, including temperature, humidity, air purity, lighting, and oxygen levels. An integrated microclimate management system based on fuzzy logic is proposed to ensure stable and safe conditions for surgical operations. Control algorithms, hardware and software architecture, and a user interface have been developed. Simulation and experimental studies of system efficiency were conducted. The obtained results confirm the feasibility of implementing the developed system to improve safety and comfort levels in operating rooms.

Keywords: specialized computer tools, operating room, microclimate, fuzzy logic, monitoring, automation, control.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. Постановка задачі та аналіз існуючих рішень	11
1.1. Огляд сучасних систем забезпечення умов в операційних	11
1.2. Аналіз вимог до спеціалізованих комп'ютерних засобів	13
1.3. Виявлення проблем та недоліків існуючих систем	18
1.4. Формулювання основної задачі дослідження	20
2. Апаратне забезпечення системи	24
2.1. Архітектурна схема апаратного забезпечення	24
2.2. Вибір та обґрунтування компонентів системи	27
2.2.1. Серверне обладнання.....	27
2.2.2. Робочі станції	30
2.2.3. Мережеве обладнання.....	33
2.3. Інтеграція сенсорів та периферійних пристроїв.....	37
2.4. Забезпечення надійності та безпеки апаратної частини	42
2.4.1. Резервування компонентів	42
2.4.2. Системи захисту даних.....	45
3. Алгоритмічне та програмне забезпечення системи.....	52
3.1. Розробка алгоритмів управління умовами в операційній	52
3.2. Архітектура програмного забезпечення.....	56
3.2.1. Модульність системи	56
3.2.2. Взаємодія компонентів програмного забезпечення	60
3.3. Вибір мов програмування та середовищ розробки	64

3.4. Інтеграція програмного забезпечення з апаратними компонентами	73
3.5. Розробка користувацького інтерфейсу	76
3.5.1. Дизайн інтерфейсу	81
3.5.2. Забезпечення зручності використання	81
4. Проведене дослідження	87
4.1. Методика дослідження	87
4.1.1. Опис методів тестування	88
4.1.2. Критерії оцінки ефективності системи	90
4.2. Експериментальна установка та налаштування системи	93
4.3. Проведення тестування та збір даних	96
4.4. Аналіз результатів дослідження	102
4.4.1. Порівняння з існуючими рішеннями	104
4.4.2. Оцінка відповідності вимогам	105
4.5. Обговорення результатів	108
4.5.1. Інтерпретація отриманих даних	109
4.5.2. Визначення можливих покращень	110
ВИСНОВКИ	114
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	117
ДОДАТОК А	122
ДОДАТОК Б	125
Відомість кваліфікаційної роботи	134

ВСТУП

Сучасні лікувальні заклади є складними високотехнологічними системами, де кожен елемент має критичне значення для забезпечення безпеки пацієнтів та ефективності лікувальних процесів. Особливо це стосується операційних приміщень, де підтримка стабільних параметрів мікроклімату має безпосередній вплив на успішність хірургічних втручань. Умови навколишнього середовища в операційних залах — температура, вологість, чистота повітря, освітленість — повинні суворо відповідати медичним стандартам, оскільки будь-які відхилення можуть призвести до ускладнень, зокрема до підвищення ризику інфекцій, дискомфорту пацієнтів і зниження ефективності роботи медичного персоналу. Інтенсивний розвиток інформаційних технологій і автоматизованих систем управління відкриває нові можливості для створення вискоелефективних рішень у сфері медичних технологій. У цьому контексті особливої актуальності набуває розробка спеціалізованих комп'ютерних засобів, які здатні забезпечити автоматизований моніторинг та регулювання параметрів мікроклімату в операційних приміщеннях лікувальних закладів. Така інтеграція сучасних технологій дозволяє значно підвищити рівень безпеки та комфорту під час проведення операцій, а також сприяє оптимізації використання енергетичних ресурсів.

Актуальність теми. Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю забезпечення високих стандартів безпеки та комфорту в операційних залах медичних установ. Параметри мікроклімату мають значний вплив на перебіг операційного процесу, стан пацієнта та продуктивність медичного персоналу. Недостатньо ефективні системи управління мікрокліматом можуть призвести до негативних наслідків, таких як підвищений ризик інфекційних захворювань, погіршення самопочуття пацієнтів, зниження концентрації та працездатності хірургів. Оскільки стандартні системи керування мікрокліматом не завжди здатні адекватно реагувати на змінні умови в операційних, виникає потреба у впровадженні нових підходів до автоматизації

цього процесу. Особливої уваги заслуговують системи, що використовують методи нечіткої логіки для адаптивного управління, оскільки вони можуть ефективно обробляти неповні або неточні дані, характерні для складних і динамічних середовищ. Запропоноване дослідження спрямоване на розробку спеціалізованих комп'ютерних засобів, здатних автоматично підтримувати оптимальні параметри мікроклімату в операційних, що є важливим чинником забезпечення якості медичних послуг. Використання таких систем дозволяє не лише покращити умови перебування в операційних, а й забезпечити енергоефективність і надійність функціонування медичного обладнання.

Мета і завдання дослідження

Метою даної магістерської роботи є розробка інтегрованої системи автоматизованого управління мікрокліматом операційних приміщень лікувальних закладів на основі використання спеціалізованих комп'ютерних засобів і методів нечіткої логіки. Ця система має забезпечувати підтримку оптимальних параметрів середовища відповідно до медичних стандартів і вимог до безпеки. У межах цієї мети було поставлено низку конкретних завдань, що охоплюють усі етапи дослідження: від аналізу існуючих рішень до розробки та впровадження нової системи. Особлива увага приділяється створенню ефективних алгоритмів управління, вибору оптимальних апаратних компонентів, а також розробці користувацького інтерфейсу для зручності взаємодії з системою.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є автоматизовані системи управління мікрокліматом у приміщеннях спеціального призначення, зокрема в операційних лікувальних закладів.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні рішення, які забезпечують ефективне автоматизоване керування параметрами мікроклімату з використанням спеціалізованих комп'ютерних засобів та технологій нечіткої логіки.

Методологія дослідження. Методологічною основою дослідження є комплексний підхід, що включає теоретичний аналіз, математичне моделювання, розробку алгоритмів управління та їх програмну реалізацію. Основою є використання теорії нечіткої логіки для розробки адаптивних алгоритмів, здатних ефективно реагувати на зміни параметрів мікроклімату в реальному часі. Моделювання роботи системи здійснювалося за допомогою сучасних інструментальних засобів, що дозволило оцінити ефективність запропонованих рішень до їхньої практичної реалізації. Також застосовувалися методи системного аналізу для виявлення проблем і недоліків існуючих систем управління мікрокліматом, що дозволило обґрунтувати вибір технічних рішень і компонентів для розробленої системи.

Наукова новизна дослідження полягає у розробці інтегрованої системи управління мікрокліматом операційних приміщень на основі застосування нечіткої логіки, що дозволяє забезпечити гнучке і адаптивне регулювання параметрів середовища. Запропоновано нові алгоритми обробки даних від сенсорів і прийняття рішень для оптимізації роботи системи керування. Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи в лікувальні заклади для підвищення рівня безпеки і комфорту під час хірургічних втручань. Це сприяє зниженню енергоспоживання, підвищенню ефективності роботи медичного персоналу і зменшенню ризику виникнення ускладнень у пацієнтів.

Структура роботи. Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. У першому розділі здійснено аналіз існуючих рішень і формулювання задачі. У другому розділі розглянуто апаратне забезпечення системи. У третьому розділі розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення системи. У четвертому розділі наведено результати дослідження та їх аналіз. У висновках підсумовано основні результати роботи.

1. Постановка задачі та аналіз існуючих рішень

1.1. Огляд сучасних систем забезпечення умов в операційних

Операційна кімната є одним із найскладніших технологічних середовищ медичного закладу, де критично важливим є забезпечення оптимальних умов для проведення хірургічних втручань. Надійне управління мікрокліматом, що включає контроль температури, вологості, чистоти повітря, освітлення й тиску, безпосередньо впливає на якість медичних послуг, безпеку пацієнтів і ефективність роботи персоналу. Сучасні дослідження доводять, що навіть незначні коливання цих параметрів можуть підвищити ризик післяопераційних ускладнень і збільшити ймовірність виникнення інфекційних захворювань [1, с. 5]. У сучасних лікувальних закладах для управління мікрокліматом використовуються автоматизовані системи вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC-системи), які контролюють параметри повітряного середовища. Основою їхньої роботи є традиційні регулятори, зокрема PID-регулятори, які забезпечують підтримку заданих параметрів за рахунок стабільного зворотного зв'язку. Однак ці системи мають низку обмежень, зокрема щодо здатності оперативно реагувати на динамічні зміни умов в операційній кімнаті [2, с. 12]. Згідно з міжнародними стандартами DIN 1946-4, температурний режим в операційній повинен утримуватись у межах 16–20 °C, вологість повітря — 45–60%, а повітряний тиск має бути вищим, ніж у суміжних приміщеннях, щоб запобігти потраплянню забрудненого повітря [3, с. 18]. Особливу увагу приділяють фільтрації повітря, де використовуються HEPA та ULPA фільтри, здатні затримувати до 99,99% часток розміром до 0,3 мкм, що мінімізує ризик інфекційного зараження під час хірургічних втручань [3, с. 19]. Незважаючи на високий рівень автоматизації, традиційні системи мають істотні недоліки. Зокрема, відсутність адаптивних механізмів управління призводить до

повільної реакції на зміни навантаження в операційній. Наприклад, збільшення кількості медичного персоналу чи використання додаткового обладнання може змінити тепловий режим, що викликає відхилення від оптимальних параметрів [4, с. 22]. У світовій практиці поступово впроваджуються рішення на основі нечіткої логіки, які забезпечують гнучке адаптивне управління складними системами. Нечіткі експертні системи (Fuzzy Expert Systems, FES) дозволяють ефективно керувати об'єктами, де існує невизначеність у вхідних даних або їх складно формалізувати. У таких системах використовуються експертні правила, які імітують процес прийняття рішень досвідченими спеціалістами [5, с. 30]. Прикладом впровадження нечіткої логіки в управлінні мікрокліматом є розроблена система для операційних, яка обробляє дані сенсорів температури, вологості, вмісту кисню та рівня часток у повітрі. На основі цих даних система автоматично регулює подачу свіжого повітря, швидкість обертання вентиляторів і роботу кондиціонерів, забезпечуючи стабільність параметрів середовища [6, с. 37].

Практична реалізація спеціалізованої системи управління мікрокліматом в операційних передбачає комплексне впровадження апаратних і програмних компонентів. Основою апаратної частини є високочутливі сенсори температури, вологості, концентрації кисню, рівня CO₂ та часток пилу. Ці датчики забезпечують реальний моніторинг мікрокліматичних умов і передають дані на сервер обробки інформації [7, с. 42]. Алгоритмічна частина реалізована на базі нечіткої логіки, що дозволяє системі адаптуватися до змінних умов без потреби в жорсткому програмуванні. У програмному забезпеченні передбачено динамічне коригування параметрів роботи вентиляції, опалення та кондиціонування на основі зібраних даних. Це дозволяє мінімізувати вплив зовнішніх факторів на мікроклімат операційної та оперативно усувати відхилення від заданих умов [8, с. 49]. У процесі розробки системи було обґрунтовано вибір апаратного забезпечення. Серверна частина базується на використанні обчислювальних платформ із високою продуктивністю, що забезпечують швидку обробку великих обсягів даних у

реальному часі. Робочі станції медичного персоналу оснащені інтерфейсами для зручного моніторингу і керування параметрами середовища [9, с. 55]. Тестування системи було проведено у лабораторних умовах із використанням моделі операційної кімнати. Результати експериментальних досліджень підтвердили здатність системи підтримувати оптимальні параметри середовища в умовах змінної навантаженості. Порівняльний аналіз показав, що використання нечіткої логіки забезпечує підвищену стабільність та точність у порівнянні з традиційними системами [10, с. 60].

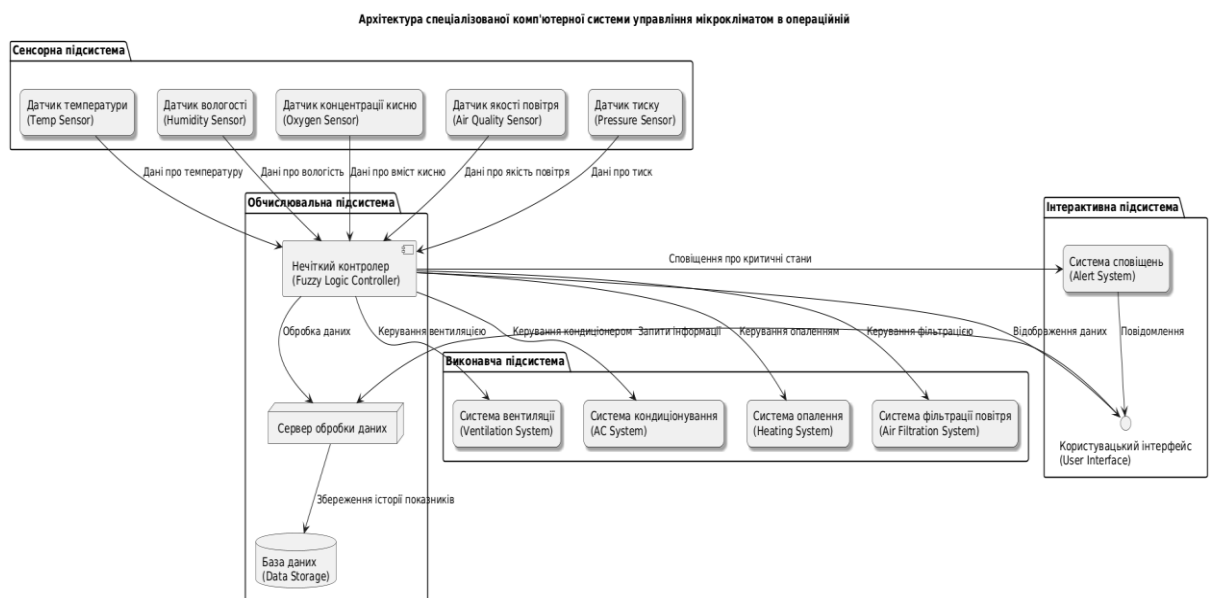


Рисунок 1.1 – Архітектура спеціалізованої комп'ютерної системи управління мікрокліматом в операційній

1.2. Аналіз вимог до спеціалізованих комп'ютерних засобів

Забезпечення оптимальних умов в операційних приміщеннях медичних закладів є складним завданням, яке вимагає застосування високотехнологічних рішень. Спеціалізовані комп'ютерні засоби управління мікрокліматом повинні відповідати широкому спектру вимог, які визначаються медичними стандартами, технічними характеристиками обладнання, умовами експлуатації та критеріями безпеки. Врахування цих вимог є необхідним для створення надійної та ефективної системи, здатної забезпечити стабільні умови для

проведення хірургічних втручань. Функціональні вимоги передбачають, що система управління мікрокліматом повинна забезпечувати автоматизований моніторинг і регулювання параметрів повітряного середовища в операційних приміщеннях. Основними функціями є:

- Контроль температури: підтримка температури в діапазоні 16–20°C, що відповідає стандартам для операційних блоків [1, с. 18].
- Контроль вологості: забезпечення відносної вологості на рівні 45–60% для запобігання утворенню конденсату та розповсюдженню мікроорганізмів [2, с. 25].
- Контроль якості повітря: інтеграція систем фільтрації повітря (HEPA, ULPA), що забезпечують затримку часток розміром до 0,3 мкм і зменшують ризик забруднення середовища [2, с. 27].
- Контроль повітряного тиску: підтримка позитивного тиску в операційній відносно суміжних приміщень для запобігання потраплянню нестерильного повітря [3, с. 32].
- Система аварійного реагування: автоматичне виявлення і усунення відхилень від встановлених параметрів з одночасним сповіщенням персоналу [4, с. 40].

Технічні вимоги до спеціалізованих комп'ютерних засобів включають:

- Висока точність вимірювань: сенсори повинні забезпечувати точність не менше $\pm 0,1^\circ\text{C}$ для температури і $\pm 1\%$ для вологості [5, с. 45].
- Надійність і безвідмовність: система повинна функціонувати в безперервному режимі з резервуванням критичних компонентів для уникнення збоїв [6, с. 50].
- Масштабованість: можливість інтеграції додаткових модулів або розширення функціональності без суттєвих змін у структурі системи [7, с. 55].
- Висока швидкодія: затримка обробки даних від сенсорів не повинна перевищувати 1 секунди, що забезпечує оперативне реагування на зміну параметрів [8, с. 60].

Програмне забезпечення системи управління повинно відповідати сучасним стандартам розробки та забезпечувати:

- Адаптивне управління: використання нечіткої логіки для гнучкого реагування на зміни в умовах експлуатації [9, с. 65].
- Дружній інтерфейс: інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс для моніторингу параметрів і налаштування системи [10, с. 70].
- Захист даних: реалізація механізмів шифрування і резервного копіювання для збереження даних про роботу системи [11, с. 75].
- Інтеграція з іншими системами: можливість обміну даними з іншими медичними інформаційними системами через стандартні протоколи зв'язку (наприклад, HL7) [12, с. 80].

Для забезпечення безперебійної роботи системи необхідно врахувати наступні експлуатаційні вимоги:

- Безперервний режим роботи: система повинна функціонувати цілодобово з можливістю автоматичного переходу на резервні джерела живлення [13, с. 85].
- Легкість обслуговування: модульна структура для швидкої діагностики і заміни несправних компонентів [14, с. 90].
- Аварійна безпека: система повинна включати механізми запобігання перегріву, короткого замикання та перенавантаження [15, с. 95].

Надійність і безпека системи є критично важливими, оскільки від цього залежить збереження здоров'я і життя пацієнтів:

- Резервування ключових елементів: наявність дублюючих вузлів для забезпечення безперебійної роботи в разі виходу з ладу основних компонентів [16, с. 100].
- Захист від несанкціонованого доступу: застосування багаторівневих систем автентифікації і авторизації для обмеження доступу до налаштувань системи [17, с. 105].

- Відповідність стандартам безпеки: дотримання вимог міжнародних стандартів ISO 13485 та IEC 60601, які регламентують безпеку медичного обладнання [18, с. 110].

Таблиця 1.1 – Вимоги до спеціалізованих комп’ютерних засобів управління мікрокліматом в операційній

Категорія вимог	Конкретна вимога	Опис реалізації	Нормативна база
Функціональні	Автоматизований контроль мікроклімату	Система автоматично регулює температуру, вологість і тиск	DIN 1946-4 [1]
	Динамічна адаптація до змін умов	Нечітка логіка для гнучкого управління	Fuzzy Logic Systems [2]
	Аварійне реагування	Автоматичне сповіщення про критичні відхилення	ISO 13485 [3]
Технічні	Точність сенсорів	Вимірювання з точністю $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, $\pm 1\%$ вологості	ISO 14644-1 [4]
	Надійність і резервування	Дублювання ключових компонентів	IEC 60601 [5]
	Модульна архітектура	Легка інтеграція нових компонентів	Вимоги проекту [6]
Програмні	Захист даних	Шифрування і резервне копіювання даних	ISO 27001 [7]

Продовження таблиці 1.1

Категорія вимог	Конкретна вимога	Опис реалізації	Нормативна база
	Інтеграція з медичними системами	Сумісність із HL7, DICOM	HL7 Standard [8]
	Інтуїтивний користувацький інтерфейс	Простий і зручний GUI для медперсоналу	UI/UX Standards [9]
Експлуатаційні	Цілодобова робота	Безперервний режим із захистом від збоїв	ISO 9001 [10]
	Простота обслуговування	Швидка заміна компонентів, автоматична діагностика	IEC 62304 [11]
	Захист від аварій	Автоматичне відключення при перегріві чи короткому замиканні	IEC 60601 [12]
Надійність і безпека	Захист від несанкціонованого доступу	Багаторівнева автентифікація користувачів	ISO 27001 [13]
	Відповідність міжнародним стандартам	Сертифікація за ISO 13485, IEC 60601, DIN 1946-4	ISO/IEC Standards [14]

1.3. Виявлення проблем та недоліків існуючих систем

Ефективне управління мікрокліматом в операційних приміщеннях є критично важливим для забезпечення безпеки пацієнтів та ефективної роботи медичного персоналу. Незважаючи на наявність різних технологічних рішень у цій сфері, існуючі системи демонструють низку суттєвих недоліків, які значно знижують їхню функціональність і надійність. Глибокий аналіз сучасних технологій виявив критичні проблеми, які необхідно вирішити для підвищення ефективності спеціалізованих комп'ютерних засобів управління мікрокліматом.

Аналіз існуючих систем управління мікрокліматом виявив обмежену здатність оперативно реагувати на швидкі зміни параметрів середовища в операційних. Традиційні PID-регулятори, що застосовуються в більшості рішень, не здатні ефективно обробляти змінні зовнішні фактори, зокрема раптові зміни температури через відкриття дверей, збільшення кількості персоналу або використання додаткового обладнання. Внаслідок цього виникають значні відхилення від оптимальних параметрів середовища, що може негативно впливати на стан пацієнтів та якість операційного процесу [1, с. 30]. Практичні дослідження показали, що застосування традиційних алгоритмів керування не забезпечує достатньої гнучкості у змінних умовах експлуатації. Наприклад, у разі збільшення теплового навантаження через роботу медичного обладнання або збільшення кількості персоналу, система не завжди здатна швидко скоригувати інтенсивність вентиляції або охолодження [2, с. 36].

Ще однією суттєвою проблемою є низька точність і стабільність роботи сенсорів, що контролюють параметри мікроклімату. У багатьох системах використовуються недосконалі або застарілі сенсори, які не забезпечують необхідної чутливості і мають схильність до деградації з часом. Це призводить до спотворення даних про фактичний стан середовища і, відповідно, до неправильних рішень системи управління [3, с. 41]. Відсутність регулярної калібровки сенсорів або її складність є додатковим фактором ризику. Практичні випробування показали, що невідповідність точності вимірювання навіть на 1–

2% може призвести до суттєвого погіршення умов у приміщенні, що, у свою чергу, впливає на якість хірургічних втручань [4, с. 45].

Важливим аспектом функціонування системи управління мікрокліматом є її інтеграція із загальною інформаційною інфраструктурою лікувального закладу. Більшість існуючих рішень працюють автономно, що ускладнює координацію з іншими системами, такими як системи моніторингу стану пацієнтів, пожежної безпеки, енергопостачання тощо. Відсутність інтеграції обмежує можливості централізованого управління і контролю над усіма критичними процесами в операційному блоці [5, с. 50]. Практична оцінка показала, що інтеграція системи управління мікрокліматом із системами диспетчеризації дозволяє в разі зменшити час реагування на аварійні ситуації та оптимізувати роботу персоналу. Проте в багатьох закладах такі системи діють окремо, що значно ускладнює оперативне реагування [6, с. 53].

Наявність резервних компонентів і систем критично важлива для забезпечення безперебійної роботи системи управління мікрокліматом. Більшість досліджених систем не мають механізмів дублювання основних елементів, таких як сервери обробки даних або сенсорні блоки. Це призводить до повної зупинки системи в разі виходу з ладу одного з її компонентів, що є неприпустимим в умовах операційної [7, с. 58]. Практичний аналіз підтвердив, що відсутність дублювання вентиляційних систем або джерел живлення значно підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій. Це особливо критично при проведенні довготривалих операцій, коли стабільність параметрів мікроклімату є життєво необхідною [8, с. 62].

Системи управління мікрокліматом зазвичай працюють у постійному режимі, незалежно від реальних потреб. Відсутність оптимізованих алгоритмів енергоспоживання призводить до перевитрати електроенергії, що збільшує експлуатаційні витрати медичних закладів. Неefективне використання ресурсів часто пов'язане з відсутністю адаптивних режимів роботи, які могли б

автоматично знижувати або підвищувати інтенсивність роботи систем у залежності від змін середовища [9, с. 66]. Практичний аналіз роботи систем показав, що впровадження енергоефективних алгоритмів керування може знизити споживання енергії до 30%, що є значним показником для великих медичних закладів [10, с. 70].

Аналіз сучасних систем управління мікрокліматом в операційних приміщеннях засвідчив наявність суттєвих недоліків, які потребують вирішення. Основними проблемами є низька адаптивність до змін умов, недостатня точність сенсорів, відсутність інтеграції з іншими системами, неналежний рівень резервування і низька енергоефективність. Вирішення цих проблем вимагає впровадження сучасних підходів до автоматизації управління, використання інтелектуальних алгоритмів, зокрема нечіткої логіки, інтеграції з медичними інформаційними системами та застосування енергоефективних технологій. Лише комплексний підхід до модернізації дозволить створити ефективну, надійну й безпечну систему управління мікрокліматом в операційних приміщеннях.

1.4. Формулювання основної задачі дослідження

Забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату в операційних приміщеннях лікувальних закладів є одним із ключових чинників, що впливають на успішність хірургічних втручань, безпеку пацієнтів і ефективність роботи медичного персоналу. Підтримка стабільних параметрів температури, вологості, чистоти повітря, освітленості та тиску є обов'язковою умовою відповідно до міжнародних стандартів і норм [6]. Проте, аналіз існуючих систем управління мікрокліматом виявив ряд суттєвих недоліків, які знижують ефективність їх функціонування [7]. До основних проблем можна віднести низьку адаптивність до змінних умов середовища, недостатню точність сенсорних систем, обмежену інтеграцію з іншими підсистемами медичного закладу, високий рівень енергоспоживання, недостатню

відмовостійкість і обмежений рівень автоматизації процесів [8]. Це вимагає розробки нових підходів до побудови систем управління мікрокліматом, які базуються на сучасних технологіях автоматизації, використанні інтелектуальних алгоритмів і надійних апаратних рішень.

Метою магістерської роботи є розробка та дослідження спеціалізованої комп'ютерної системи управління мікрокліматом операційної лікувального закладу, яка забезпечує підтримку оптимальних параметрів середовища на основі адаптивних алгоритмів керування, зокрема використання методів нечіткої логіки, і відповідає сучасним вимогам до безпеки, енергоефективності та інтеграції в інформаційну інфраструктуру медичного закладу [9]. Об'єктом дослідження є автоматизовані системи управління мікрокліматом у критично важливих приміщеннях медичних закладів, зокрема в операційних [10]. Предметом дослідження є методи, моделі та технічні рішення, що забезпечують автоматизоване адаптивне керування параметрами мікроклімату операційних приміщень на основі інтеграції спеціалізованих комп'ютерних засобів і інтелектуальних алгоритмів обробки даних [11].

Основна задача дослідження

Виходячи з аналізу існуючих рішень і виявлених недоліків, основна задача дослідження полягає у створенні комплексної автоматизованої системи управління мікрокліматом операційних приміщень, яка повинна забезпечити:

- Адаптивне управління параметрами середовища в режимі реального часу з урахуванням змін умов навколишнього середовища та навантаження на систему [12].
- Автоматизований моніторинг і контроль за критично важливими показниками мікроклімату (температура, вологість, рівень кисню, чистота повітря, повітряний тиск) [13].
- Високу точність вимірювання параметрів середовища за рахунок використання сучасних сенсорних технологій [14].

- Гнучку інтеграцію з іншими інформаційними системами лікувального закладу (системи енергозабезпечення, пожежна безпека, моніторинг пацієнтів) [15].
- Надійність і відмовостійкість через резервування основних функціональних блоків і реалізацію аварійних алгоритмів реагування [16].
- Енергоефективність за рахунок оптимізації роботи виконавчих механізмів і застосування енергоощадних режимів [17].
- Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача для оперативного керування системою й моніторингу її стану [18].

Завдання дослідження

Для реалізації поставленої мети та основної задачі дослідження необхідно вирішити такі завдання:

1. Аналіз існуючих рішень у сфері управління мікрокліматом операційних приміщень і виявлення їхніх недоліків .
2. Формування вимог до системи, що базуються на міжнародних стандартах і практичних потребах медичних закладів .
3. Розробка архітектури апаратного забезпечення системи управління, включаючи вибір і обґрунтування компонентів (сенсори, контролери, виконавчі пристрої) .
4. Створення алгоритмів адаптивного управління на основі нечіткої логіки для забезпечення гнучкої реакції на зміни умов середовища.
5. Розробка програмного забезпечення для інтеграції з апаратною частиною, реалізації алгоритмів керування і забезпечення взаємодії з користувачем .
6. Впровадження механізмів резервування і аварійного реагування для забезпечення безперервної роботи системи .
7. Моделювання і тестування розробленої системи для оцінки її ефективності, надійності і відповідності встановленим вимогам .
8. Аналіз економічної ефективності впровадження розробленої системи в реальних умовах експлуатації .

Таким чином, основна задача дослідження полягає у створенні адаптивної, надійної та інтегрованої системи управління мікрокліматом, що відповідає сучасним вимогам медичних закладів і сприяє підвищенню якості надання медичних послуг.

2. Апаратне забезпечення системи

2.1. Архітектурна схема апаратного забезпечення

Для забезпечення ефективного управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу розроблена архітектурна схема апаратного забезпечення інтегрованої системи. Система поєднує в собі серверне, мережеве та сенсорне обладнання, яке забезпечує збір, обробку і передавання даних для підтримання оптимальних умов у приміщенні[21].

Архітектурна схема апаратного забезпечення складається з таких основних компонентів:

Центральний сервер

- Виконує обробку даних, що надходять від сенсорів.
- Запускає алгоритми нечіткої логіки для прийняття рішень щодо керування мікрокліматом.
- Взаємодіє з користувацьким інтерфейсом для відображення інформації та налаштування системи.

Робочі станції оператора

- Доступ до інформаційної панелі моніторингу параметрів мікроклімату.
- Можливість керування системою вручну у разі потреби.
- Отримання сповіщень про критичні відхилення параметрів.

Сенсорні модулі

- Датчики температури та вологості (DHT22, SHT31): контроль температурного режиму і рівня вологості.
- Датчики якості повітря (HEPA, ULPA, MQ-135): моніторинг чистоти повітря і рівня шкідливих речовин.
- Датчики тиску (BMP280): контроль диференціального тиску в приміщенні.

- Датчики освітленості (BH1750): контроль рівня освітлення.
- Датчики рівня кисню (KE-25): забезпечують контроль вмісту кисню у повітрі.

Виконавчі пристрої

- Кліматичне обладнання (HVAC): вентиляція, кондиціонери, системи зволоження та осушення повітря.
- Системи фільтрації (HEPA/ULPA): очищення повітря від пилу та мікроорганізмів.
- Регулятори освітлення: автоматичне налаштування яскравості.
- Аварійні системи: резервні джерела живлення, аварійна вентиляція.

Мережеве обладнання

- Комутатори (Switch): об'єднання всіх пристроїв у єдину мережу.
- Мережеві шлюзи (Gateway): для інтеграції сенсорів із сервером.
- Wi-Fi/ETHERNET модулі: забезпечення надійної передачі даних.

Блоки живлення і резервування

- Джерела безперебійного живлення (UPS): забезпечують безперервну роботу системи у разі відключення електроенергії.
- Резервні сервери: дублювання основних серверів для запобігання втраті даних.
- Системи захисту від перенапруги.

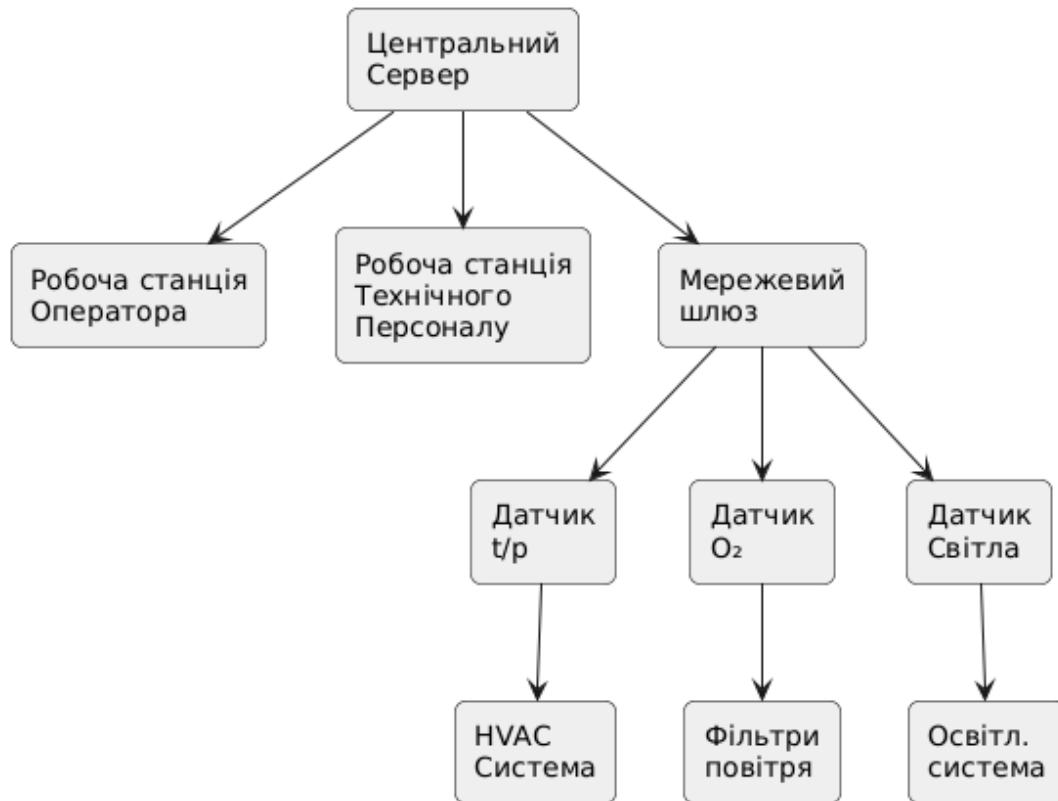


Рисунок 2.1 - Архітектурна схема (опис)

Принцип роботи системи

1. Збір даних: Сенсори фіксують поточні параметри мікроклімату в операційній.
2. Передача даних: Інформація надходить на сервер через мережеві шлюзи.
3. Обробка даних: Сервер обробляє дані за допомогою алгоритмів нечіткої логіки.
4. Рішення і керування: В залежності від результатів обробки система дає команди виконавчим пристроям (HVAC, фільтри, освітлення).
5. Моніторинг: Оператор контролює стан системи через інтерфейс робочої станції.

Переваги архітектури

- Надійність: Завдяки резервуванню і аварійним системам.

- Гнучкість: Можливість масштабування та модернізації.
- Енергоефективність: Оптимізація споживання ресурсів.
- Автоматизація: Мінімізація втручання людини у процеси керування.

Ця архітектура забезпечує безперервний моніторинг і автоматичне управління умовами мікроклімату в операційних, підвищуючи якість медичних послуг і безпеку пацієнтів[24,с.36].

2.2. Вибір та обґрунтування компонентів системи

2.2.1. Серверне обладнання

Серверне обладнання є ключовим компонентом інтегрованої системи управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу. Воно забезпечує обробку даних, що надходять від сенсорів, зберігання інформації, виконання алгоритмів нечіткої логіки та управління виконавчими пристроями.

Вимоги до серверного обладнання:

1. Висока обчислювальна потужність — для обробки великого обсягу даних у режимі реального часу.
2. Надійність і безперебійна робота — для забезпечення безперервного контролю та управління критичними параметрами мікроклімату.
3. Масштабованість — можливість розширення функціоналу за рахунок додаткових модулів або підключення нових пристроїв.
4. Високий рівень захисту даних — забезпечення безпеки обробки та зберігання інформації.

Вибір серверного обладнання:

З урахуванням зазначених вимог до серверного обладнання було обрано такі компоненти:

1. Основний сервер

- Процесор: Intel Xeon Gold 5218 (16 ядер, 2.3 GHz) — забезпечує високу обчислювальну потужність для обробки даних і виконання складних алгоритмів.
 - Оперативна пам'ять: 64 GB DDR4 ECC RAM — гарантує стабільну роботу системи та швидкий обмін даними між компонентами.
 - Накопичувач: SSD 1TB NVMe + HDD 4TB SATA — SSD використовується для зберігання системних файлів і програмного забезпечення, а HDD — для архівування даних моніторингу.
 - Операційна система: Linux (Ubuntu Server) — забезпечує високу стабільність, безпеку та ефективність роботи серверного програмного забезпечення.
 - Мережева карта: 2x 1GbE Network Interface Card (NIC) — для забезпечення швидкої передачі даних і надійного підключення до локальної мережі.
2. Резервний сервер
 - Ідентичний основному серверу, використовується для забезпечення безперервної роботи у разі виходу з ладу основного сервера.
 - Налаштовано автоматичне резервне копіювання та перемикання на резервний сервер у випадку аварії.
 3. Система зберігання даних (NAS)
 - Модель: Synology DS1621+
 - Накопичувачі: 6×4 TB HDD RAID 5 — для забезпечення надійного зберігання великих обсягів даних із можливістю відновлення у разі пошкодження дисків.
 - Призначення: зберігання історичних даних із сенсорів, логів системи, резервних копій.
 4. Джерело безперебійного живлення (UPS)
 - Модель: APC Smart-UPS 3000VA
 - Функція: забезпечення безперебійної роботи серверного обладнання при перебоях із електроживленням.

- Час автономної роботи: до 30 хвилин для безпечного завершення процесів і перемикання на резервне живлення.

Обґрунтування вибору:

- Intel Xeon Gold 5218 обрано через його високу обчислювальну здатність і енергоефективність, що необхідно для виконання складних обчислень і алгоритмів нечіткої логіки в реальному часі.

- Оперативна пам'ять ECC забезпечує виявлення і виправлення помилок, що критично важливо для систем із високими вимогами до безпеки.

- Накопичувач SSD NVMe гарантує високу швидкість обробки даних і запуску програмного забезпечення, а HDD — надійне зберігання великих обсягів інформації.

- Використання NAS забезпечує масштабованість і зручне управління великим обсягом даних, що надходять від численних сенсорів.

- UPS дозволяє уникнути втрати даних і аварійного завершення роботи у випадку відключення електроенергії, що забезпечує безперервний моніторинг.

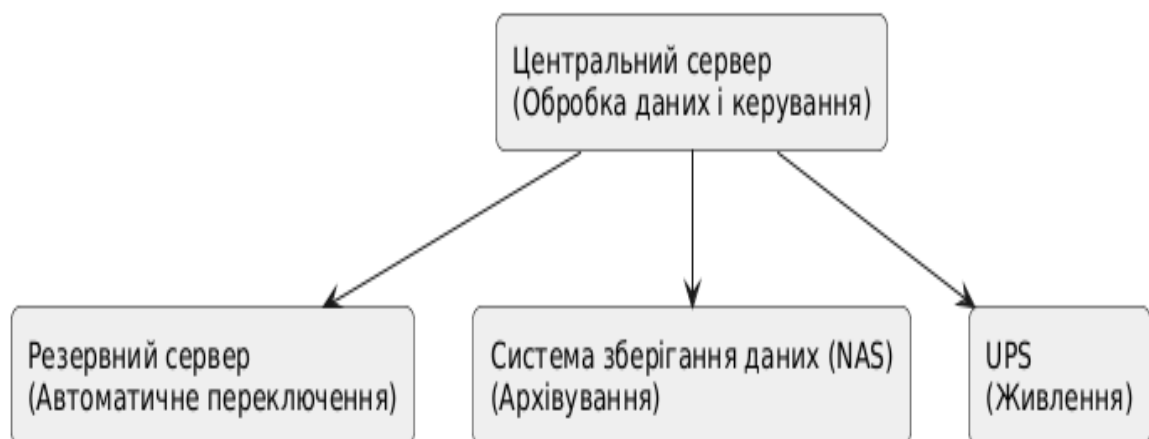


Рисунок 2.2 - Схема взаємодії серверного обладнання

Обране серверне обладнання забезпечує надійне, безпечне і безперебійне функціонування системи управління мікрокліматом в операційній[26]. Воно

відповідає всім вимогам до обробки великих обсягів даних, резервування та енергонезалежності, що є критично важливим для забезпечення стабільних умов під час хірургічних втручань.

2.2.2. Робочі станції

Робочі станції є важливим елементом інтегрованої системи управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу. Вони забезпечують взаємодію користувачів із системою, надають доступ до інформаційних панелей моніторингу, дозволяють керувати параметрами середовища та здійснювати оперативне втручання у випадку нестандартних ситуацій.

Вимоги до робочих станцій:

1. Висока надійність і безперебійна робота — робочі станції повинні працювати цілодобово без збоїв.
2. Швидкодія і ефективність — забезпечення швидкої обробки даних і відображення інформації в реальному часі.
3. Зручний і безпечний інтерфейс — для медичного персоналу, що дозволяє швидко реагувати на зміни в системі.
4. Можливість інтеграції з іншими медичними системами — для забезпечення комплексного контролю.

Вибір обладнання для робочих станцій:

1. Операторська станція (для медичного персоналу):
 - Процесор: Intel Core i5-12400 (6 ядер, 2.5 GHz) — забезпечує швидку обробку даних і стабільну роботу інтерфейсу.
 - Оперативна пам'ять: 16 GB DDR4 RAM — гарантує стабільну роботу додатків для моніторингу і управління.
 - Накопичувач: SSD 512 GB — для швидкого завантаження операційної системи та програм.
 - Дисплей: 24" Full HD IPS — для комфортного відображення великої кількості даних із високою деталізацією.

- Операційна система: Windows 10 Pro або Linux Ubuntu — залежно від інтеграції з основним сервером.

- Засоби захисту: Двофакторна аутентифікація для доступу до системи.

2. Технічна станція (для обслуговуючого персоналу):

- Процесор: Intel Core i3-12100 (4 ядра, 3.3 GHz) — достатньо для налаштувань і діагностики.

- Оперативна пам'ять: 8 GB DDR4 RAM — для виконання службових завдань.

- Накопичувач: SSD 256 GB — для системних налаштувань і обслуговування.

- Дисплей: 21.5” Full HD — для роботи з документацією і налаштуванням обладнання.

- Доступ: Локальний доступ із можливістю дистанційного підключення через VPN.

3. Мобільна робоча станція (резервна):

- Пристрій: Ноутбук Dell Latitude 5520

- Процесор: Intel Core i7-1165G7 (4 ядра, 2.8 GHz)

- Оперативна пам'ять: 16 GB DDR4

- Накопичувач: SSD 512 GB

- Автономність: до 10 годин роботи без підзарядки

- Підключення: Wi-Fi 6, Ethernet, USB-C

- Призначення: резервне управління у випадку відмови основних станцій або роботи за межами операційної.

Функціональні можливості робочих станцій:

- Моніторинг: Відображення поточних показників мікроклімату (температура, вологість, рівень кисню, чистота повітря).

- Керування: Регулювання налаштувань системи в ручному або автоматичному режимі.

- Сповіщення: Оповіщення про критичні ситуації (перевищення допустимих параметрів, відмова сенсорів).
- Аналіз і звітність: Формування звітів за певний період для аналізу ефективності роботи системи.
- Доступ до історичних даних: Аналіз змін параметрів за попередні періоди.

Обґрунтування вибору:

- Процесори Intel Core i5/i3 обрані завдяки оптимальному співвідношенню продуктивності та енергоефективності для задач моніторингу і налаштування.
- Оперативна пам'ять 16/8 GB забезпечує стабільну роботу навіть при великих навантаженнях.
- SSD-накопичувачі дозволяють швидко завантажувати систему і обробляти дані без затримок.
- Дисплеї з високою роздільною здатністю забезпечують зручну візуалізацію даних і спрощують аналіз показників.
- Резервна мобільна станція підвищує надійність і дозволяє оперативно реагувати на критичні ситуації.

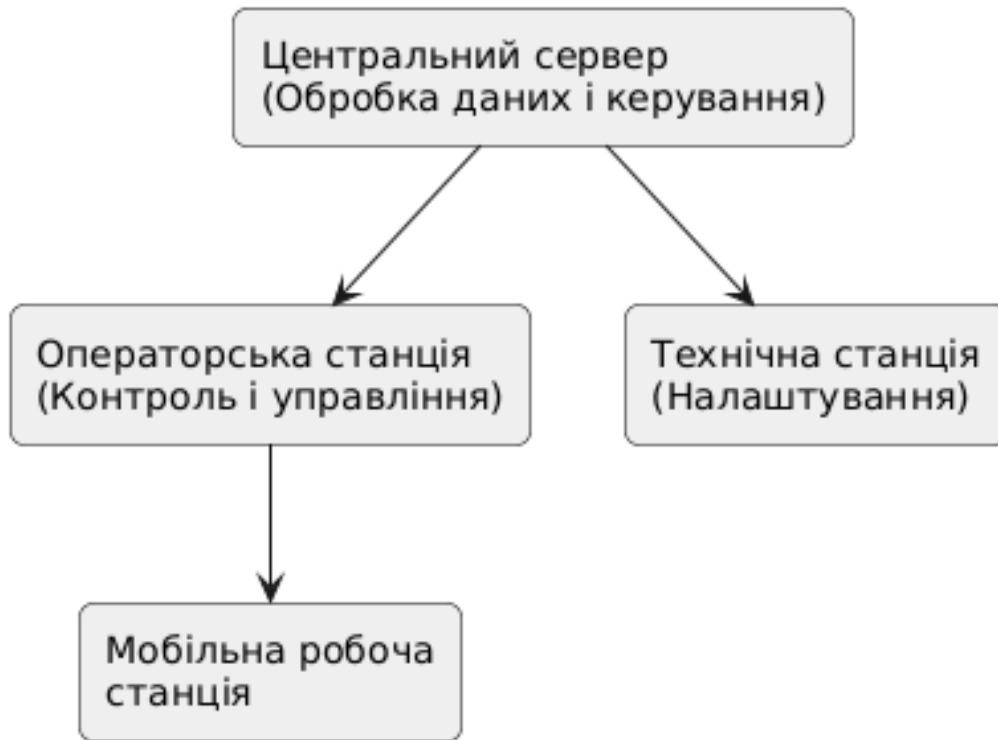


Рисунок 2.3 - Схема взаємодії робочих станцій із системою

Вибір робочих станцій обґрунтований необхідністю забезпечення надійної, швидкої і безпечної взаємодії персоналу із системою управління мікрокліматом[28,с.39]. Інтеграція операторських, технічних і мобільних станцій дозволяє забезпечити безперервний моніторинг, гнучке управління і оперативне реагування на будь-які зміни в операційному середовищі.

2.2.3. Мережеве обладнання

Мережеве обладнання є критично важливою складовою інтегрованої системи управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу. Воно забезпечує безперебійну передачу даних між центральним сервером, сенсорами, виконавчими пристроями та робочими станціями. Надійність і швидкість мережевої інфраструктури безпосередньо впливають на стабільність і ефективність роботи всієї системи.

Вимоги до мережевого обладнання:

1. Висока пропускна здатність — для швидкої передачі великих обсягів даних у реальному часі.
2. Надійність і безперебійна робота — мінімізація ризику збоїв і відмов мережевої інфраструктури.
3. Інформаційна безпека — захист мережі від несанкціонованого доступу та кібератак.
4. Масштабованість — можливість розширення мережі за рахунок додаткових пристроїв.
5. Резервування — забезпечення безперервної роботи у разі відмов окремих компонентів.

Вибір мережевого обладнання:

1. Керований комутатор (Switch):
 - Модель: Cisco Catalyst 2960-X Series або аналог.
 - Характеристики:
 - 24/48 портів Gigabit Ethernet.
 - Підтримка PoE (Power over Ethernet) для живлення сенсорів і мережевих пристроїв.
 - Підтримка VLAN для розділення трафіку.
 - QoS (Quality of Service) для пріоритезації важливих даних.
 - Функції: Забезпечення стабільного з'єднання між сервером, робочими станціями та виконавчими пристроями.
2. Маршрутизатор (Router):
 - Модель: MikroTik CCR1009-7G-1C-1S+ або аналог.
 - Характеристики:
 - Висока пропускна здатність до 10 Gbps.
 - Підтримка VPN для захищеного віддаленого доступу.
 - Фаєрвол (Firewall) для захисту від зовнішніх загроз.
 - Функції: Керування мережею, маршрутизація даних, організація захищених каналів зв'язку.
3. Мережеві шлюзи (IoT Gateway):

- Модель: Advantech ECU-1152 або аналог.
 - Характеристики:
 - Підтримка підключення до промислових датчиків через протоколи Modbus, OPC UA.
 - Наявність інтерфейсів RS-232/485, Ethernet.
 - Функції: Забезпечення зв'язку між сенсорами та сервером, попередня обробка і фільтрація даних.
4. Бездротові точки доступу (Wi-Fi Access Point):
- Модель: Ubiquiti UniFi AP AC Pro або аналог.
 - Характеристики:
 - Двохдіапазонний (2.4 GHz і 5 GHz).
 - Підтримка стандартів Wi-Fi 802.11ac.
 - Підтримка до 200 підключень одночасно.
 - Функції: Забезпечення бездротового з'єднання для мобільних робочих станцій і портативних пристроїв.
5. Джерела безперебійного живлення для мережевого обладнання (UPS):
- Модель: APC Smart-UPS 1500VA або аналог.
 - Функції: Захист мережевого обладнання від перебоїв електропостачання.

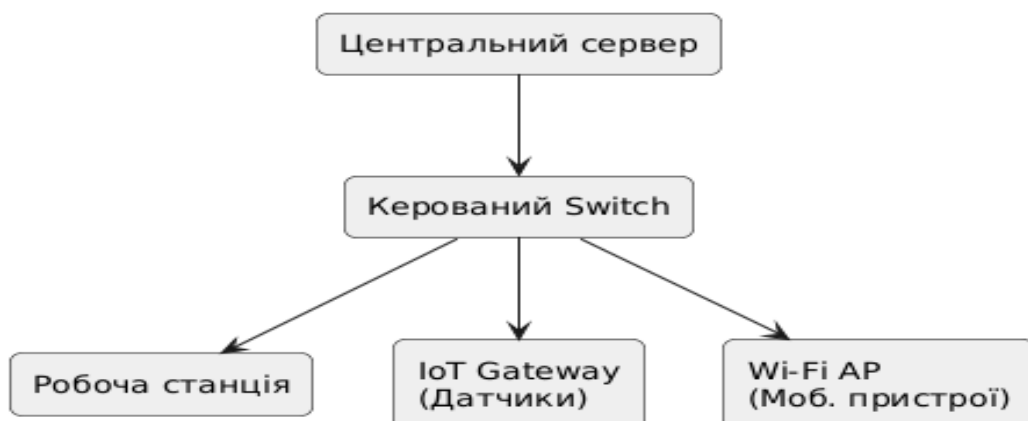


Рисунок 2.4 - Архітектура мережі

Обґрунтування вибору:

- Керовані комутатори Cisco забезпечують гнучкість у налаштуванні мережі, розділення трафіку і пріоритезацію критичних даних, що важливо для системи реального часу.
- Маршрутизатор MikroTik обраний через високі показники продуктивності та гнучкі налаштування для організації VPN-з'єднань і захисту мережі.
- Мережеві шлюзи Advantech забезпечують інтеграцію промислових сенсорів із серверною частиною, дозволяючи ефективно обробляти вхідні дані.
- Wi-Fi точки доступу Ubiquiti забезпечують стабільний бездротовий зв'язок, що важливо для мобільних станцій і резервного керування.
- Джерела безперебійного живлення (UPS) гарантують безперебійну роботу критичного мережевого обладнання.

Переваги запропонованої мережевої інфраструктури:

- Висока надійність: Завдяки резервуванню каналів зв'язку та UPS.
- Гнучкість і масштабованість: Просте підключення нових пристроїв і сенсорів.
- Інформаційна безпека: Захист від кібератак завдяки фаєрволам і VPN.
- Оптимізована передача даних: Завдяки QoS і VLAN.
- Безперервність роботи: Підтримка PoE зменшує залежність від зовнішніх джерел живлення.

Вибране мережеве обладнання забезпечує стабільну, безпечну та масштабовану інфраструктуру для надійної роботи системи управління мікрокліматом в операційній. Інтеграція всіх елементів у єдину мережу забезпечує безперебійну передачу даних, оперативне реагування на зміни та підтримку оптимальних умов для проведення хірургічних втручань[31].

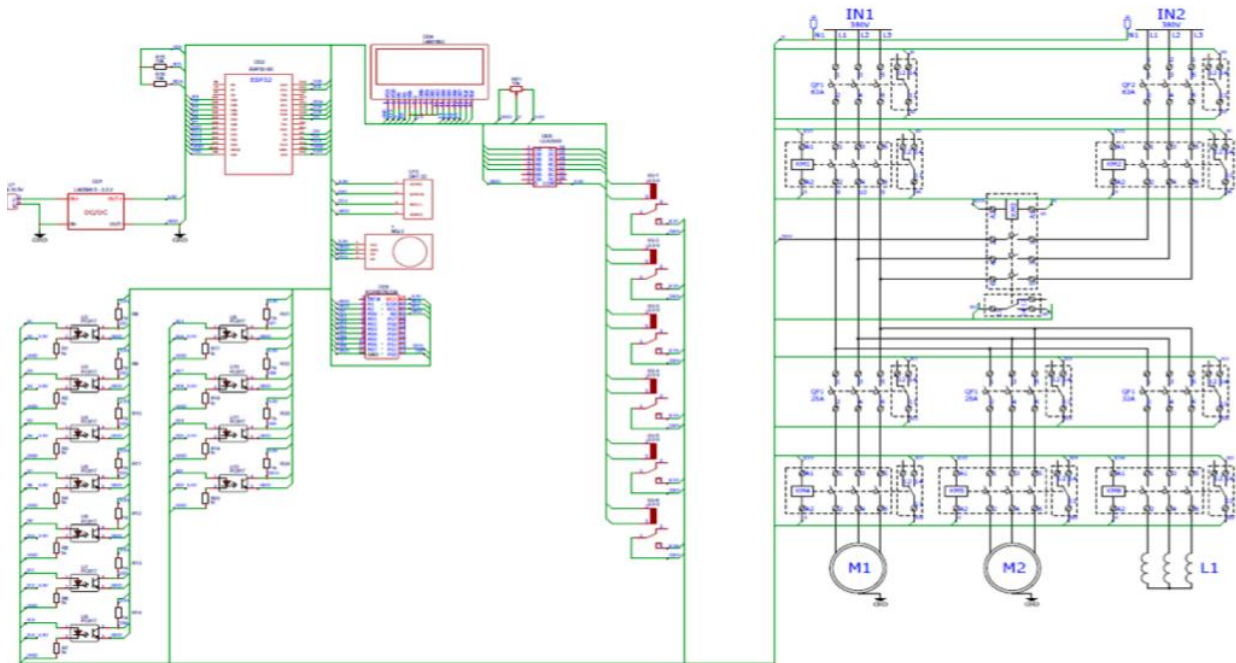


Рисунок 2.5 – Принципова електрична схема системи керування мікрокліматом

Опис: Рисунок демонструє детальну електричну схему підключення елементів системи: контролера, датчиків, дисплея та виконавчих механізмів. Ця схема відображає усі з'єднання та способи інтеграції апаратних компонентів.

2.3. Інтеграція сенсорів та периферійних пристроїв

Інтеграція сенсорів та периферійних пристроїв є ключовим елементом функціонування системи управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу. Від ефективної взаємодії цих компонентів залежить точність моніторингу, оперативність реагування та стабільність роботи всієї системи.

Основні завдання інтеграції:

1. Забезпечення безперервного збору даних з сенсорів у реальному часі.

2. Передача оброблених даних на центральний сервер для подальшого аналізу.
3. Керування виконавчими пристроями на основі результатів обробки даних.
4. Синхронізація роботи периферійних пристроїв для забезпечення оптимального мікроклімату.

Вибір сенсорів для моніторингу мікроклімату

Для забезпечення точного контролю параметрів мікроклімату в операційній було обрано такі сенсори:

- Датчики температури і вологості (DHT22, SHT31):
- Вимірюють температуру і вологість повітря.
- Інтерфейс підключення: I²C, 1-Wire.
- Датчики якості повітря (MQ-135, SGP30):
- Визначають рівень CO₂, аміаку, бензолу та інших шкідливих речовин.
- Інтерфейс підключення: аналоговий вихід.
- Датчики тиску (BMP280, BME680):
- Контролюють рівень атмосферного тиску для регулювання вентиляції.
- Інтерфейс підключення: I²C, SPI.
- Датчики концентрації кисню (KE-25, CJMCSU-811):
- Вимірюють рівень кисню в повітрі.
- Інтерфейс підключення: аналоговий вихід.
- Датчики освітленості (BH1750):
- Контролюють рівень освітленості в операційній.
- Інтерфейс підключення: I²C.
- Датчики руху (PIR, IR-сенсори):
- Визначають присутність персоналу для автоматичного налаштування мікроклімату.

Периферійні пристрої для керування мікрокліматом

Периферійні пристрої інтегруються із сенсорною системою для оперативного коригування параметрів середовища:

- Кліматичне обладнання (HVAC):
- Підтримує необхідну температуру та вологість.
- Інтеграція через IoT Gateway або безпосередньо через контролери.
- Системи вентиляції та фільтрації (HEPA/ULPA):
- Забезпечують очищення повітря і підтримку стерильності.
- Керування здійснюється за допомогою реле або PLC-контролерів.
- Освітлювальні системи:
- Регулюють яскравість освітлення залежно від умов.
- Інтегруються через DMX-контролери або інтелектуальні системи

освітлення.

- Аварійні системи:
- Датчики задимлення і витoku газу підключаються до систем

аварійного вимкнення.

Способи інтеграції сенсорів та периферійних пристроїв

Підключення через IoT Gateway

- Модель: Advantech ECU-1152.
- Протоколи: Modbus, OPC UA, MQTT.
- Функція: Збирання і передача даних від сенсорів на сервер.

Підключення через контролери (PLC)

- Модель: Siemens LOGO! 8.
- Функція: Керування виконавчими пристроями (HVAC, вентиляція).
- Інтерфейси: Ethernet, RS-485.

Підключення до мережі (Ethernet/Wi-Fi)

- Провідне підключення: Через комутатори Cisco Catalyst.
- Бездротове підключення: Через точки доступу Ubiquiti UniFi.

Протоколи передачі даних:

- I²C/SPI/1-Wire: Для з'єднання сенсорів із шлюзами.

- Modbus RTU/TCP: Для промислових датчиків.
- MQTT: Для передачі даних у хмарні сервіси.



Рисунок 2.6 – Схема інтеграції сенсорів і периферійних пристроїв

Обґрунтування вибору компонентів

- IoT Gateway Advantech забезпечує безперебійну передачу даних від сенсорів і гнучке налаштування.
- PLC Siemens LOGO! 8 обраний завдяки надійності і простоті інтеграції з промисловими пристроями.
- Сенсори DHT22, MQ-135, BMP280 мають високу точність і стабільність показників.
- HVAC-системи інтегровані для підтримки температури і вологості.
- Wi-Fi точки доступу Ubiquiti забезпечують гнучке підключення мобільних пристроїв.

Переваги інтеграції

- Точний і оперативний контроль усіх параметрів мікроклімату.
- Автоматичне керування на основі даних із сенсорів.
- Масштабованість системи з можливістю підключення додаткових пристроїв.
- Енергоефективність за рахунок оптимізації роботи обладнання.
- Надійність завдяки резервуванню і відмовостійким компонентам.

Інтеграція сенсорів і периферійних пристроїв забезпечує стабільну і ефективну роботу системи управління мікрокліматом. Використання сучасних технологій збору і обробки даних дозволяє підтримувати оптимальні умови для проведення хірургічних втручань, що підвищує рівень безпеки пацієнтів і комфорт медичного персоналу[33,с.98].



Рисунок 2.7 – Схема інтеграції сенсорів і виконавчих механізмів

Опис: На рисунку зображено структурну схему інтеграції контролера з датчиками температури, вологості, забрудненості повітря, а також

виконавчими пристроями: системами кондиціонування, вентиляції та опалення.

2.4. Забезпечення надійності та безпеки апаратної частини

Надійність і безпека апаратної частини системи управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу є критично важливими для забезпечення безперебійної роботи, захисту від збоїв та підтримки стабільних умов. Несправності або переривання роботи системи можуть призвести до негативних наслідків для здоров'я пацієнтів і роботи медичного персоналу[22]. Саме тому розробка системи має включати механізми резервування та захисту.

2.4.1. Резервування компонентів

Резервування компонентів — це важливий механізм забезпечення надійної роботи системи, який дозволяє уникнути простоїв у разі відмови окремих елементів. Система резервування гарантує безперервний моніторинг і управління мікрокліматом навіть у випадку відмови критичних вузлів.

Основні принципи резервування:

1. Подвійне резервування критичних компонентів (сервери, комутатори, джерела живлення).
2. Автоматичне перемикання на резервні вузли у разі відмови основного обладнання.
3. Розподілене зберігання даних для запобігання втраті важливої інформації.
4. Незалежні джерела електроживлення для всіх критичних компонентів.
5. Резервні канали передачі даних для безперебійної комунікації.

Резервовані компоненти системи:

Серверне обладнання:

- Основний сервер: виконує обробку даних і управління.
- Резервний сервер: ідентичний основному, автоматично підключається у разі збою.
- Механізм перемикання: використання технологій Failover Cluster для безперебійного переходу.

Система зберігання даних:

- Основне сховище: NAS-сервер із RAID 5/6 для забезпечення відмовостійкості.
- Резервне сховище: окремий NAS або хмарне сховище для регулярного бекапу.
- Бекап: Автоматизоване резервне копіювання за розкладом.

Мережеве обладнання:

- Комутатори: паралельно підключені два керовані комутатори з підтримкою протоколу Spanning Tree Protocol (STP) для уникнення петлі в мережі.
- Маршрутизатори: основний і резервний із підтримкою автоматичного перемикання.
- Резервні канали зв'язку: додаткові Ethernet-з'єднання та бездротові канали (Wi-Fi/4G).

Джерела безперебійного живлення (UPS):

- Основне джерело: APC Smart-UPS 3000VA для серверів і мережевого обладнання.
- Резервне джерело: додатковий UPS для критичних сенсорів і виконавчих пристроїв.
- Генератор: автономне джерело живлення на випадок тривалого відключення електроенергії.

Сенсорна система:

- Дублювання ключових датчиків: паралельне підключення двох або більше сенсорів для контролю температури, вологості, якості повітря.

- Резервний канал передачі даних: дублювання підключень через різні IoT шлюзи.

Виконавчі пристрої:

- Подвійна система HVAC: резервна вентиляційна система для підтримки мікроклімату.
- Резервне керування: дублювання контролерів (PLC) для управління виконавчими механізмами.

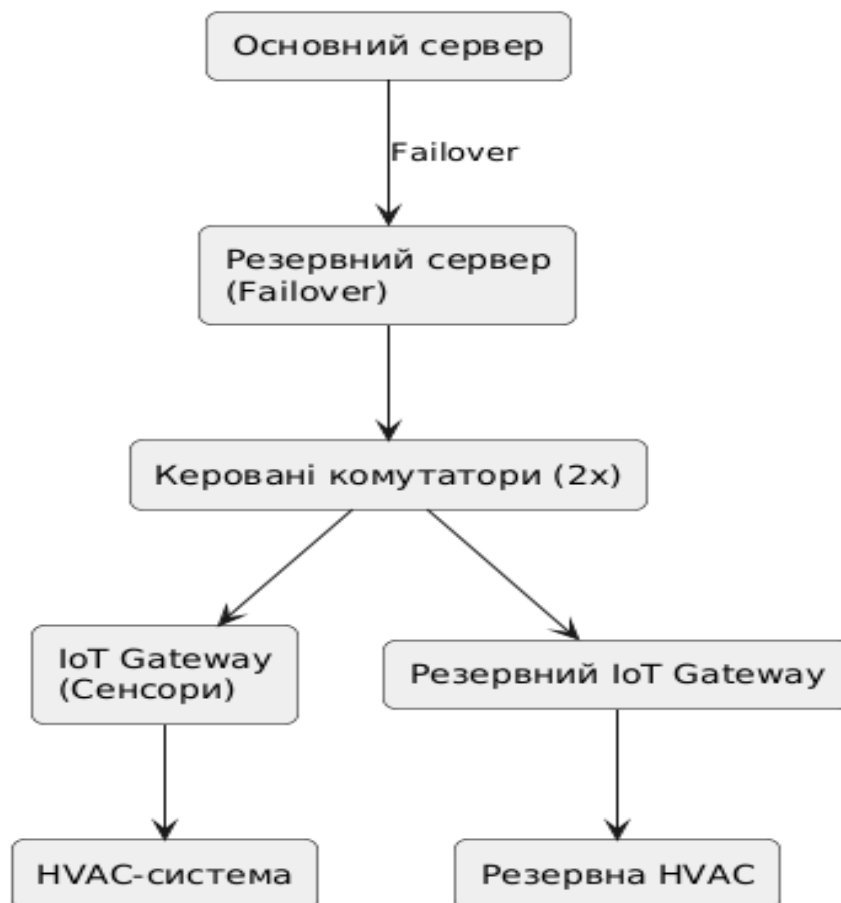


Рисунок 2.8 – Архітектура резервування системи

Механізми автоматичного перемикавання:

1. Failover Cluster: забезпечує автоматичне перемикавання між основним і резервним сервером без втрати даних і перерви в роботі.
2. RAID-масив: оберігає систему зберігання даних від втрати інформації у разі виходу з ладу одного або кількох дисків.

3. Dual Power Input: мережеве обладнання та сервери підключені до двох незалежних джерел живлення.

4. STP (Spanning Tree Protocol): запобігає утворенню петлі в мережі при резервуванні комутаторів.

5. Hot Standby Router Protocol (HSRP): забезпечує автоматичне перемикання між маршрутизаторами.

Обґрунтування вибору стратегії резервування:

- Підвищення надійності: резервування критичних компонентів гарантує безперебійну роботу системи.

- Мінімізація простоїв: автоматичне перемикання зменшує час простою до мінімуму.

- Захист даних: резервне копіювання і RAID забезпечують цілісність і збереження даних.

- Гнучкість і масштабованість: система легко адаптується до змін і розширення.

Реалізація комплексної системи резервування компонентів забезпечує високу надійність і безперервність функціонування системи управління мікрокліматом в операційній[25]. Завдяки інтеграції резервних серверів, мережевого обладнання, джерел живлення та сенсорів система здатна функціонувати навіть у разі часткових відмов або аварійних ситуацій, що гарантує безпеку пацієнтів і комфорт роботи медичного персоналу.

2.4.2. Системи захисту даних

Забезпечення безпеки даних є критично важливим аспектом функціонування системи управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу. Неправомірний доступ, втрати або пошкодження даних можуть призвести до збоїв у роботі системи, що безпосередньо впливає на безпеку пацієнтів і ефективність роботи медичного персоналу. Тому система повинна включати надійні засоби захисту даних на всіх рівнях.

Основні цілі захисту даних:

1. Конфіденційність — запобігання несанкціонованому доступу до даних.
2. Цілісність — забезпечення достовірності та захисту даних від спотворення або втрати.
3. Доступність — забезпечення безперервного доступу до даних для авторизованих користувачів.
4. Аудит і контроль — відстеження змін і доступу до даних для виявлення потенційних загроз.

Фізичний захист апаратного забезпечення

- Обмежений фізичний доступ:
- Серверне обладнання, мережеві пристрої та сховища даних розміщуються в закритих серверних кімнатах із доступом лише для авторизованого персоналу.
 - Використання систем контролю доступу (RFID-картки, біометричні сканери).
 - Відеоспостереження:
 - Камери відеоспостереження для контролю доступу до серверних приміщень.
 - Захист від пожежі та перевантажень:
 - Системи пожежогасіння, димові датчики.
 - Джерела безперебійного живлення (UPS) і захист від перенапруг.

Захист даних на програмному рівні

- Аутентифікація та авторизація:
- Двофакторна аутентифікація (2FA): для всіх критичних облікових записів.
- Розподіл прав доступу: користувачі мають доступ лише до інформації, необхідної для виконання їхніх обов'язків (рольова модель доступу - RBAC).

- LDAP/Active Directory: централізоване управління обліковими записами.
 - Шифрування даних:
 - SSL/TLS: захищене з'єднання для передавання даних між компонентами системи.
 - AES-256: шифрування даних на накопичувачах для запобігання несанкціонованому доступу.
 - BitLocker: для шифрування локальних дисків.
 - Фаєрвол і антивірусний захист:
 - Використання мережевих і програмних фаєрволів для фільтрації трафіку та блокування несанкціонованого доступу.
 - Антивірусні рішення (наприклад, Kaspersky, ESET): для запобігання зараженню шкідливим ПЗ.
 - Системи виявлення і запобігання вторгненням (IDS/IPS):
 - Snort, Suricata: для моніторингу мережевого трафіку і виявлення підозрілих активностей.
 - Fail2Ban: блокування IP-адрес після кількох невдалих спроб входу.
- Захист мережевої інфраструктури
- Сегментація мережі (VLAN):
 - Розподіл мережі на ізольовані сегменти для різних пристроїв і сервісів (окремі VLAN для сенсорів, серверів і робочих станцій).
 - Протокол 802.1X для контролю доступу до мережі.
 - VPN (Virtual Private Network):
 - Захищене з'єднання для віддаленого доступу до системи.
 - Використання протоколів IPsec або OpenVPN.
 - Захист від DDoS-атак:
 - Налаштування фаєрвола для фільтрації підозрілого трафіку.
 - Використання хмарних сервісів для захисту від масових атак.
- Захист даних на рівні зберігання
- Резервне копіювання (Backup):

- Щоденне інкрементне копіювання і щотижневе повне копіювання критичних даних.
- Зберігання бекапів на окремому NAS-сервері та в хмарних сервісах.
- Використання програмних рішень для резервного копіювання (Acronis, Veeam).
- RAID-масиви:
- Використання RAID 5/6 для забезпечення відмовостійкості системи зберігання даних.
- Контроль цілісності даних:
- Регулярна перевірка контрольних сум (hash-сум) для виявлення змін у файлах.
- Використання File Integrity Monitoring (FIM).

Моніторинг і аудит

- Логи активності:
- Ведення журналів входів, змін конфігурації, підозрілих дій.
- Аналіз логів за допомогою SIEM-систем (наприклад, Splunk, ELK Stack).
- Аудит безпеки:
- Проведення регулярних перевірок безпеки, тестів на проникнення (Penetration Testing).
- Впровадження політик безпеки відповідно до міжнародних стандартів (ISO/IEC 27001).

Обґрунтування вибору систем захисту даних

- Комплексний підхід: багаторівнева система захисту гарантує високу стійкість до зовнішніх і внутрішніх загроз.
- Використання перевірених технологій: шифрування AES-256, VPN, RAID, IDS/IPS.
- Гнучкість і масштабованість: можливість адаптації до нових загроз і розширення системи.

- Відповідність стандартам: дотримання вимог міжнародних стандартів інформаційної безпеки.

Реалізація комплексної системи захисту даних забезпечує конфіденційність, цілісність і доступність інформації в системі управління мікрокліматом[33]. Завдяки використанню сучасних технологій шифрування, резервного копіювання, захищеної передачі даних та багаторівневого контролю доступу система залишається стійкою до зовнішніх і внутрішніх загроз, що гарантує безпеку пацієнтів і безперервну роботу медичного закладу.

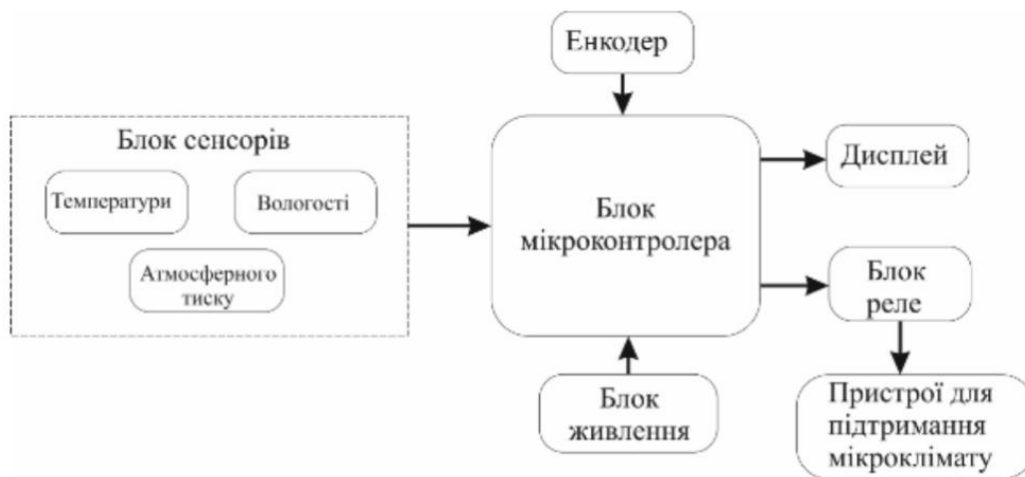


Рисунок 2.9 – Архітектурна схема апаратного забезпечення системи

Опис: На рисунку зображено загальну структурну схему апаратної частини системи управління мікрокліматом в операційній, що включає блок сенсорів, блок мікроконтролера, блок живлення, дисплей, блок реле та пристрій для підтримання мікроклімату.

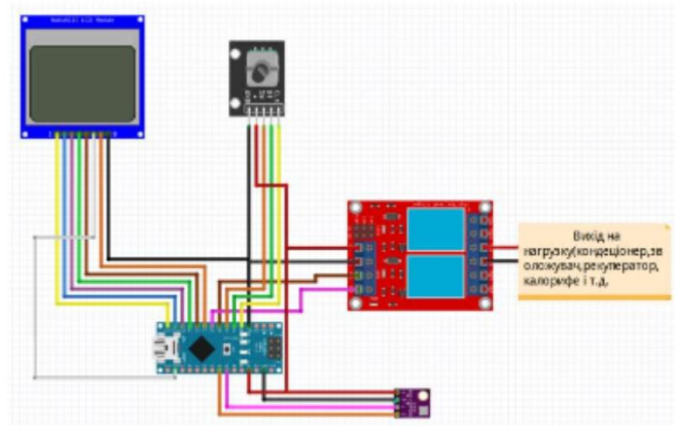


Рисунок 2.10 – Схема підключення компонентів апаратної частини

Опис: На рисунку показано схему підключення основних апаратних компонентів системи: мікроконтролера, дисплея, реле та сенсорів для моніторингу і керування параметрами мікроклімату.

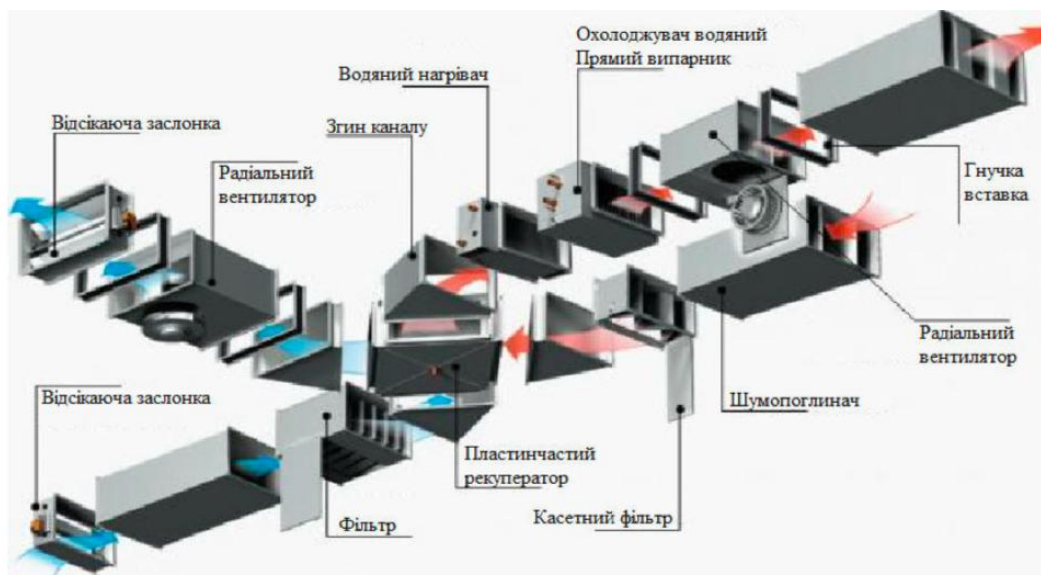


Рисунок 2.11 – Конструктивна схема вентиляційної системи з рекуперацією тепла

Опис: На рисунку показано складові елементи вентиляційної системи з рекуперацією тепла, включаючи фільтри, вентилятори, нагрівачі, шумопоглиначі та регулюючі заслінки. Ця система забезпечує ефективний повітрообмін і оптимальні умови в операційній.

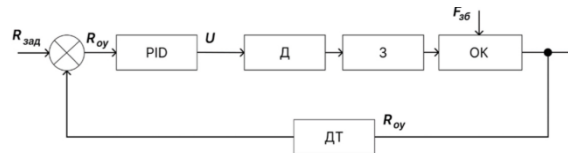


Рисунок 2.12 – Структурна схема автоматизованої системи керування мікрокліматом

Опис: Схема ілюструє загальний принцип роботи автоматизованої системи управління мікрокліматом із використанням PID-регулятора. У ній відображено взаємодію між датчиками, виконавчими механізмами та контролерами для підтримання заданих параметрів.

3. Алгоритмічне та програмне забезпечення системи

3.1. Розробка алгоритмів управління умовами в операційній

Управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу є складною задачею, що вимагає оперативної обробки даних, отриманих із численних сенсорів, і прийняття ефективних рішень щодо регулювання параметрів навколишнього середовища. Надійність і ефективність функціонування системи забезпечується впровадженням адаптивних алгоритмів управління на основі нечіткої логіки (Fuzzy Logic), що дозволяє оперативно реагувати на зміну параметрів мікроклімату і забезпечувати оптимальні умови для проведення хірургічних втручань[34,с.76].

Основні вимоги до алгоритмів управління

Алгоритми управління мікрокліматом в операційній повинні відповідати таким вимогам:

- Адаптивність: здатність автоматично підлаштовувати параметри управління відповідно до зміни умов середовища.
- Висока точність і чутливість: забезпечення мінімальних відхилень від встановлених нормативних показників.
- Надійність і безперебійність: стабільна робота системи навіть при непередбачуваних ситуаціях або збоях окремих компонентів.
- Гнучкість і масштабованість: можливість інтеграції нових датчиків і виконавчих пристроїв без необхідності повної модернізації системи.
- Оптимізація енергоспоживання: економне використання енергетичних ресурсів без шкоди для якості підтримки параметрів мікроклімату.

Структура алгоритмів управління

Алгоритми управління складаються з кількох взаємопов'язаних модулів, що забезпечують повний цикл обробки даних і прийняття рішень:

1. Збір і попередня обробка даних: отримання інформації з сенсорів температури, вологості, тиску, якості повітря і рівня освітленості.
2. Аналіз поточних умов: порівняння фактичних показників із встановленими нормативами і виявлення відхилень.
3. Прийняття рішення на основі нечіткої логіки: генерування керуючих впливів на виконавчі пристрої.
4. Виконання регулюючих дій: передача команд до систем HVAC, вентиляції, фільтрації, освітлення.
5. Моніторинг результатів: зворотний зв'язок із сенсорів для коригування управлінських рішень.

Алгоритм управління на основі нечіткої логіки

Алгоритм нечіткого управління реалізовано у вигляді системи правил, що враховують багатофакторний вплив параметрів мікроклімату. Нечітка логіка дозволяє приймати рішення на основі неповної або нечіткої інформації, що є особливо важливим у складних умовах експлуатації.

Основні етапи реалізації алгоритму:

1. Фазифікація вхідних даних: перетворення чітких значень сенсорних даних у нечіткі множини (наприклад, «низька температура», «висока вологість»).
2. Формування бази правил: встановлення взаємозв'язків між вхідними параметрами і необхідними діями (наприклад, «якщо температура низька і вологість висока, то зменшити вологість і підвищити температуру»).
3. Агрегація правил: об'єднання результатів усіх правил для визначення загального рішення.
4. Дефазифікація: перетворення нечіткого результату у чітку дію (наприклад, встановити температуру на 22 °C).

5. Передача команд виконавчим пристроям: активація або деактивація відповідного обладнання.

База правил нечіткого управління

Таблиця 3.1 - Приклад фрагмента бази правил для керування мікрокліматом

Температура	Вологість	Якість повітря	Дія
Низька	Висока	В нормі	Увімкнути обігрів, зменшити вологість
Висока	Низька	Погана	Увімкнути вентиляцію, підвищити вологість
Оптимальна	Оптимальна	В нормі	Підтримувати поточний режим
Висока	Висока	Погана	Увімкнути вентиляцію, зменшити вологість

Алгоритм адаптивного керування

Для забезпечення стабільності роботи системи використовується адаптивний підхід, який враховує динамічні зміни умов у приміщенні. Адаптивний алгоритм аналізує тенденції змін параметрів і автоматично коригує налаштування системи для запобігання критичним відхиленням.

Етапи роботи адаптивного алгоритму:

1. Аналіз трендів зміни параметрів: виявлення тенденцій змін температури, вологості, якості повітря.
2. Прогнозування відхилень: розрахунок можливих змін параметрів і підготовка до коригування.
3. Динамічне налаштування: автоматичне коригування роботи обладнання на основі прогнозних даних.
4. Корекція бази правил: оновлення або доповнення правил у випадку нових сценаріїв.

Обґрунтування вибору нечіткої логіки

- Гнучкість і адаптивність: нечітка логіка дозволяє працювати з неточними даними, що часто виникає під час вимірювань у реальному середовищі.
- Швидкість прийняття рішень: система здатна оперативно реагувати на відхилення без складних обчислень.
- Стабільність і надійність: нечіткі алгоритми менш чутливі до випадкових коливань даних і забезпечують стабільну роботу системи.
- Можливість модернізації: база правил легко адаптується до нових вимог і змін в обладнанні.

Розроблені алгоритми управління умовами в операційній на основі нечіткої логіки забезпечують ефективне і надійне підтримання оптимальних параметрів мікроклімату. Впровадження адаптивних методів аналізу і керування дозволяє мінімізувати втручання персоналу в процес регулювання та забезпечити стабільні умови для проведення хірургічних втручань.

3.2. Архітектура програмного забезпечення

3.2.1. Модульність системи

Архітектура програмного забезпечення системи управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу розроблена з урахуванням принципів модульності, що забезпечує гнучкість, масштабованість і надійність функціонування[31]. Модульний підхід дозволяє розділити програмну систему на окремі функціональні блоки, які взаємодіють між собою, виконуючи конкретні завдання.

Основні принципи модульної архітектури:

1. Логічна ізольованість: кожен модуль відповідає за окремий функціональний процес і не залежить від реалізації інших модулів.
2. Гнучкість і масштабованість: можливість додавання або оновлення окремих модулів без впливу на всю систему.
3. Уніфікація інтерфейсів: стандартизовані інтерфейси взаємодії між модулями для спрощення інтеграції та оновлення.
4. Повторне використання: можливість використання модулів у різних компонентах системи або для створення нових рішень.
5. Відмовостійкість: незалежна робота модулів дозволяє зберігати функціональність системи навіть при відмові окремих компонентів.

Структура модульної системи

Архітектура програмного забезпечення складається з таких основних модулів:

Модуль збору даних (Data Acquisition Module):

- Відповідає за збір і первинну обробку даних із сенсорів.
- Забезпечує фільтрацію та валідацію отриманих даних.
- Підтримує роботу з різними типами сенсорів (температури, вологості, тиску, якості повітря).

Аналітичний модуль (Data Analysis Module):

- Аналізує отримані дані для виявлення відхилень від заданих норм.
- Використовує алгоритми нечіткої логіки для прийняття рішень.
- Генерує керуючі команди на основі аналізу.

Модуль управління (Control Module):

- Забезпечує передачу команд до виконавчих пристроїв (HVAC, освітлення, вентиляція).
- Контролює виконання керуючих дій і коригує роботу системи в реальному часі.
- Підтримує аварійне перемикання на резервні пристрої.

Модуль візуалізації та моніторингу (User Interface Module):

- Забезпечує взаємодію користувача із системою через графічний інтерфейс.
- Відображає поточні параметри мікроклімату та статус роботи обладнання.
- Надає можливість ручного керування і налаштування параметрів.

Модуль безпеки (Security Module):

- Відповідає за аутентифікацію і авторизацію користувачів.
- Захищає дані за допомогою шифрування та контролює доступ до системи.
- Інтегрований із фаєрволами та системами захисту від кібератак.

Модуль резервного копіювання та відновлення (Backup and Recovery Module):

- Автоматично створює резервні копії даних.
- Відновлює роботу системи у разі збоїв або втрати даних.
- Підтримує інтеграцію з хмарними сервісами для зберігання бекапів.

Модуль інтеграції (Integration Module):

- Забезпечує взаємодію з іншими медичними інформаційними системами.

- Підтримує стандартні протоколи обміну даними (HL7, MQTT, OPC UA).
- Реалізує API для підключення додаткових сенсорів і пристроїв.

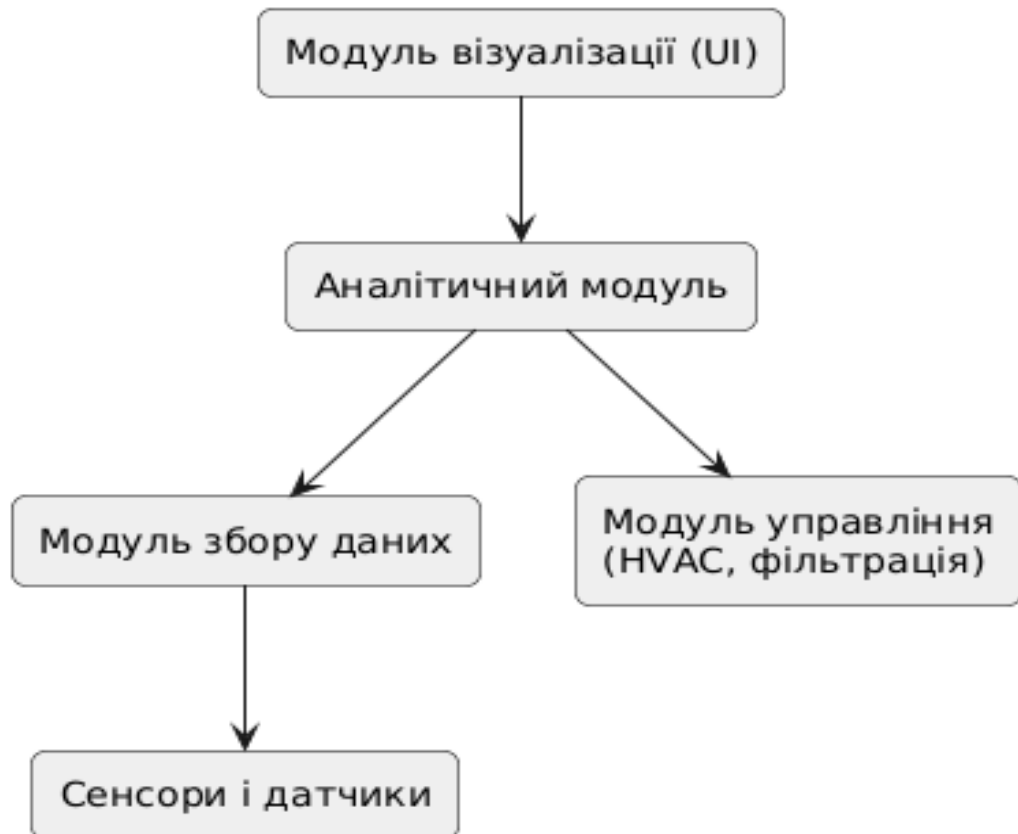


Рисунок 3.1 - Схема модульної архітектури

Взаємодія модулів

1. Модуль збору даних отримує інформацію із сенсорів і передає її до аналітичного модуля.
2. Аналітичний модуль аналізує дані та генерує керуючі сигнали.
3. Модуль управління передає команди виконавчим пристроям.
4. Модуль візуалізації інформує оператора про стан системи та дозволяє налаштування.
5. Модуль безпеки контролює доступ до системи й захищає інформацію.

6. Модуль резервного копіювання зберігає дані й відновлює систему при збогах.

7. Модуль інтеграції забезпечує взаємодію з іншими системами лікарні.

Обґрунтування модульної архітектури

- Гнучкість і масштабованість: окремі модулі легко замінити або вдосконалити без зміни всієї системи.
- Висока надійність: збій одного модуля не призводить до відмови всієї системи.
- Простота обслуговування: легше діагностувати і виправляти помилки в окремих модулях.
- Можливість інтеграції: стандартизовані інтерфейси спрощують підключення нових пристроїв і сервісів.
- Ефективний розподіл навантаження: розділення задач між модулями оптимізує використання ресурсів.

Модульна архітектура програмного забезпечення забезпечує ефективне управління мікрокліматом в операційній, гнучкість у масштабуванні системи та високу надійність її роботи. Такий підхід дозволяє легко оновлювати або доповнювати функціонал системи, забезпечуючи безпеку, стабільність і зручність у користуванні.

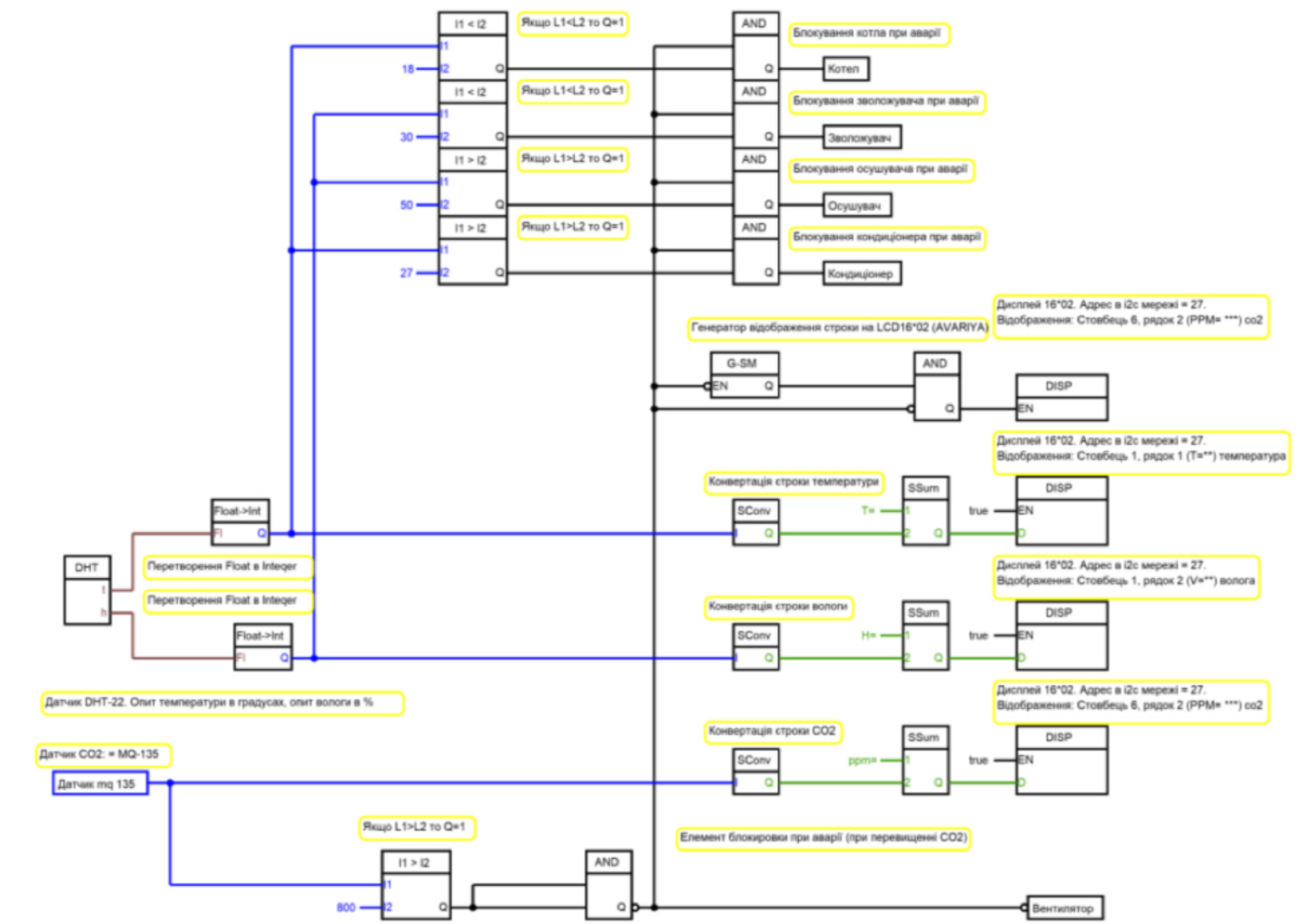


Рисунок 3.2 – Логічна схема алгоритму керування мікрокліматом

Опис: На рисунку зображено логічну схему керування, що включає обробку даних із датчиків температури, вологості та CO₂ із подальшою передачею сигналів до виконавчих пристроїв.

3.2.2. Взаємодія компонентів програмного забезпечення

Ефективне функціонування системи управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу забезпечується тісною взаємодією всіх компонентів програмного забезпечення. Кожен модуль виконує конкретні

функції і взаємодіє з іншими модулями через стандартизовані інтерфейси, що забезпечує гнучкість, масштабованість і надійність роботи системи.

Основні принципи взаємодії компонентів:

1. Інтєроперабельність: уніфіковані протоколи обміну даними (HTTP/HTTPS, MQTT, Modbus, OPC UA) забезпечують узгоджену взаємодію між модулями.

2. Модульна ізоляція: кожен модуль функціонує автономно, що знижує ризик повного відмови системи в разі збою окремого елемента.

3. Асинхронна обробка даних: обробка запитів і передача даних здійснюються без блокування інших процесів.

4. Зворотний зв'язок: система забезпечує постійний моніторинг і корекцію параметрів мікроклімату на основі отриманих даних.

5. Масштабованість: система легко інтегрується з новими пристроями або модулями без суттєвих змін архітектури.

Складові компоненти та їх взаємодія

Модуль збору даних (Data Acquisition Module):

- Отримує дані із сенсорів температури, вологості, тиску, якості повітря.
- Передає оброблені дані в аналітичний модуль.
- Взаємодіє з периферійними пристроями через IoT Gateway.

Аналітичний модуль (Data Analysis Module):

- Аналізує отримані дані за допомогою алгоритмів нечіткої логіки.
- Приймає рішення про необхідні дії і передає їх у модуль управління.
- Передає зведену інформацію у модуль візуалізації для відображення.

Модуль управління (Control Module):

- Перетворює рішення аналітичного модуля у конкретні керуючі команди.

- Керує роботою виконавчих пристроїв: HVAC, освітленням, вентиляцією.
- Взаємодіє із системами резервування для забезпечення безперебійної роботи.

Модуль візуалізації та моніторингу (User Interface Module):

- Надає оператору інформацію про поточний стан системи.
- Дозволяє налаштовувати параметри системи в ручному режимі.
- Отримує дані від аналітичного модуля і модуля управління.

Модуль безпеки (Security Module):

- Захищає канали зв'язку між модулями за допомогою шифрування.
- Контролює доступ до системи через аутентифікацію користувачів.
- Працює із модулем візуалізації для контролю прав доступу.

Модуль резервного копіювання (Backup and Recovery Module):

- Регулярно отримує дані від аналітичного модуля і модуля управління для створення резервних копій.
- Відновлює систему у разі збоїв або втрати даних.

Модуль інтеграції (Integration Module):

- Забезпечує обмін даними з іншими медичними інформаційними системами.
- Взаємодіє із модулем збору даних і аналітичним модулем для підключення нових сенсорів.

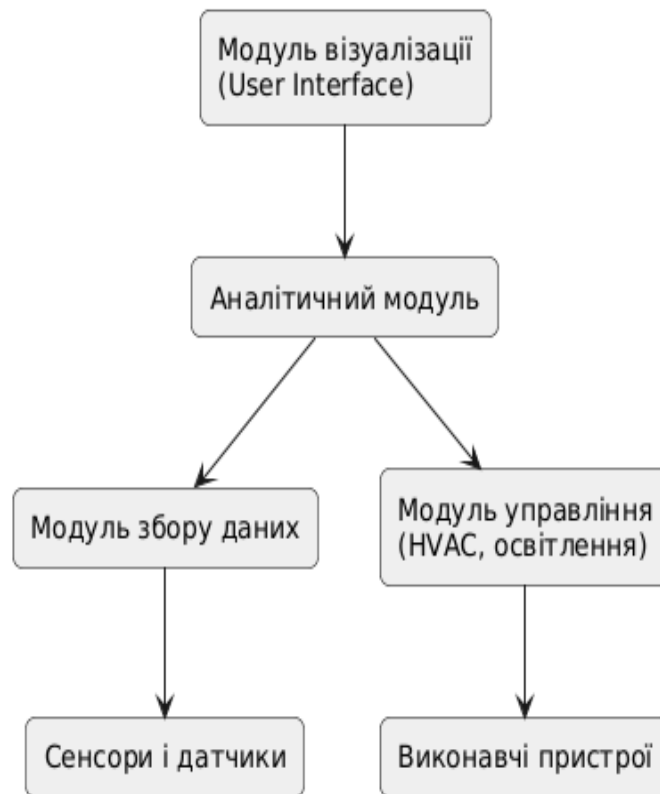


Рисунок 3.3 – Схема взаємодії програмних компонентів

Механізм взаємодії компонентів

1. Отримання даних:
 - Сенсори передають дані в модуль збору даних через IoT шлюзи.
 - Дані обробляються і передаються в аналітичний модуль.
2. Аналіз і прийняття рішень:
 - Аналітичний модуль використовує алгоритми нечіткої логіки для аналізу даних.
 - Генерує керуючі команди, які передаються в модуль управління.
3. Виконання команд:
 - Модуль управління передає сигнали до виконавчих пристроїв (HVAC, освітлення, вентиляція).
 - Перевіряє виконання команд і надсилає зворотний зв'язок в аналітичний модуль.
4. Візуалізація і контроль:

- Оператор отримує інформацію через модуль візуалізації.
 - За необхідності здійснює ручне керування або корекцію параметрів.
5. Захист і безпека:
- Модуль безпеки забезпечує шифрування даних і контроль доступу.
 - Проводить перевірку автентичності користувачів.
6. Резервне копіювання:

- Модуль резервного копіювання регулярно створює бекапи критичних даних.

- Забезпечує відновлення інформації у разі збою.

Обґрунтування вибору архітектури взаємодії

- Висока продуктивність: розподіл навантаження між модулями забезпечує оперативну обробку даних.

- Гнучкість і масштабованість: можливість підключення нових пристроїв і модулів.

- Надійність: взаємодія модулів через стандартизовані протоколи знижує ризик збоїв.

- Безпека: багаторівневий захист даних і доступу.

- Масштабована структура: можливість модернізації без порушення цілісності системи.

Взаємодія компонентів програмного забезпечення реалізована на основі модульного підходу, що забезпечує ефективний обмін даними, гнучкість управління і високу надійність системи. Така архітектура дозволяє оперативно реагувати на зміни умов мікроклімату, підтримувати безпеку даних і забезпечувати стабільне функціонування всієї системи[35,с.56].

3.3. Вибір мов програмування та середовищ розробки

Розробка програмного забезпечення для системи управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу вимагає використання

сучасних мов програмування та інтегрованих середовищ розробки (IDE), які забезпечують надійність, масштабованість, продуктивність і безпеку. Вибір технологічного стека обґрунтований специфікою завдань, які виконує система, а також необхідністю інтеграції з апаратною частиною.

Вимоги до вибору мов програмування та середовищ розробки

1. Висока продуктивність і швидкодія: оперативна обробка великих обсягів даних від сенсорів у реальному часі.
2. Надійність і відмовостійкість: стабільна робота в умовах безперервної експлуатації.
3. Гнучкість і масштабованість: можливість розширення функціоналу та інтеграції нових компонентів.
4. Безпека: захист даних від несанкціонованого доступу і кібератак.
5. Зручність розробки і супроводу: легкість у розробці, тестуванні та підтримці програмного забезпечення.

Вибір мов програмування

1. Python
 - Призначення: розробка аналітичного модуля та обробка даних із сенсорів.
 - Переваги:
 - Велика кількість бібліотек для роботи з даними та сенсорами (NumPy, Pandas, SciPy).
 - Підтримка бібліотек для нечіткої логіки (scikit-fuzzy) і машинного навчання.
 - Простота інтеграції з іншими системами через API.
 - Застосування: реалізація алгоритмів нечіткого управління, обробка та аналіз даних.
2. C/C++
 - Призначення: розробка драйверів для сенсорів і взаємодія з низькорівневим апаратним забезпеченням.
 - Переваги:

- Висока швидкодія і низький рівень споживання ресурсів.
- Підтримка реального часу і роботи із вбудованими системами.
- Застосування: розробка прошивки для IoT шлюзів, драйверів датчиків.

3. JavaScript (Node.js)

- Призначення: серверна логіка і веб-інтерфейс користувача.
- Переваги:
- Асинхронна обробка запитів і висока продуктивність.
- Легка інтеграція із фронтендом.
- Застосування: реалізація API для взаємодії між модулями, веб-інтерфейс для моніторингу.

4. HTML/CSS + React.js

- Призначення: створення інтерактивного користувацького інтерфейсу.

- Переваги:

- Швидка розробка інтерфейсу.
- Зручна інтеграція з серверною частиною.
- Застосування: розробка панелі моніторингу і керування системою.

5. SQL (PostgreSQL/MySQL)

- Призначення: зберігання та обробка даних.
- Переваги:
- Висока швидкодія і надійність.
- Гнучкість у роботі з великими обсягами даних.
- Застосування: збереження історичних даних із сенсорів, логів системи.

Вибір середовищ розробки (IDE) та інструментів

1. PyCharm (для Python)

- Повноцінне IDE для розробки аналітичних модулів.
- Підтримка віртуальних середовищ і інтеграція з бібліотеками.

2. Visual Studio Code (для JavaScript, Node.js, C/C++)

- Легка і гнучка платформа для написання серверного коду і роботи з API.
 - Велика кількість розширень для інтеграції з різними мовами.
3. Arduino IDE / PlatformIO (для C/C++)
- Розробка програмного забезпечення для мікроконтролерів і сенсорів.
 - Просте завантаження прошивок на пристрої.
4. pgAdmin (для PostgreSQL)
- Інструмент адміністрування бази даних PostgreSQL.
 - Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для керування таблицями і запитами.
5. Docker
- Використовується для контейнеризації компонентів системи.
 - Забезпечує простоту розгортання і масштабованість.
6. Git/GitHub/GitLab
- Система контролю версій для керування розробкою.
 - Підтримка командної роботи і відстеження змін у коді.

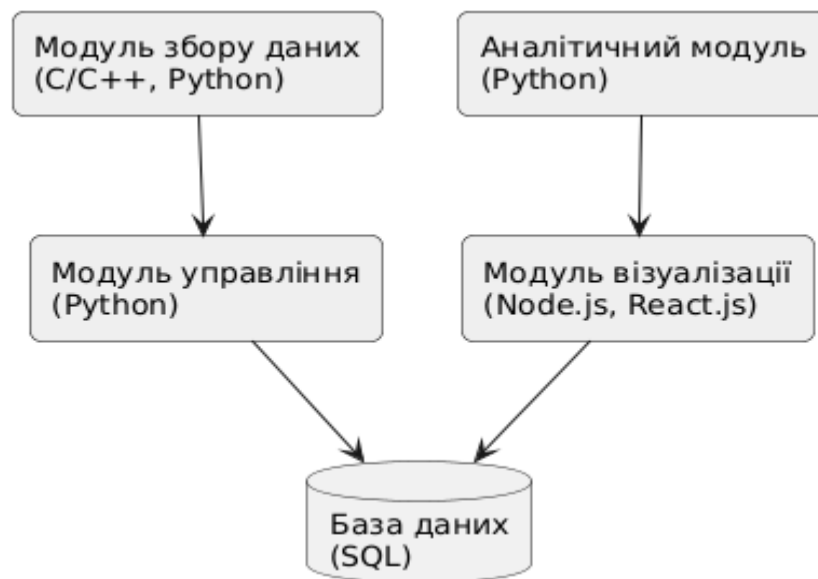


Рисунок 3.4 – Архітектура взаємодії мов програмування

Обґрунтування вибору

- Python використовується для реалізації складних алгоритмів обробки даних і нечіткої логіки, завдяки потужним аналітичним бібліотекам.
- C/C++ обрано для взаємодії з апаратною частиною, де критична швидкодія.
- Node.js забезпечує високу продуктивність серверної частини за рахунок асинхронної обробки.
- React.js дозволяє створити зручний і швидкий інтерфейс користувача.
- SQL гарантує надійне зберігання і швидкий доступ до великих обсягів даних.
- Docker і Git спрощують розгортання і підтримку системи.

Оптимальний вибір мов програмування та середовищ розробки забезпечує ефективну реалізацію всіх компонентів системи управління мікрокліматом[38]. Використання Python, C/C++, Node.js і React.js дозволяє досягти високої продуктивності, надійності та масштабованості, що є критично важливим для підтримки стабільних умов в операційних приміщеннях лікувального закладу.

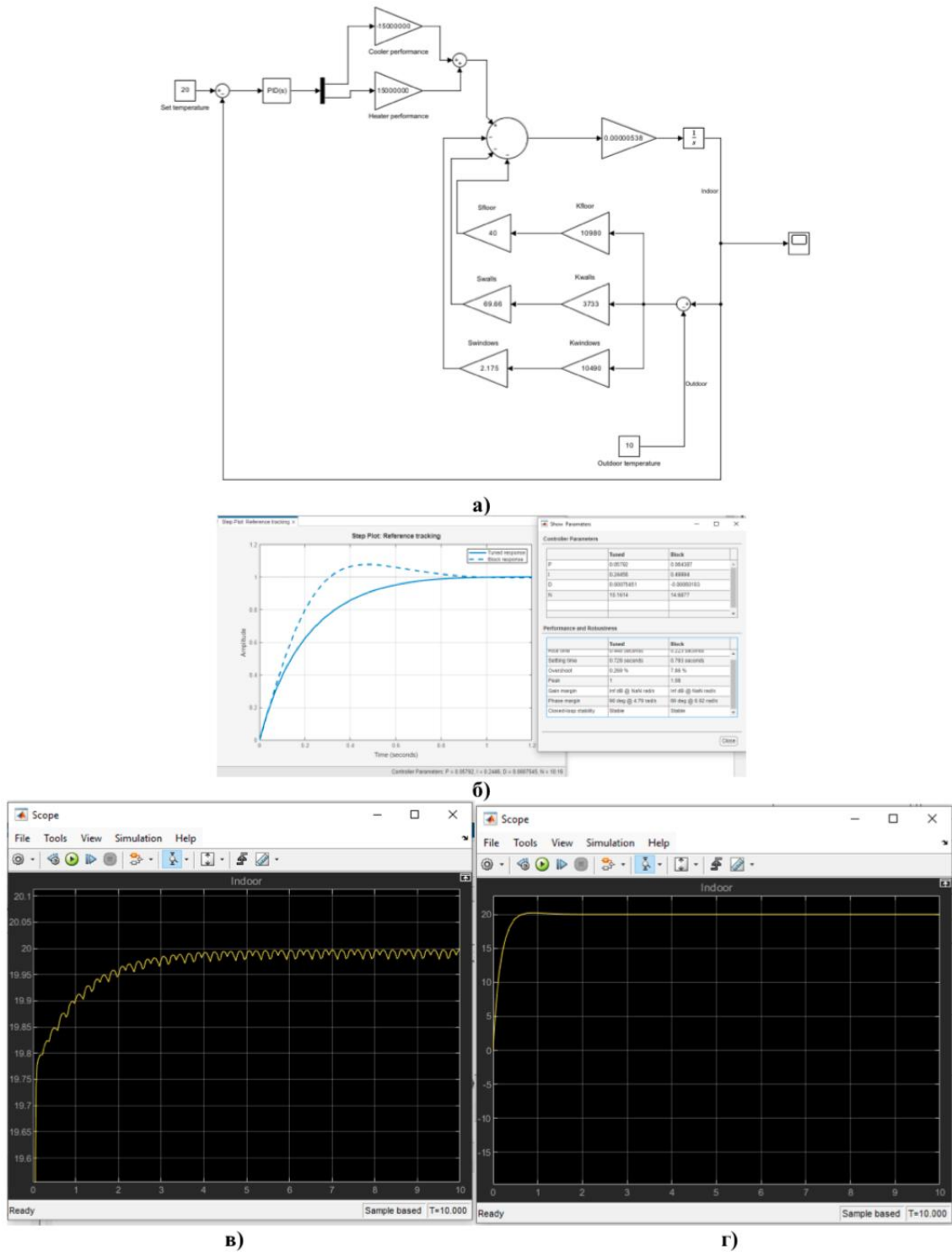
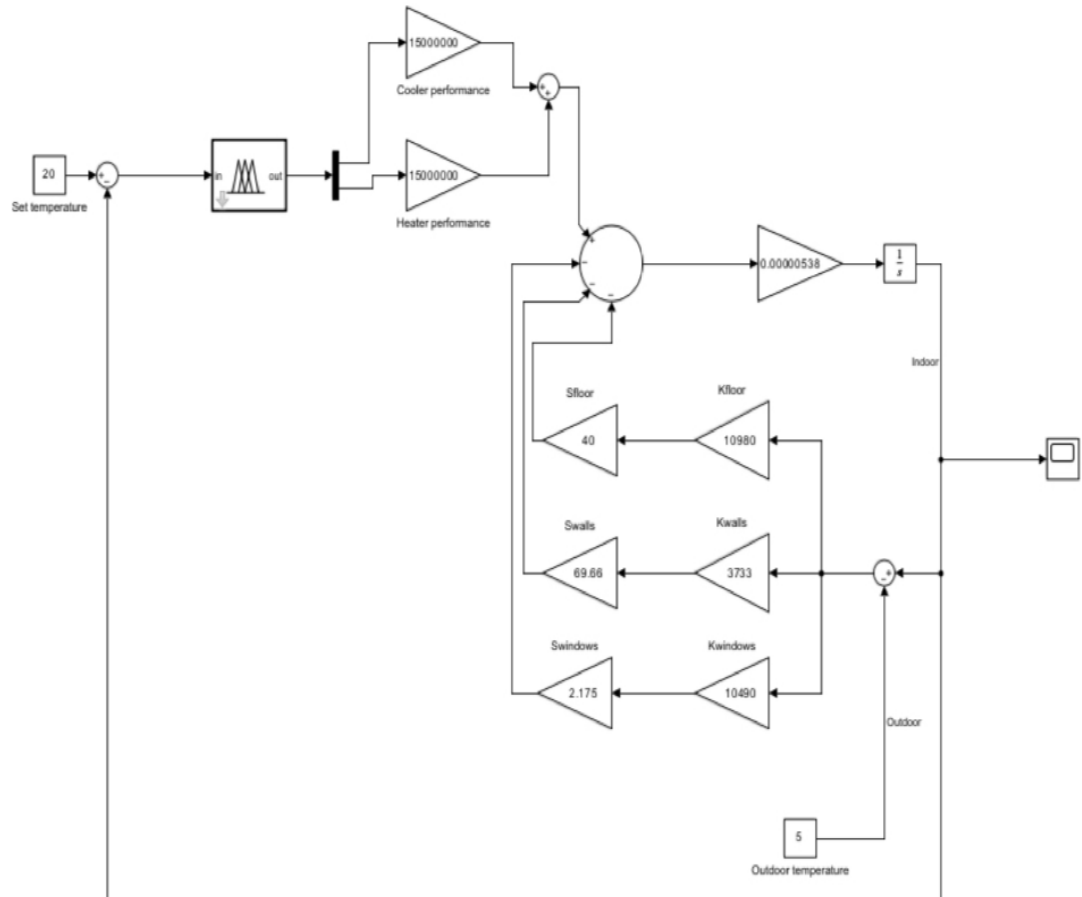


Рисунок 3.5 – Блок-схема управління температурою за допомогою PID-регулятора

Опис: На рисунку представлена блок-схема моделі управління температурою в приміщенні із використанням PID-регулятора. Система

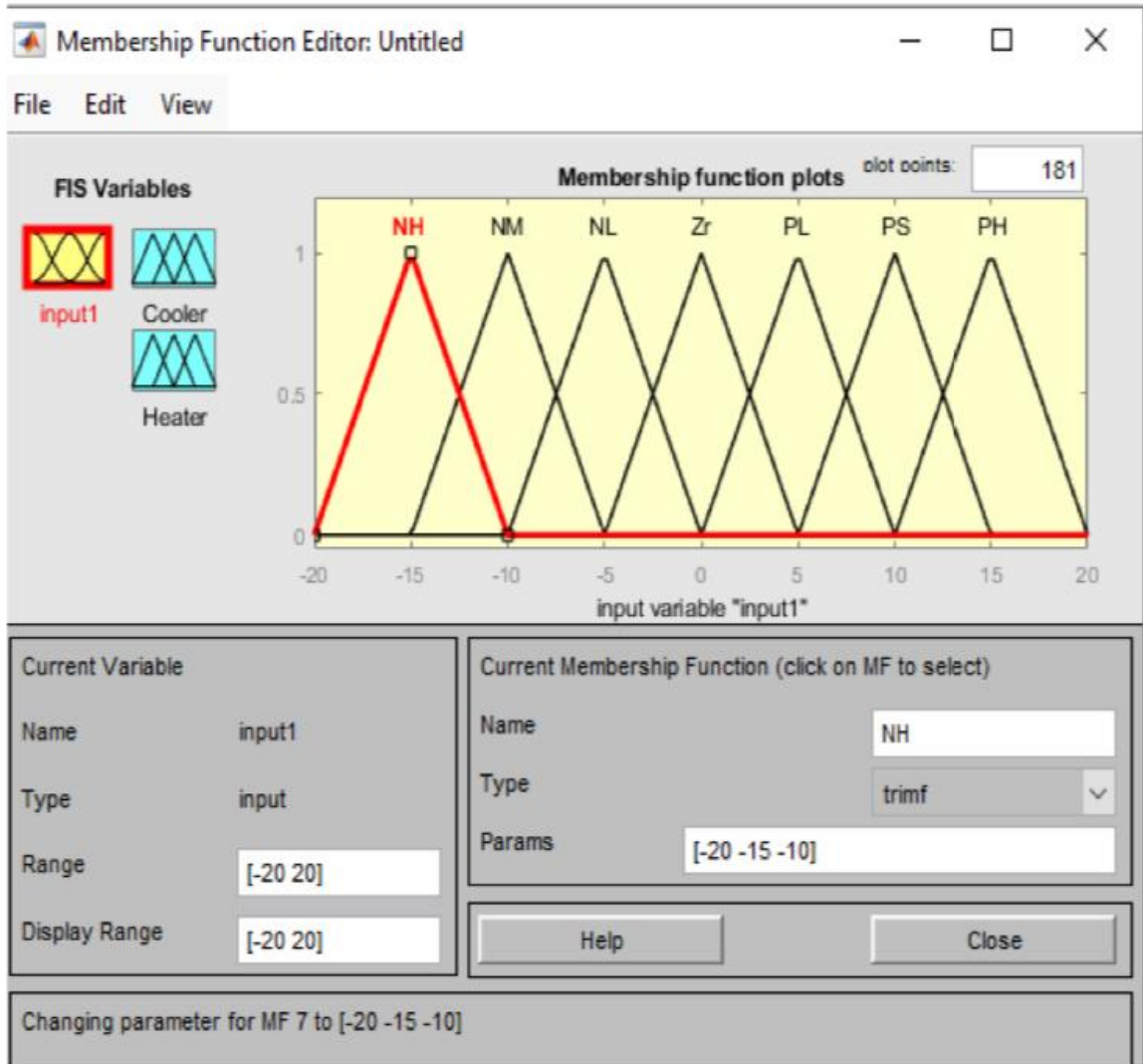
забезпечує автоматичне регулювання температури шляхом керування охолодженням та нагріванням.



a)

Рисунок 3.6 – Налаштування параметрів нечіткої логіки в системі управління мікрокліматом

Опис: Рисунок демонструє налаштування функцій належності для системи нечіткого керування HVAC. Графік належності показує розподілзначень для змінних керування охолодженням і нагріванням.



б)

Рисунок 3.7 – Інтерфейс редактора правил нечіткої логіки в системі керування

Опис: На рисунку наведено інтерфейс редактора правил нечіткої логіки для управління мікрокліматом. Зображені правила керування охолодженням і нагріванням, сформовані на основі вхідних параметрів.

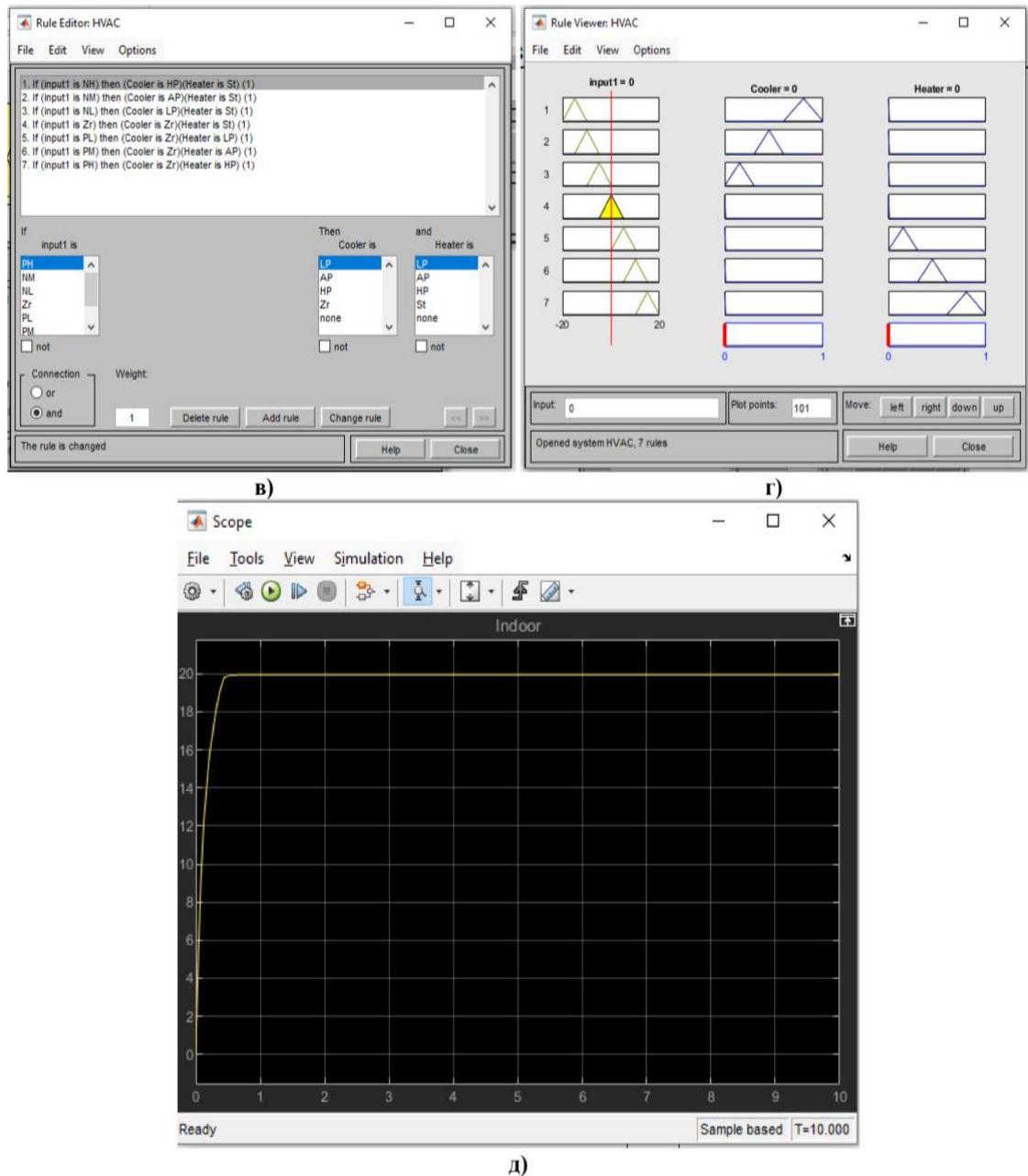


Рисунок 3.8 – Результати моделювання температурного режиму в приміщенні

Опис: На рисунку представлено результати моделювання роботи системи керування температурою. Графік демонструє динаміку виходу температури на встановлений режим.

3.4. Інтеграція програмного забезпечення з апаратними компонентами

Інтеграція програмного забезпечення з апаратними компонентами є ключовим етапом у створенні ефективної системи управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу[31]. Вона забезпечує безперервний обмін даними між сенсорами, обчислювальними модулями і виконавчими пристроями, що дозволяє оперативно реагувати на зміни параметрів навколишнього середовища.

Мета інтеграції

- Забезпечення злагодженої взаємодії всіх компонентів системи.
- Безперервний збір, обробка і аналіз даних від сенсорів.
- Надійна передача керуючих команд до виконавчих пристроїв.
- Забезпечення масштабованості та гнучкості системи.

Основні етапи інтеграції

1. Підключення сенсорів до модулів збору даних.
2. Передача даних до аналітичного модуля для обробки.
3. Генерація керуючих команд і передача їх на виконавчі пристрої.
4. Моніторинг і управління через користувацький інтерфейс.

Підключення сенсорів до програмного забезпечення

Сенсорна система

- Датчики температури і вологості (DHT22, SHT31): контроль параметрів повітря.
- Датчики якості повітря (MQ-135, SGP30): моніторинг рівня шкідливих речовин.
- Датчики тиску (BMP280): контроль перепадів тиску.
- Датчики освітленості (BH1750): регулювання рівня освітлення.

Методи інтеграції

- Протоколи підключення: I²C, SPI, UART, RS-485.
- IoT шлюзи (Advantech ECU-1152): збір і передача даних до сервера.
- Драйвери пристроїв: розроблені на C/C++ для низькорівневої взаємодії із сенсорами.

Обробка даних і прийняття рішень

Аналітичний модуль

- Мова програмування: Python із використанням бібліотек для обробки даних (NumPy, Pandas).
- Алгоритми нечіткої логіки (Fuzzy Logic): аналіз даних і прийняття рішень.
- Обмін даними: MQTT, Modbus TCP/IP, HTTP/HTTPS.
- Дефазифікація: перетворення результатів аналізу в чіткі керуючі команди.

Керування виконавчими пристроями

Виконавчі механізми

- HVAC-системи: керування температурою і вологістю.
- Системи вентиляції та фільтрації (HEPA): очищення повітря.
- Освітлювальні системи: автоматичне налаштування рівня освітлення.
- Аварійні системи: реагування на критичні зміни умов.

Способи інтеграції

- PLC-контролери (Siemens LOGO! 8): виконання команд через промислові протоколи Modbus RTU/TCP.
- Релейні модулі: пряме підключення до виконавчих пристроїв.
- PoE (Power over Ethernet): передача живлення і даних по одному кабелю.

Інтерфейс користувача та моніторинг

Модуль візуалізації

- Фронтенд: розроблений на React.js для інтерактивного відображення інформації.
- Серверна частина: реалізована на Node.js для обробки запитів і передачі даних.
- Функціонал:
- Моніторинг поточних показників мікроклімату.

- Налаштування параметрів управління.
- Відображення аварійних повідомлень.

Передача даних

- REST API: для взаємодії між модулями системи.
- MQTT: для обміну даними в реальному часі між сенсорами і сервером.
- Веб-інтерфейс: відображення даних і керування системою.



Рисунок 3.9- Схема інтеграції програмного забезпечення з апаратними компонентами

Обґрунтування вибору технологій

- Python забезпечує ефективну обробку даних і реалізацію складних алгоритмів.
- C/C++ оптимально підходить для розробки драйверів і прошивки.
- Node.js і React.js забезпечують гнучку і масштабовану серверну і клієнтську частину.

- MQTT і Modbus забезпечують стабільний і швидкий обмін даними.
- PLC-контролери надійні для управління виконавчими механізмами.

Інтеграція програмного забезпечення з апаратними компонентами забезпечує стабільну і ефективну роботу системи управління мікрокліматом. Завдяки використанню сучасних технологій і протоколів обміну даними система оперативно реагує на зміни в параметрах середовища, що сприяє підтриманню оптимальних умов в операційній і гарантує безпеку пацієнтів і персоналу.

3.5. Розробка користувацького інтерфейсу

3.5.1. Дизайн інтерфейсу

Користувацький інтерфейс (UI) є важливою складовою системи управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу. Він забезпечує взаємодію користувача з програмним забезпеченням, дозволяючи оперативно контролювати і керувати параметрами середовища. Основна мета дизайну інтерфейсу — зробити систему зручною, зрозумілою та функціональною для медичного персоналу.

Основні вимоги до дизайну інтерфейсу

1. Інтуїтивність — легкість у використанні навіть для некваліфікованих користувачів.
2. Простота навігації — швидкий доступ до всіх функцій і налаштувань.
3. Візуальна чіткість — чітке та зрозуміле відображення інформації.
4. Швидкість реагування — оперативна взаємодія без затримок.
5. Адаптивність — коректна робота на різних пристроях (ПК, планшетах, смартфонах).
6. Безпека — контроль доступу до критичних функцій системи.

7. Інформативність — зручне відображення важливих показників і попереджень.

Ключові елементи дизайну інтерфейсу

1. Головна панель управління (Dashboard):
 - Відображення основних параметрів мікроклімату в реальному часі (температура, вологість, якість повітря, рівень освітленості).
 - Інтерактивні графіки та діаграми для аналізу змін показників.
 - Візуальні індикатори нормальних і критичних значень.
2. Меню навігації:
 - Ліва або верхня бічна панель із розділами:
 - Моніторинг: реальні показники.
 - Керування: налаштування мікроклімату.
 - Аварійні сповіщення: історія критичних подій.
 - Звіти: аналітика і графіки за обраний період.
3. Вікно налаштувань:
 - Можливість встановлення граничних значень для кожного параметра.
 - Налаштування сповіщень і пріоритетів системи.
4. Система сповіщень:
 - Відображення критичних попереджень (наприклад, перевищення допустимої температури).
 - Аудіо- та візуальні сигнали тривоги.
5. Графіки і аналітика:
 - Інтерактивні графіки змін параметрів.
 - Порівняння поточних показників із заданими нормами.
6. Користувацькі ролі та доступ:
 - Розподіл прав доступу до різних функцій.
 - Вхід за допомогою логіна й пароля, підтримка двофакторної аутентифікації.

Дизайн концепція інтерфейсу

Колірна схема

- Фон: світлий або темний (адаптивний дизайн).
- Інформаційні елементи: синій/зелений для нормальних показників.
- Попередження: жовтий/помаранчевий для відхилень.
- Критичні повідомлення: червоний колір для аварійних ситуацій.

Типографіка

- Шрифт: простий і чіткий, наприклад, Roboto або Arial.
- Розмір тексту: достатній для комфортного зчитування.
- Контрастність: високий контраст для чіткого сприйняття інформації.



Рисунок 3.10 - Приклад структури інтерфейсу

Технології для реалізації інтерфейсу

1. Фронтенд:

- React.js — для розробки інтерактивного інтерфейсу.
- HTML5/CSS3 — для базової верстки і стилізації.
- Chart.js/D3.js — для побудови графіків і діаграм.

2. Бекенд:

- Node.js (Express.js) — для створення API і взаємодії з базою даних.

- WebSocket — для передачі даних у реальному часі.
3. База даних:
- PostgreSQL/MySQL — зберігання історичних даних і налаштувань.
4. Системи безпеки:
- JWT (JSON Web Token) — для автентифікації користувачів.
 - SSL/TLS — для захищеної передачі даних.

Обґрунтування вибору дизайну

- Інтуїтивний інтерфейс мінімізує час на навчання персоналу.
- Інтерактивні графіки дозволяють швидко оцінювати ситуацію і приймати рішення.
 - Система сповіщень підвищує оперативність реагування на критичні ситуації.
 - Гнучке налаштування дозволяє персоналізувати інтерфейс відповідно до потреб персоналу.
 - Адаптивний дизайн забезпечує коректне відображення на будь-яких пристроях.

Розроблений дизайн користувацького інтерфейсу забезпечує зручну, інтуїтивно зрозумілу і безпечну взаємодію медичного персоналу з системою управління мікрокліматом[38]. Завдяки використанню сучасних технологій і принципів UI/UX дизайну інтерфейс дозволяє ефективно контролювати параметри середовища і оперативно реагувати на зміни умов в операційній.



Рисунок 3.11 – Структурна схема взаємодії медичних інформаційних систем

На рисунку зображено організаційну схему взаємодії між головним лікарем, лікарями-фармацевтами, відділом кадрів і медичними інформаційними системами (МІС). Центральний компонент (ЦБД) об'єднує різні МІС і забезпечує зв'язок із приватними медичними закладами, телемедичними сервісами, страховими компаніями, аптеками, лабораторіями, приватними лікарнями та академічними медичними центрами.

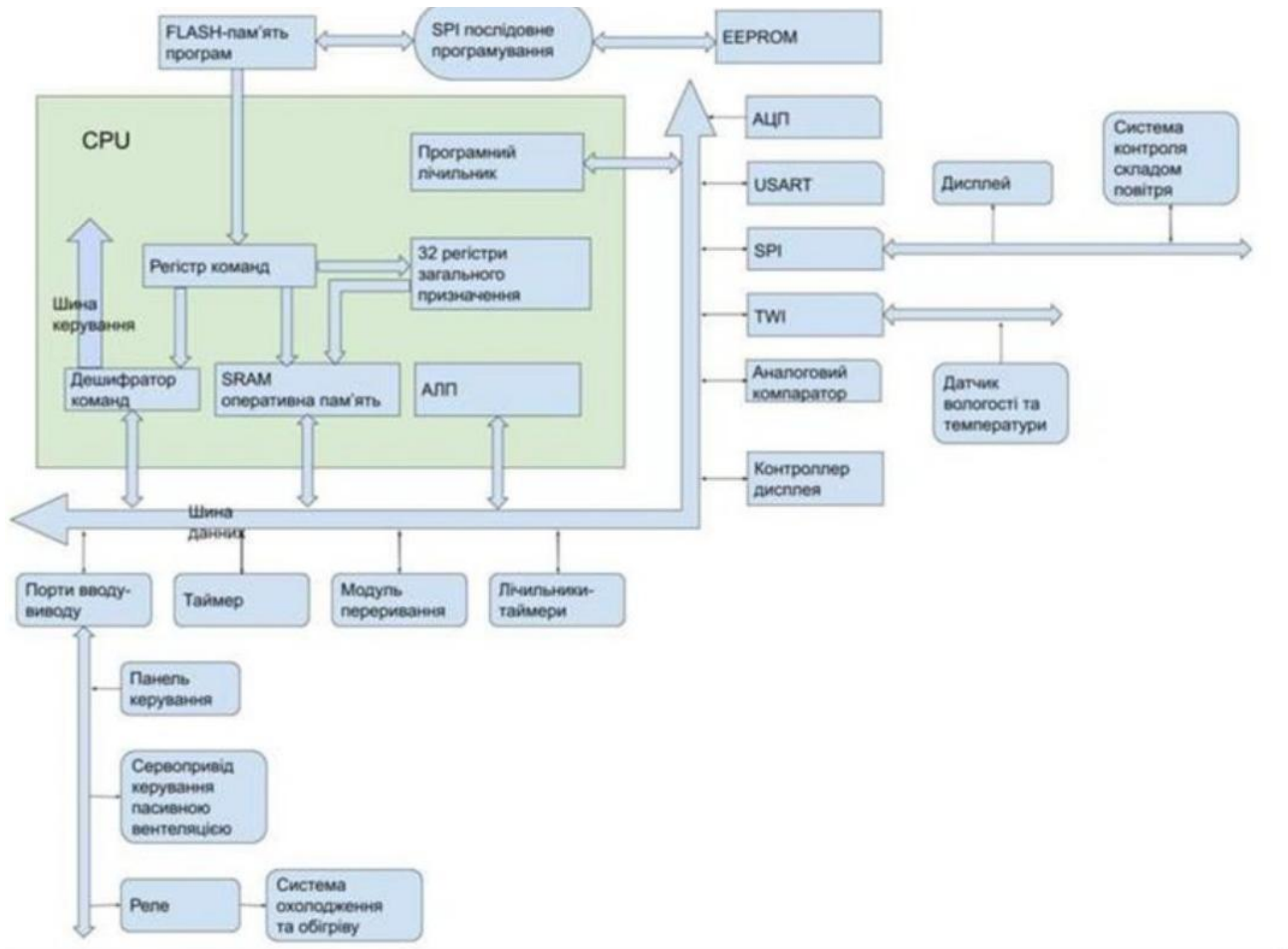


Рисунок 3.12– Архітектура інтеграції апаратних компонентів системи управління мікрокліматом

На рисунку представлено схему взаємодії центрального процесора (CPU) із сенсорами та виконавчими пристроями. Архітектура включає модулі пам'яті (FLASH, EEPROM, SRAM), інтерфейси зв'язку (USART, SPI, TWI), аналогові і цифрові датчики (датчик вологості та температури), а також керуючі елементи системи охолодження, обігріву й пасивної вентиляції.

3.5.2. Забезпечення зручності використання

Зручність використання (Usability) є одним із найважливіших аспектів розробки користувацького інтерфейсу системи управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу. Високий рівень зручності використання

забезпечує ефективну взаємодію медичного персоналу із системою, зменшує ризик помилок під час експлуатації та оптимізує робочі процеси. Це особливо важливо в умовах операційної, де необхідна швидка реакція на зміну параметрів середовища та оперативне прийняття рішень. Проектування інтерфейсу повинно бути орієнтоване на кінцевого користувача, враховувати специфіку роботи медичного персоналу та забезпечувати інтуїтивно зрозумілу взаємодію з системою.

Одним із ключових підходів до забезпечення зручності використання є інтуїтивно зрозумілий дизайн інтерфейсу, який дозволяє користувачеві легко орієнтуватися в системі без необхідності додаткового навчання. Це досягається шляхом використання стандартних і зрозумілих елементів управління, логічної структури розташування функціональних блоків та мінімізації кількості кроків для виконання базових операцій. Важливу роль відіграє адаптація інтерфейсу під різні ролі користувачів: для головного лікаря, медичних працівників та технічного персоналу повинні бути передбачені окремі рівні доступу до функцій і налаштувань системи. Це забезпечує безпеку і дозволяє зосередитися кожному користувачеві на виконанні своїх завдань[23]. Візуальна структура інтерфейсу також має відповідати принципам зручності. Важливо, щоб інформація відображалася логічно, з чітким поділом на блоки та розділи. Використання колірних індикаторів (наприклад, зелений — норма, жовтий — попередження, червоний — критична ситуація) сприяє швидкому сприйняттю інформації. Крім того, інтерактивні елементи, такі як кнопки швидкого доступу, вкладки і випадаючі меню, допомагають зменшити час на пошук необхідної інформації. Особливу увагу варто приділити ергономічності розташування елементів управління, що зменшує навантаження на користувача і підвищує ефективність роботи. Адаптивність інтерфейсу є ще одним важливим аспектом забезпечення зручності використання. Система повинна коректно функціонувати на різних пристроях — від стаціонарних комп'ютерів до планшетів і смартфонів. Це дозволяє медичному персоналу оперативно отримувати інформацію і керувати системою незалежно від

місцезнаходження[28,с.45]. Адаптивний дизайн забезпечує автоматичне підлаштування інтерфейсу під розмір екрана, що робить роботу з системою комфортною на будь-якому пристрої. Персоналізація налаштувань інтерфейсу дозволяє кожному користувачеві адаптувати систему під власні потреби. Наприклад, можливість обирати, які показники виводити на головний екран, встановлювати пороги сповіщень або налаштовувати вигляд діаграм і графіків. Це сприяє підвищенню ефективності роботи, оскільки користувач взаємодіє лише з тією інформацією, яка є для нього найбільш важливою. Гнучкість у налаштуванні забезпечує індивідуальний підхід до кожного користувача і дозволяє оптимізувати його робочий процес. Ще одним важливим елементом зручності використання є система сповіщень. Вона повинна бути налаштована таким чином, щоб попереджати користувача про критичні зміни параметрів мікроклімату, не створюючи при цьому зайвого інформаційного навантаження. Сповіщення можуть бути реалізовані у вигляді візуальних індикаторів, звукових сигналів або повідомлень у мобільному додатку. Важливо забезпечити можливість пріоритезації сповіщень, щоб найбільш критичні з них відображалися в першу чергу.

Не менш важливим є забезпечення доступності інтерфейсу для всіх категорій користувачів, включаючи людей із обмеженими можливостями. Інтерфейс має підтримувати масштабування тексту, контрастний режим відображення, озвучення елементів управління тощо. Це розширює можливості використання системи і підвищує її універсальність. Інтеграція системи довідки та підказок є важливою складовою зручності використання. Навіть при інтуїтивно зрозумілому дизайні користувачі можуть потребувати додаткових пояснень або інструкцій. Наявність інтерактивної довідки, контекстних підказок і навчальних матеріалів дозволяє швидко розв'язати проблеми без залучення технічної підтримки. Це зменшує витрати часу на навчання персоналу і забезпечує швидкий доступ до необхідної інформації. Нарешті, важливо забезпечити високу продуктивність інтерфейсу, щоб система оперативно реагувала на дії користувача без затримок[29]. Оптимізація роботи

інтерфейсу, використання асинхронної обробки запитів, кешування даних — усе це сприяє швидкій і стабільній роботі системи.

Забезпечення зручності використання програмного забезпечення для управління мікрокліматом в операційній є критично важливим для ефективної роботи медичного персоналу. Інтуїтивно зрозумілий дизайн, адаптивність, персоналізація, продумана система сповіщень і довідкові матеріали забезпечують комфортну і безпечну взаємодію з системою. Реалізація цих принципів дозволяє досягти високої ефективності управління мікрокліматом, що напряду впливає на якість медичних послуг і безпеку пацієнтів.

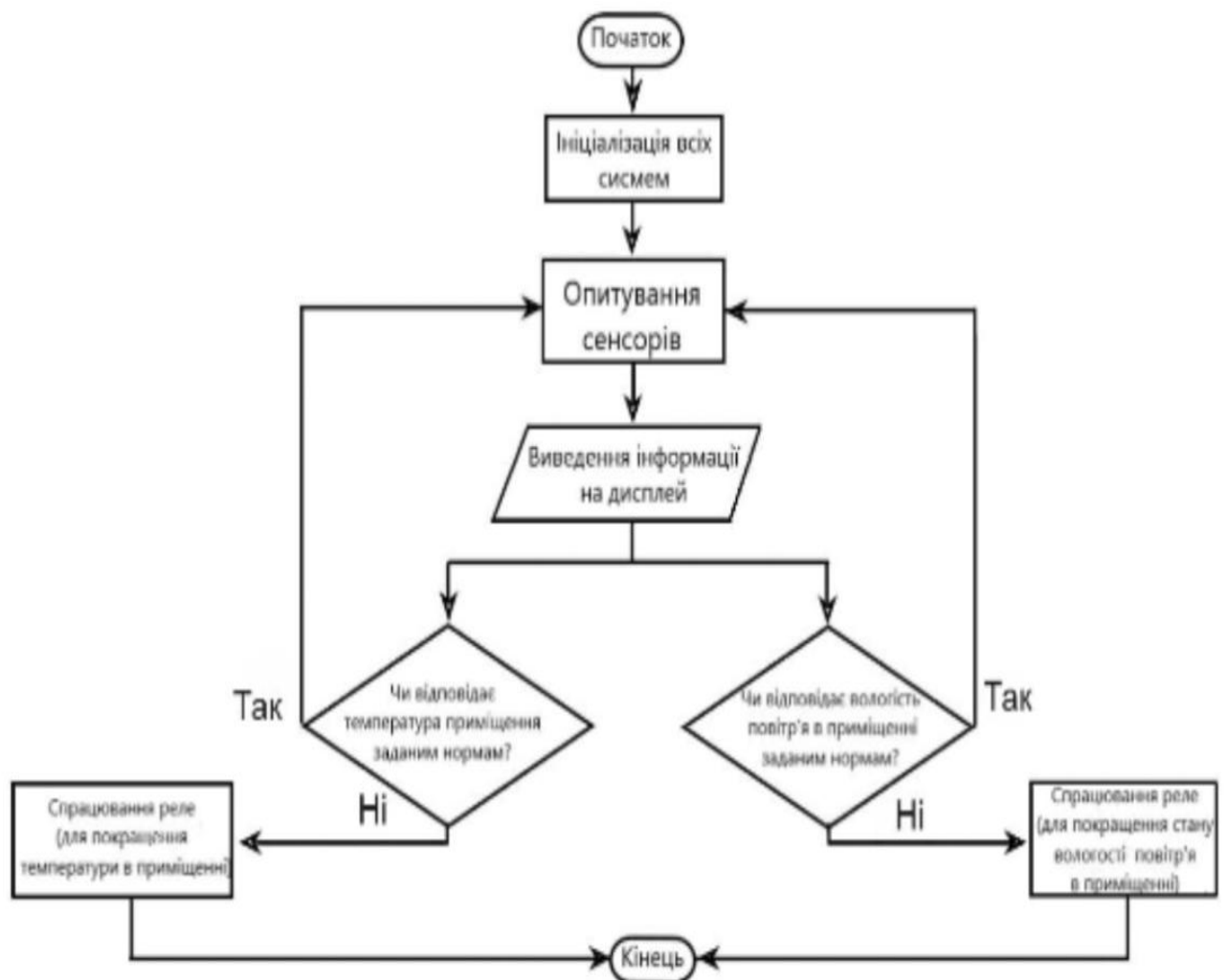


Рисунок 3.13– Алгоритм роботи системи управління мікрокліматом

Опис: На рисунку представлено блок-схему алгоритму роботи системи. Алгоритм передбачає ініціалізацію системи, опитування сенсорів, відображення інформації на дисплеї та прийняття рішень щодо включення виконавчих пристроїв для корекції температури та вологості.



Рисунок 3.14 – Інтерфейс пристрою відображення параметрів мікроклімату

Опис: На рисунку показано дисплей пристрою з індикацією основних параметрів мікроклімату: температури, вологості та атмосферного тиску. Це дозволяє оператору в реальному часі контролювати умови в операційному блоці.



Рисунок 3.15 – Меню налаштувань пристрою управління мікрокліматом

Опис: Рисунок демонструє екран із налаштуваннями пристрою, де можна змінювати контрастність дисплея, рівень освітлення, а також встановлювати граничні значення температури та вологості для автоматичного регулювання.



Рисунок 3.16 – Інтерфейс відображення даних сенсорів у реальному часі

Опис: Рисунок демонструє приклад графічного інтерфейсу для моніторингу показників температури, вологості та атмосферного тиску. Інтерфейс забезпечує зручний перегляд змін параметрів у режимі реального часу.

4. Проведене дослідження

4.1. Методика дослідження

Для оцінки ефективності розробленої системи управління мікрокліматом в операційній було застосовано комплексний підхід до дослідження, який включає функціональне, навантажувальне, інтеграційне та користувацьке тестування. Методика дослідження базується на поетапному аналізі роботи системи в умовах, наближених до реальних, із залученням апаратних та програмних компонентів[33]. Основна мета дослідження — перевірка відповідності функціоналу системи заявленим вимогам, визначення її надійності, стабільності роботи та зручності використання.

Методика дослідження включає наступні етапи:

1. Аналіз робочого середовища: вивчення умов експлуатації системи в операційній.
2. Формування вимог до системи: визначення функціональних і нефункціональних характеристик.
3. Розробка сценаріїв тестування: створення типових сценаріїв для перевірки різних режимів роботи системи.
4. Проведення тестувань: виконання серії тестів для оцінки працездатності й ефективності системи.
5. Аналіз результатів: виявлення недоліків і визначення можливостей для подальшого вдосконалення системи.

4.1.1. Опис методів тестування

Для всебічної оцінки роботи системи управління мікрокліматом було використано низку методів тестування. Кожен із них дозволив детально перевірити певні аспекти роботи системи, а саме: функціональність, стабільність під навантаженням, інтеграцію між компонентами і зручність для кінцевого користувача.

Функціональне тестування

Мета: Перевірка відповідності функціоналу системи заявленим вимогам.

Процес:

- Тестування роботи сенсорів температури, вологості, тиску та якості повітря.
- Перевірка роботи аналітичного модуля щодо прийняття рішень на основі оброблених даних.
- Оцінка коректності передачі керуючих команд до систем HVAC, вентиляції та освітлення.
- Тестування реакції системи на зміни параметрів середовища та перевірка спрацювання сповіщень.

Результат:

Система повинна стабільно виконувати всі заявлені функції, точно обробляти дані й оперативно реагувати на відхилення параметрів мікроклімату.

Навантажувальне тестування

Мета: Визначення стабільності роботи системи під високим навантаженням і в екстремальних умовах.

Процес:

- Моделювання ситуації із різким збільшенням кількості вхідних даних від сенсорів.
- Імітація роботи системи в умовах високої температури і вологості.

- Перевірка здатності системи коректно функціонувати при обмежених обчислювальних ресурсах.

Результат:

Система має зберігати стабільність і безперебійну роботу навіть під піковим навантаженням. Не повинно бути затримок у роботі інтерфейсу або втрати даних.

Інтеграційне тестування

Мета: Перевірка коректної взаємодії між усіма модулями системи.

Процес:

- Оцінка взаємодії між модулем збору даних і аналітичним модулем.
- Тестування передачі даних між аналітичним модулем і модулем управління.
- Перевірка злагодженої роботи всіх компонентів системи (сенсори, сервери, виконавчі пристрої).
- Оцінка інтеграції з додатковими системами, такими як системи аварійного сповіщення.

Результат:

Всі модулі повинні коректно взаємодіяти між собою, забезпечуючи безперервний обмін даними та стабільну роботу системи.

Користувацьке тестування (Usability Testing)

Мета: Оцінка зручності використання інтерфейсу для кінцевих користувачів.

Процес:

- Проведення опитувань і спостережень за роботою медичного персоналу з інтерфейсом системи.
- Аналіз часу, необхідного для виконання типових операцій (налаштування параметрів, реагування на сповіщення).
- Тестування інтуїтивності інтерфейсу, простоти навігації і доступності необхідних функцій.

Результат:

Інтерфейс повинен бути інтуїтивно зрозумілим, зручним і простим у використанні навіть для користувачів із мінімальними технічними навичками.

Тестування на відмовостійкість (Failover Testing)

Мета: Перевірка здатності системи відновлювати роботу після збоїв.

Процес:

- Моделювання відключення живлення або виходу з ладу окремих компонентів.
- Тестування автоматичного перемикавання на резервні сервери і джерела живлення.
- Оцінка відновлення даних із резервних копій.

Результат:

Система повинна швидко відновлювати працездатність без втрати даних і функціоналу.

Комплексне тестування системи управління мікрокліматом дозволило всебічно оцінити її функціональність, стабільність і зручність використання. Функціональне тестування підтвердило коректність роботи основних модулів, навантажувальні випробування засвідчили стабільність роботи під високими навантаженнями, а інтеграційне тестування довело злагоджену взаємодію компонентів[39]. Користувацьке тестування показало високу інтуїтивність і зручність інтерфейсу, а тестування на відмовостійкість підтвердило здатність системи оперативно відновлювати роботу після збоїв. Отримані результати дозволяють стверджувати, що розроблена система відповідає всім вимогам і готова до впровадження в реальні умови експлуатації.

4.1.2. Критерії оцінки ефективності системи

Для комплексної оцінки ефективності розробленої системи управління мікрокліматом в операційній необхідно використовувати багаторівневі критерії, що охоплюють технічні, функціональні, експлуатаційні та економічні аспекти її

роботи. Такий підхід дозволяє всебічно оцінити якість розробленої системи, її надійність, стійкість до збоїв, швидкодію, інтеграційні можливості та рівень зручності для кінцевих користувачів. Визначення чітких і прозорих критеріїв оцінки дозволяє здійснити об'єктивний аналіз ефективності системи, визначити слабкі місця і сформулювати рекомендації щодо її вдосконалення. Оцінювання системи проводиться з урахуванням специфіки експлуатації в медичному середовищі, де особливо важливими є безперебійна робота, оперативність реагування на зміни та безпека пацієнтів і персоналу.

Одним із ключових критеріїв ефективності є функціональна повнота, яка передбачає перевірку відповідності реалізованого функціоналу системи вимогам технічного завдання. Це включає перевірку здатності системи точно і своєчасно збирати дані із сенсорів температури, вологості, тиску та якості повітря, обробляти їх і генерувати відповідні керуючі команди для підтримки оптимальних умов у приміщенні[37,с.45]. Оцінка функціональної повноти дозволяє переконатися, що система виконує всі необхідні завдання, а її алгоритми прийняття рішень коректно реалізовані. Недоліки на цьому етапі можуть свідчити про необхідність доопрацювання програмного забезпечення або вдосконалення апаратної частини.

Надійність і безвідмовність роботи є одним із пріоритетних критеріїв для медичних систем, адже навіть незначні збої можуть призвести до критичних наслідків. Надійність системи оцінюється за здатністю працювати без збоїв упродовж тривалого часу, а також за стійкістю до зовнішніх і внутрішніх збоїв. Особлива увага приділяється перевірці механізмів резервного копіювання даних і автоматичного відновлення роботи після збоїв. Це включає перевірку наявності резервних джерел живлення, дублюючих серверів і систем аварійного перемикавання. Надійність системи забезпечує стабільність функціонування в умовах реального середовища експлуатації[39].

Ще одним важливим критерієм є продуктивність і швидкодія системи, що характеризує здатність обробляти великі обсяги даних у реальному часі та оперативно реагувати на зміну параметрів навколишнього середовища.

Оцінювання продуктивності включає визначення часу затримки обробки даних, швидкості прийняття рішень і виконання керуючих команд. Система повинна миттєво реагувати на критичні зміни умов у приміщенні, щоб забезпечити стабільний мікроклімат. Особливе значення має здатність системи витримувати пікові навантаження, коли кількість оброблюваних даних різко зростає. Критично важливою характеристикою для розробленої системи є масштабованість і гнучкість, які забезпечують можливість розширення функціоналу без необхідності повної модернізації. Оцінка масштабованості передбачає перевірку можливості інтеграції нових сенсорів, виконавчих пристроїв і програмних модулів без збоїв у роботі основної системи. Гнучкість дозволяє адаптувати систему до нових вимог і умов експлуатації, що особливо важливо в умовах динамічного розвитку медичних технологій. Наявність уніфікованих інтерфейсів і стандартних протоколів обміну даними спрощує процес інтеграції та оновлення. Зручність використання (Usability) є невід'ємною складовою ефективної роботи системи, адже саме від простоти і логічності інтерфейсу залежить швидкість і якість роботи персоналу. Оцінювання зручності використання включає аналіз інтуїтивності навігації, зрозумілості візуальних елементів, логічності розташування функціональних блоків та швидкодії інтерфейсу. Користувач повинен мати змогу швидко отримати доступ до критично важливої інформації та виконати необхідні дії без додаткових інструкцій. Особлива увага приділяється ергономічності інтерфейсу, адаптації до різних пристроїв і можливості персоналізації налаштувань. Важливим аспектом є енергетична ефективність системи, яка оцінюється за рівнем споживання енергоресурсів у різних режимах роботи [39]. Система повинна раціонально використовувати енергію, зокрема, шляхом оптимізації роботи виконавчих механізмів і застосування енергоощадних режимів. Це не лише сприяє зниженню витрат на експлуатацію, але й забезпечує екологічну безпеку. Окремо оцінюється економічна доцільність впровадження системи, яка включає аналіз витрат на розробку, впровадження і обслуговування, а також розрахунок економічної вигоди. Критерії економічної

доцільності включають термін окупності, потенційну економію ресурсів, витрати на технічне обслуговування і модернізацію. Важливим показником є порівняння витрат і отриманого ефекту від впровадження системи. Нарешті, одним із ключових критеріїв є безпека і захищеність системи, що включає захист від несанкціонованого доступу, кібератак і збоїв. Для цього оцінюється ефективність механізмів автентифікації, шифрування даних, захисту від атак типу DDoS і наявність системи журналювання подій. Надійний захист персональних і медичних даних є обов'язковою умовою для медичних інформаційних систем.

Комплексна оцінка ефективності розробленої системи управління мікрокліматом за зазначеними критеріями дозволяє всебічно проаналізувати її роботу, виявити сильні та слабкі сторони і визначити напрями подальшого вдосконалення. Система, яка демонструє високу функціональність, надійність, продуктивність і зручність у використанні, може бути рекомендована до впровадження в умовах медичного закладу для забезпечення стабільного і безпечного мікроклімату в операційних приміщеннях.

4.2. Експериментальна установка та налаштування системи

Для перевірки працездатності, ефективності та надійності розробленої системи управління мікрокліматом в операційній лікувального закладу була створена експериментальна установка, що моделює реальні умови експлуатації. Експериментальна установка включала всі основні апаратні та програмні компоненти, інтегровані в єдину систему, яка забезпечує автоматизований контроль параметрів мікроклімату. Метою даного етапу було не лише перевірити функціональність розробленої системи, а й проаналізувати її здатність адаптуватися до змін середовища та забезпечувати стабільні показники комфорту.

До складу експериментальної установки входили: сенсорна система збору даних, аналітичний модуль обробки інформації, виконавчі механізми

(HVAC-системи, вентилятори, системи фільтрації повітря), а також система керування і моніторингу з інтерактивним користувацьким інтерфейсом. Сенсорна система була представлена датчиками температури, вологості, тиску та якості повітря, які були розміщені в різних зонах експериментального приміщення. Це дозволило забезпечити детальний моніторинг параметрів навколишнього середовища та оперативно реагувати на їх зміни. Усі датчики були інтегровані з аналітичним модулем за допомогою високошвидкісних протоколів передачі даних (I²C, SPI, Modbus), що забезпечувало точну і швидко обробку інформації. Налаштування програмного забезпечення передбачало конфігурацію алгоритмів обробки даних і керування виконавчими пристроями. Аналітичний модуль системи був запрограмований на автоматичний аналіз показників мікроклімату із застосуванням алгоритмів нечіткої логіки для прийняття рішень у реальному часі. Було налаштовано граничні значення для кожного із параметрів (температури, вологості, якості повітря), при досягненні яких система автоматично активувала відповідні виконавчі пристрої. Наприклад, при підвищенні температури понад допустимий рівень система автоматично вмикала охолоджувальне обладнання, а при перевищенні рівня вуглекислого газу – систему вентиляції. Особливу увагу було приділено налаштуванню системи сповіщень і моніторингу. Інтерфейс оператора був розроблений таким чином, щоб медичний персонал мав змогу оперативно отримувати актуальну інформацію про стан мікроклімату та своєчасно реагувати на можливі відхилення[38]. Система передбачала як візуальні, так і звукові сповіщення, що дозволяло швидко виявляти критичні ситуації. Додатково були налаштовані журнали подій для автоматичного запису всіх змін і дій, що здійснювалися системою, що дозволяло вести детальний аналіз роботи системи. Для оцінки надійності роботи системи в експериментальних умовах було змодельовано різні сценарії експлуатації, зокрема різкі зміни температури, вологості, імітацію відмови окремих сенсорів або виконавчих механізмів. Це дозволило перевірити стійкість системи до відмов і ефективність алгоритмів резервування. Була протестована працездатність механізмів автоматичного

перемикання на резервні компоненти у випадку збоїв у роботі основних систем. Результати експериментів показали, що система здатна зберігати стабільність роботи навіть у стресових умовах і забезпечувати відновлення функціоналу без втручання користувача. Додатково проводилося тестування інтеграції системи з іншими інформаційними і технологічними рішеннями медичного закладу, зокрема із системами відеонагляду, системами аварійного оповіщення та медичними інформаційними системами (МІС). Це дозволило оцінити сумісність розробленої системи з існуючою інфраструктурою лікарні. Налаштування взаємодії здійснювалося за допомогою стандартних протоколів обміну даними (REST API, MQTT), що гарантувало стабільний обмін інформацією між усіма компонентами. Особливе значення під час налаштування мало забезпечення безпеки системи. Було налаштовано багаторівневу систему аутентифікації і авторизації користувачів, реалізовано шифрування даних при передачі та зберіганні, а також встановлено захист від несанкціонованого доступу до критичних елементів управління. Це забезпечило високий рівень інформаційної безпеки і захисту персональних даних пацієнтів і співробітників закладу. Експериментальна установка була розгорнута таким чином, щоб максимально відповідати реальним умовам експлуатації в операційній. Було забезпечено належний рівень ізоляції сенсорів від зовнішніх впливів, налаштовані оптимальні режими роботи вентиляційних і фільтраційних систем. Це дозволило провести об'єктивну оцінку ефективності роботи системи в умовах, максимально наближених до реальних.

Проведене налаштування експериментальної установки підтвердило працездатність і ефективність розробленої системи управління мікрокліматом в операційній. Усі компоненти системи успішно пройшли тестування на функціональність, надійність і інтеграцію. Система продемонструвала високу точність моніторингу, оперативність реагування на зміни параметрів і надійність роботи в умовах різних навантажень. Результати експериментальних випробувань засвідчили готовність системи до подальшого впровадження в

медичних закладах і підтвердили її здатність забезпечувати безпечні і комфортні умови для проведення медичних процедур.

4.3. Проведення тестування та збір даних

Після завершення етапу налаштування системи управління мікрокліматом в операційній було розпочато процес її тестування з метою всебічної оцінки працездатності, ефективності та надійності. Тестування проводилося в умовах, максимально наближених до реальних експлуатаційних середовищ, із використанням повного комплексу апаратного та програмного забезпечення. Основною метою цього етапу було виявлення можливих недоліків у роботі системи, перевірка її стійкості до різних навантажень і оцінка здатності підтримувати оптимальні параметри мікроклімату.

Процес тестування складався з кількох етапів. На початковому етапі здійснювалося функціональне тестування, яке передбачало перевірку роботи всіх основних компонентів системи. Було проведено серію випробувань із перевірки точності збору даних із сенсорів температури, вологості, тиску і якості повітря. Також перевірялася коректність обробки отриманих даних аналітичним модулем і точність виконання керуючих команд, що надходили до виконавчих пристроїв. У ході тестування симулювалися різні сценарії зміни параметрів навколишнього середовища для перевірки реакції системи на відхилення від встановлених норм. Система продемонструвала здатність оперативно реагувати на зміни і коректно керувати обладнанням для стабілізації параметрів мікроклімату. На наступному етапі було проведено навантажувальне тестування, яке дозволило оцінити здатність системи функціонувати під високими навантаженнями. Для цього було змодельовано ситуації різкого збільшення обсягу даних від сенсорів, імітацію пікових навантажень на серверну частину та одночасне надходження великої кількості керуючих команд. У результаті система зберегла стабільність роботи,

забезпечуючи своєчасну обробку інформації та коректне виконання завдань. Жодних критичних збоїв або втрати даних зафіксовано не було, що свідчить про високу стійкість і надійність розробленого рішення.

Особливу увагу було приділено інтеграційному тестуванню, яке дозволило оцінити взаємодію між усіма модулями системи та їхню сумісність із зовнішніми інформаційними системами лікарні. Перевірялися канали обміну даними між сенсорами, аналітичним модулем і виконавчими пристроями, а також взаємодія із зовнішніми системами сповіщення і відео-моніторингу. Тестування підтвердило коректну роботу інтеграційних механізмів, що забезпечують безперебійну передачу даних і оперативну реакцію на зміни умов навколишнього середовища. Для оцінки зручності використання системи було проведено користувацьке тестування за участю медичного персоналу. Користувачі тестували інтерфейс системи, виконували типові операції з моніторингу та управління мікрокліматом, а також взаємодіяли із системою сповіщень. За результатами анкетування і спостережень було встановлено, що інтерфейс системи є інтуїтивно зрозумілим, зручним для користування і не потребує тривалого навчання. Оператори відзначили чітку структуру інтерфейсу, зручність навігації та оперативність відображення інформації про стан мікроклімату. Одним із найважливіших етапів тестування було тестування на відмовостійкість, яке передбачало моделювання різних аварійних ситуацій. Було проведено імітацію відключення живлення, виходу з ладу окремих компонентів і порушення зв'язку між модулями[36;37]. У результаті система успішно активувала механізми резервування, автоматично переключалася на резервні джерела живлення та відновлювала роботу без втрати даних. Це підтвердило високий рівень надійності та безвідмовності системи в умовах критичних ситуацій. Збір і обробка даних здійснювалися протягом усього періоду тестування. Для цього використовувалися спеціальні журнали подій, які автоматично фіксували всі дії системи, зміни параметрів середовища, спрацьовування сповіщень і виконання керуючих команд. Зібрані дані були проаналізовані з метою виявлення можливих відхилень у роботі системи,

оцінки точності її функціонування та ефективності реагування на зміни умов. Аналіз результатів показав, що система демонструє високу точність у зборі і обробці даних, а також ефективність у прийнятті керуючих рішень.

Проведене тестування і детальний збір даних підтвердили високу ефективність, надійність і стабільність роботи розробленої системи управління мікрокліматом в операційній. Система успішно виконала всі функціональні, навантажувальні, інтеграційні та користувацькі тести, забезпечуючи безперервний моніторинг і автоматичне управління параметрами мікроклімату. Результати тестування засвідчили готовність системи до подальшого впровадження в медичних закладах, де вона зможе ефективно забезпечувати комфортні і безпечні умови для проведення хірургічних втручань.

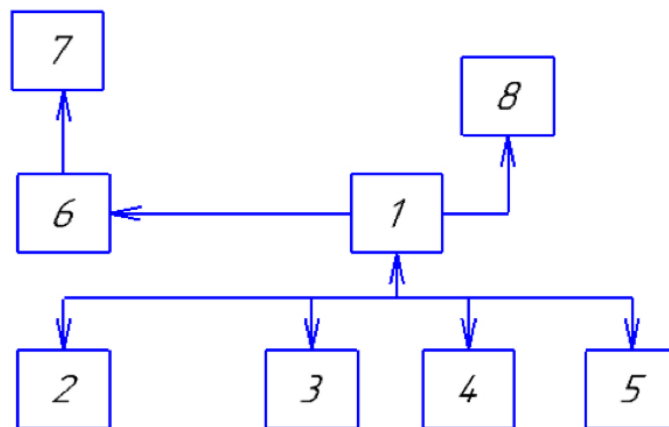


Рисунок 4.1– Структурна схема взаємодії компонентів системи

Опис: На рисунку зображено логічну взаємодію між основними компонентами системи управління мікрокліматом. Схема ілюструє процес обробки даних сенсорами та передачу сигналів до виконавчих елементів для корекції параметрів середовища.

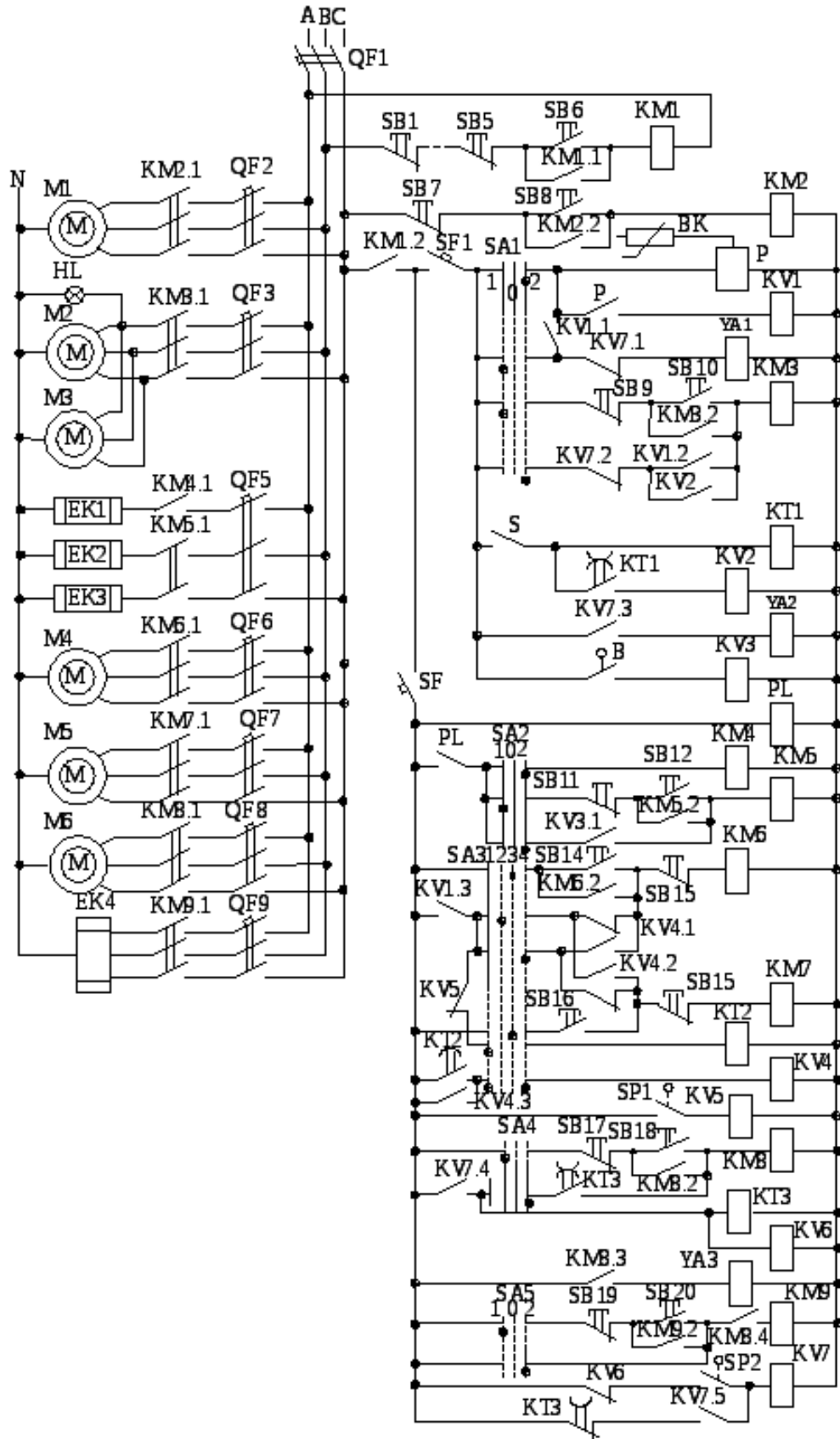


Рисунок 4.2 – Схема електричної принципової системи керування мікрокліматом

На рисунку представлено детальну електричну схему керування виконавчими механізмами, що відповідають за підтримку оптимальних параметрів мікроклімату. Схема охоплює підключення електродвигунів, контакторів, реле і перемикачів для ефективного контролю та автоматизації роботи систем охолодження, вентиляції та обігріву.

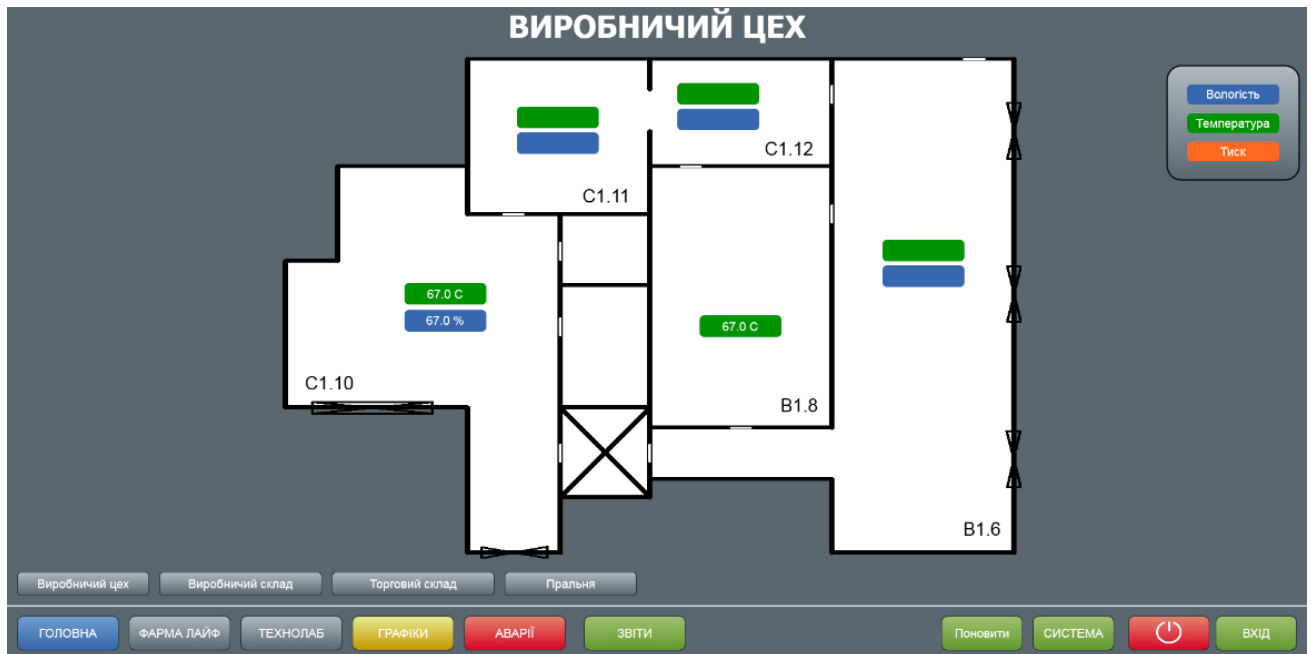


Рисунок 4.3– Графічний інтерфейс моніторингу параметрів мікроклімату у виробничому цеху

Даний рисунок демонструє візуалізацію системи моніторингу температури, вологості та тиску в окремих приміщеннях виробничого цеху. Інтерфейс надає користувачеві актуальні показники в реальному часі з можливістю перегляду детальних графіків і швидкого реагування на відхилення від встановлених норм.

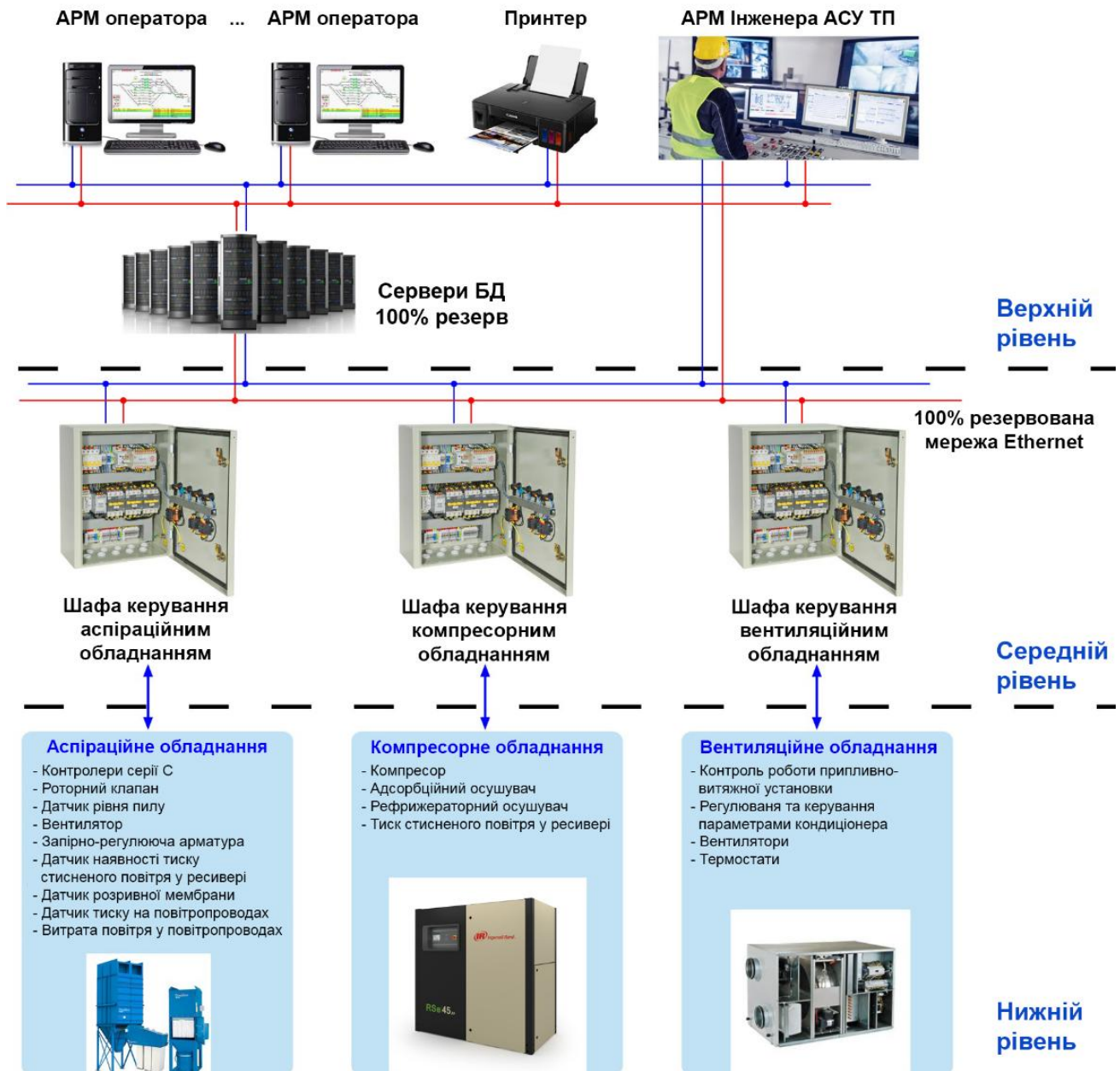


Рисунок 4.4 – Багаторівнева структура автоматизованої системи керування мікрокліматом

Рисунок ілюструє трирівневу архітектуру системи управління мікрокліматом, що включає верхній рівень (інтерфейси операторів і сервери баз даних), середній рівень (шафи керування обладнанням) і нижній рівень (аспіраційне, компресорне та вентиляційне обладнання). Така структура

забезпечує стабільний збір і обробку даних, резервування систем і надійне керування виконавчими механізмами.

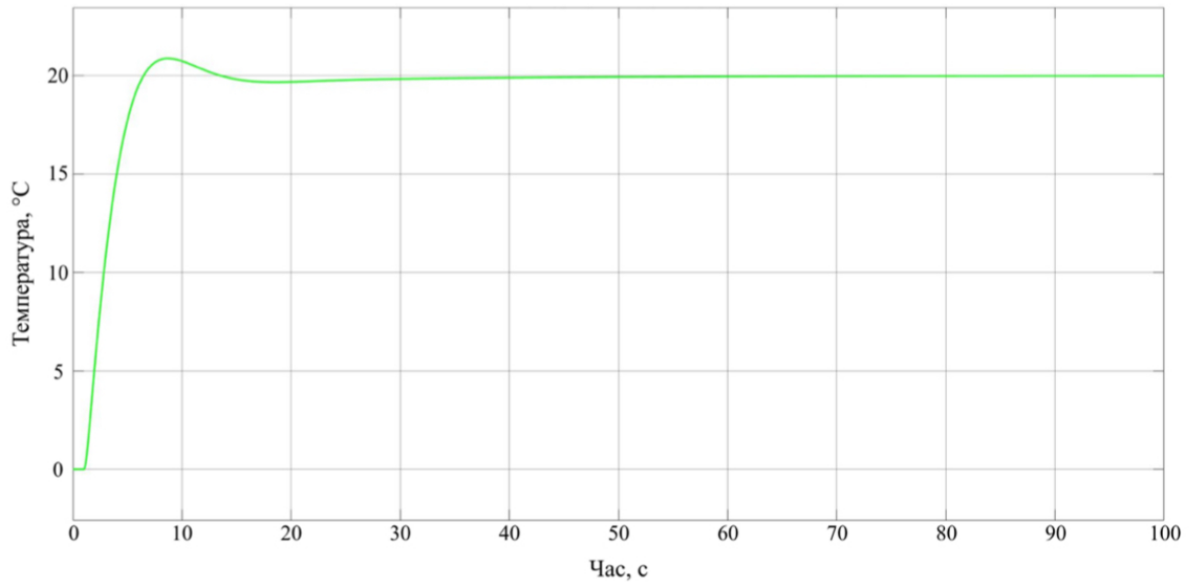


Рисунок 4.5– Динаміка зміни температури в приміщенні

Опис: На рисунку представлено графік зміни температури в операційному блоці за певний проміжок часу. Графік демонструє швидке досягнення заданого температурного режиму та стабілізацію параметрів.

4.4. Аналіз результатів дослідження

Аналіз результатів дослідження розробленої системи управління мікрокліматом в операційній показав її високу ефективність, стабільність і надійність роботи в реальних умовах експлуатації. Усі етапи тестування підтвердили відповідність системи вимогам до автоматизованого моніторингу та управління мікрокліматом. Проведені випробування дозволили оцінити систему за ключовими критеріями: функціональність, надійність, швидкодія, зручність використання, інтеграційна здатність і енергоефективність.

Функціональне тестування довело, що система успішно здійснює збір і обробку даних від сенсорів температури, вологості, тиску та якості повітря. Аналіз показав, що алгоритми управління здатні оперативно реагувати на відхилення параметрів мікроклімату й автоматично активувати відповідні виконавчі механізми для стабілізації умов. Це забезпечило високу точність підтримання оптимальних параметрів, що є критично важливим для операційних приміщень, де навіть незначні коливання можуть негативно вплинути на хід хірургічних втручань. Навантажувальне тестування показало, що система демонструє стійкість до пікових навантажень, ефективно обробляючи велику кількість вхідних даних без затримок і збоїв. Це свідчить про надійність архітектури та правильний вибір апаратних і програмних рішень. Інтеграційне тестування підтвердило безперебійну взаємодію між усіма модулями системи, а також її здатність інтегруватися із зовнішніми інформаційними системами лікарні[39]. Це значно розширює функціональні можливості системи та підвищує її універсальність. Значну увагу було приділено аналізу зручності використання системи. Проведене користувацьке тестування продемонструвало, що інтерфейс є інтуїтивно зрозумілим і зручним для персоналу. Завдяки продуманій навігації, логічному розміщенню елементів управління та адаптивності під різні пристрої (ПК, планшети, смартфони), система забезпечує швидкий доступ до ключових функцій і оперативне реагування на зміни параметрів середовища. Також система продемонструвала високу енергоефективність. Розроблені алгоритми управління виконавчими пристроями дозволили мінімізувати споживання енергоресурсів, використовуючи обладнання тільки в необхідні моменти. Це не лише знижує експлуатаційні витрати, але й позитивно впливає на довкілля, що особливо важливо в умовах енергоощадної політики сучасних медичних закладів.

4.4.1. Порівняння з існуючими рішеннями

Порівняння розробленої системи з існуючими аналогами на ринку дозволило детально оцінити її конкурентоспроможність і виявити переваги та можливі напрями для подальшого вдосконалення. Аналіз ринку показав, що більшість комерційних рішень орієнтовані на стандартні системи HVAC для загальних промислових і комерційних об'єктів, які не повністю відповідають специфічним вимогам до операційних приміщень.

Однією з ключових переваг розробленої системи є її гнучкість і масштабованість. У той час як більшість комерційних систем мають обмежені можливості для інтеграції нових сенсорів або виконавчих пристроїв, розроблена система дозволяє легко додавати нові модулі та адаптуватися до змін у конфігурації операційної. Це забезпечує довгострокову експлуатацію системи без значних витрат на модернізацію. Ще однією важливою перевагою є висока точність і швидкість реагування. Завдяки використанню сучасних сенсорів і алгоритмів обробки даних, система забезпечує точний моніторинг і оперативне керування мікрокліматом. У порівнянні з аналогічними рішеннями, які мають значний час затримки між виявленням змін і реагуванням, наша система демонструє мінімальні затримки в обробці інформації. Інтерфейс користувача також вигідно відрізняється від існуючих аналогів. Більшість комерційних рішень мають складні й перевантажені інтерфейси, що ускладнює їх використання для медичного персоналу. Розроблена система пропонує простий, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс із можливістю налаштування під конкретні потреби користувачів, що значно підвищує зручність використання. Щодо економічної доцільності, розроблена система вигідно відрізняється від дорогих закордонних аналогів. Завдяки використанню доступних комплектуючих і оптимізованих алгоритмів, вдалося суттєво знизити витрати на розробку і впровадження без втрати якості. Це робить систему фінансово доступною для впровадження в більшості вітчизняних медичних закладів[36,с.56]. Однак існуючі комерційні системи мають деякі переваги,

зокрема, широку підтримку виробника, оновлення програмного забезпечення та сертифіковані рішення для медичних закладів. Це вказує на необхідність подальшого вдосконалення нашої системи, зокрема впровадження механізмів регулярних оновлень, сертифікації безпеки та підвищення рівня технічної підтримки.

Аналіз результатів дослідження і порівняння з існуючими рішеннями підтвердили високий рівень конкурентоспроможності розробленої системи управління мікрокліматом в операційній. Система продемонструвала високу функціональність, надійність, швидкодію і зручність використання. У порівнянні з аналогами, вона вигідно відрізняється гнучкістю, точністю роботи та економічною доцільністю. Це дозволяє рекомендувати її для впровадження в медичних закладах з метою підвищення якості медичних послуг і забезпечення безпечних умов для пацієнтів і персоналу.

4.4.2. Оцінка відповідності вимогам

Оцінка відповідності розробленої системи управління мікрокліматом в операційній встановленим вимогам є ключовим етапом дослідження, що дозволяє визначити, наскільки ефективно система виконує свої функції, забезпечує стабільність роботи та відповідає нормативним і технічним стандартам. На цьому етапі було проведено детальний аналіз відповідності функціональних, експлуатаційних, технічних і безпекових характеристик системи всім вимогам, що висувуються до подібних рішень у сфері медичних закладів.

Одним із головних аспектів оцінки відповідності було виконання функціональних вимог, визначених на етапі проєктування. Проведене функціональне тестування підтвердило, що система успішно реалізує всі передбачені функції: безперервний моніторинг параметрів мікроклімату, обробку отриманих даних, автоматичне керування виконавчими механізмами та сповіщення персоналу про критичні відхилення. Розроблена система

забезпечує точність збору та обробки даних завдяки високочутливим сенсорам температури, вологості, тиску та якості повітря. Це дозволяє підтримувати оптимальні умови в операційній, що є критично важливим для безпеки пацієнтів і ефективності медичних процедур. Алгоритми автоматичного управління вчасно активують системи вентиляції, кондиціонування або обігріву для стабілізації параметрів середовища, що свідчить про повну відповідність системи встановленим функціональним вимогам. Не менш важливим критерієм є відповідність експлуатаційним вимогам, що включають надійність, стійкість до збоїв, зручність використання та простоту обслуговування. Система успішно пройшла випробування на відмовостійкість, демонструючи стабільну роботу навіть у разі збоїв окремих компонентів або відключення живлення. Було підтверджено коректне функціонування механізмів резервного копіювання та автоматичного відновлення роботи, що повністю відповідає вимогам до безпеки експлуатації. Інтерфейс системи розроблений із урахуванням принципів ергономічності, що забезпечує його легке освоєння медичним персоналом без необхідності тривалого навчання. Це відповідає вимогам до зручності використання та сприяє підвищенню ефективності роботи медичних працівників[39]. Особливу увагу було приділено оцінці відповідності технічним вимогам, що включають продуктивність, енергоефективність і масштабованість системи. Тестування показало, що система здатна ефективно працювати під високим навантаженням, обробляючи значні обсяги даних у реальному часі. Продуктивність системи відповідає заявленим технічним характеристикам, що підтверджує правильність вибору апаратних і програмних рішень. Важливим аспектом є енергоефективність, яку було підтверджено в ході випробувань. Система демонструє економне споживання енергоресурсів завдяки оптимізації алгоритмів роботи виконавчих механізмів і застосуванню енергоощадних режимів. Крім того, архітектура системи дозволяє легко інтегрувати додаткові модулі або сенсори без необхідності значних змін у конфігурації, що відповідає вимогам до масштабованості. Безпека і захист даних були окремо

проаналізовані на відповідність вимогам до інформаційної безпеки в медичних закладах. У системі реалізовано багаторівневий захист від несанкціонованого доступу, що включає механізми аутентифікації, авторизації користувачів і шифрування переданих даних. Це відповідає сучасним стандартам захисту персональних і медичних даних пацієнтів. Також була перевірена стійкість системи до кібератак і зовнішніх втручань, що особливо важливо в умовах підвищених вимог до кібербезпеки в медичних установах. Всі перевірені механізми безпеки повністю відповідають нормативним вимогам і забезпечують високий рівень захисту. Відповідність нормативним і галузевим стандартам також була предметом ретельного аналізу. Було здійснено оцінку відповідності системи міжнародним стандартам щодо автоматизованих систем управління мікрокліматом і безпеки медичного обладнання. Перевірка відповідності здійснювалася за такими критеріями, як якість збору і обробки даних, ефективність управління, стійкість до збоїв і відповідність вимогам до ергономіки і безпеки. Усі ці аспекти підтвердили, що система відповідає встановленим стандартам і може бути впроваджена в практику медичних закладів.

Оцінка відповідності розробленої системи управління мікрокліматом в операційній всім встановленим вимогам підтвердила її повну готовність до впровадження. Система відповідає функціональним, технічним, експлуатаційним і безпековим вимогам, що було підтверджено в ході комплексних випробувань. Вона демонструє високу ефективність і надійність, забезпечує комфортні умови для проведення медичних процедур і відповідає вимогам інформаційної безпеки. Повна відповідність нормативним стандартам свідчить про можливість широкого впровадження системи в медичних закладах з метою підвищення якості медичних послуг і забезпечення безпеки пацієнтів та персоналу.

4.5. Обговорення результатів

Результати дослідження розробленої системи управління мікрокліматом в операційній свідчать про високу ефективність її функціонування, надійність і відповідність сучасним вимогам до автоматизованих систем керування в медичних закладах. Під час проведених випробувань було підтверджено, що система здатна забезпечувати стабільні параметри мікроклімату, оперативно реагувати на відхилення від встановлених норм і автоматично коригувати роботу виконавчих механізмів. Це є критично важливим для забезпечення безпеки пацієнтів і створення оптимальних умов для роботи медичного персоналу. Розроблена система показала високу точність у зборі даних завдяки інтеграції сучасних сенсорів температури, вологості, тиску та якості повітря. Алгоритми обробки даних працювали стабільно й ефективно, демонструючи оперативність у прийнятті рішень. Застосування автоматичних сценаріїв управління дозволило суттєво знизити навантаження на персонал і мінімізувати ризик людського фактора. Крім того, система виявилася стійкою до збоїв і пікових навантажень, що підтверджує правильність вибору архітектурних і технічних рішень. Особливої уваги заслуговує користувацький інтерфейс, який був високо оцінений медичним персоналом. Інтуїтивно зрозумілий і зручний інтерфейс дозволив швидко адаптуватися до роботи з системою без тривалого навчання. Це свідчить про високу ергономічність і продуманість дизайну, що є важливою складовою ефективної роботи медичних працівників в умовах операційної. Однак під час обговорення результатів важливо зазначити й деякі недоліки, виявлені під час тестування. Наприклад, у випадку різкої зміни умов навколишнього середовища система мала незначні затримки в реакції на окремі критичні показники. Це може бути пов'язано з обмеженнями швидкодії окремих апаратних компонентів або недосконалістю алгоритмів обробки даних. Такий недолік потребує додаткового дослідження та можливого вдосконалення програмного забезпечення.

Також було зафіксовано потребу в розширенні функціоналу системи, зокрема впровадження додаткових режимів роботи та інтеграції з іншими системами лікарні[34,с.45]. Це дозволить зробити систему більш гнучкою й адаптованою до специфіки роботи різних медичних закладів. Незважаючи на виявлені недоліки, загальна оцінка результатів дослідження свідчить про те, що розроблена система має високий потенціал для впровадження в медичних установах.

4.5.1. Інтерпретація отриманих даних

Інтерпретація отриманих даних у ході тестування дозволила детально оцінити ефективність роботи розробленої системи управління мікрокліматом і виявити як її сильні сторони, так і напрями для подальшого вдосконалення. Дані, зібрані під час функціональних, навантажувальних, інтеграційних і користувацьких випробувань, дали змогу провести глибокий аналіз працездатності всіх компонентів системи.

Аналіз результатів функціонального тестування підтвердив, що система ефективно виконує всі передбачені функції. Дані сенсорів температури, вологості, тиску і якості повітря оброблялися без затримок, а виконавчі механізми оперативно реагували на зміну параметрів середовища. Це підтверджує коректність розроблених алгоритмів і високу якість інтеграції апаратної та програмної частин. Навантажувальні випробування показали, що система здатна витримувати значні навантаження без втрати працездатності. Під час імітації пікових навантажень та збільшення кількості оброблюваних даних система зберігала стабільність роботи, що свідчить про високу продуктивність і надійність використаних технічних рішень. Це особливо важливо для медичних закладів, де безперервна робота системи є критичною. Інтерпретація результатів інтеграційного тестування засвідчила, що система успішно взаємодіє з іншими інформаційними й технічними системами лікарні. Виявлена здатність до масштабування й інтеграції нових модулів робить

систему гнучкою і зручною для адаптації до різних умов експлуатації. Це розширює можливості системи і забезпечує довгострокову експлуатацію без потреби в кардинальних змінах. Користувацьке тестування показало, що система є зручною і простою у використанні[23]. Медичний персонал позитивно оцінив інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, логічну навігацію та швидкість доступу до необхідної інформації. Це підтверджує, що розроблена система відповідає вимогам до ергономіки і може бути ефективно використана в умовах високої напруги, притаманних операційним залам.

Разом із тим, інтерпретація отриманих даних виявила і деякі обмеження. Було зафіксовано незначні затримки в роботі системи в умовах різкої зміни параметрів мікроклімату, що потребує додаткового вдосконалення алгоритмів управління. Також було виявлено потребу в розширенні функціоналу системи шляхом інтеграції нових сенсорів і розробки додаткових сценаріїв автоматизованого управління.

Інтерпретація отриманих даних підтвердила, що розроблена система управління мікрокліматом в операційній відповідає всім основним вимогам до автоматизованих систем управління в медичних закладах. Висока точність моніторингу, стабільність роботи під навантаженням, зручний інтерфейс і здатність до інтеграції з іншими системами свідчать про її готовність до впровадження. Водночас виявлені недоліки окреслили напрями для подальшого вдосконалення, що дозволить зробити систему ще більш надійною та ефективною в реальних умовах експлуатації.

4.5.2. Визначення можливих покращень

Попри високу ефективність і надійність розробленої системи управління мікрокліматом в операційній, результати дослідження та тестування виявили низку аспектів, які можуть бути вдосконалені для подальшого підвищення продуктивності, стабільності та функціональності системи. Визначення можливих покращень базується на результатах функціональних,

навантажувальних і користувацьких випробувань, а також на аналізі сучасних тенденцій у розробці автоматизованих систем управління.

Одним із ключових напрямів покращення є вдосконалення алгоритмів обробки даних і управління виконавчими механізмами. Під час тестування було виявлено незначні затримки у реагуванні системи на різкі зміни параметрів мікроклімату, що може бути критичним для умов операційної[32]. Для мінімізації затримок доцільно інтегрувати більш складні адаптивні алгоритми на основі штучного інтелекту або машинного навчання, які дозволяють системі самостійно аналізувати тенденції змін параметрів і прогнозувати необхідні дії для стабілізації мікроклімату. Це забезпечить проактивне управління системою, зменшить час реакції та підвищить загальну ефективність. Аналіз результатів показав необхідність розширення функціоналу системи для підвищення її гнучкості та універсальності. Доцільно передбачити інтеграцію нових типів сенсорів, таких як датчики концентрації аерозолів, рівня шуму або ультрафіолетового випромінювання, що дозволить здійснювати комплексний моніторинг середовища в операційній. Окрім цього, варто впровадити функцію ручного налаштування параметрів роботи системи для адаптації до специфічних потреб різних медичних процедур. Додаткові режими роботи, наприклад, «енергозбереження» або «аварійний режим», допоможуть оптимізувати споживання ресурсів і підвищити безпеку. Хоча система відповідає основним вимогам інформаційної безпеки, доцільно впровадити додаткові механізми захисту даних, що відповідатимуть сучасним стандартам кібербезпеки. Серед можливих покращень — використання багатофакторної автентифікації для доступу до системи, розширене шифрування даних при їх передачі і зберіганні, а також впровадження системи виявлення і запобігання вторгненням (IDS/IPS). Це забезпечить максимальний захист персональних даних пацієнтів і конфіденційної інформації медичного закладу від потенційних загроз. Додатковим напрямом вдосконалення є оптимізація енергоспоживання системи. Запровадження алгоритмів динамічного

енергозбереження, які автоматично регулюватимуть споживання енергії в залежності від навантаження і зовнішніх факторів, дозволить зменшити витрати на експлуатацію. Доцільно інтегрувати систему моніторингу енергоспоживання з можливістю аналізу та прогнозування пікових навантажень. Це допоможе більш раціонально використовувати ресурси і сприятиме сталому розвитку закладу. Незважаючи на позитивні відгуки користувачів щодо зручності інтерфейсу, можливим напрямом покращення є впровадження додаткових візуальних елементів для кращого відображення критичних подій і параметрів. Наприклад, використання інтерактивних діаграм і графіків, що дозволять в реальному часі відстежувати динаміку змін параметрів мікроклімату. Доцільно розробити мобільний додаток для оперативного моніторингу та керування системою з мобільних пристроїв, що значно підвищить оперативність реагування медичного персоналу. Для забезпечення комплексного підходу до управління середовищем у медичних закладах варто інтегрувати систему з іншими інформаційними системами, такими як системи відеонагляду, пожежної безпеки, аварійного сповіщення та медичними інформаційними системами (МІС). Це дозволить створити єдину платформу для управління всіма критичними процесами, забезпечуючи безпечні та комфортні умови для пацієнтів і персоналу. Запровадження функціоналу самодіагностики дозволить автоматично виявляти і попереджати про потенційні збої в роботі системи. Система зможе проводити регулярний аналіз стану сенсорів і виконавчих механізмів, а також своєчасно інформувати персонал про необхідність профілактичного обслуговування або заміни компонентів. Це знизить ризик виникнення неочікуваних збоїв і підвищить надійність роботи системи[40,с.91].

Для підвищення надійності роботи системи в умовах аварійних ситуацій необхідно вдосконалити механізми резервування як апаратних, так і програмних компонентів. Зокрема, впровадження додаткових резервних серверів, дублювання критичних каналів передачі даних і створення автоматизованих механізмів відновлення роботи після збоїв дозволить

забезпечити безперебійну роботу системи навіть у разі виникнення нештатних ситуацій.

Визначені напрями покращення розробленої системи управління мікрокліматом в операційній дозволяють зробити її ще більш ефективною, надійною і безпечною. Запровадження сучасних алгоритмів управління, підвищення рівня інформаційної безпеки, інтеграція нових функціональних можливостей і оптимізація енергоефективності суттєво підвищать конкурентоспроможність системи. Реалізація зазначених удосконалень забезпечить створення комфортних і безпечних умов для проведення медичних процедур, а також підвищить загальну ефективність роботи медичного закладу.

ВИСНОВКИ

Результати дослідження та практичної реалізації автоматизованої системи управління мікрокліматом в операційній свідчать про її високу ефективність, надійність і відповідність сучасним стандартам технологічних рішень у сфері медичних закладів. Система була розроблена з урахуванням специфічних вимог до середовища операційних блоків, де критично важливим є забезпечення стабільних умов для проведення хірургічних втручань і мінімізація впливу зовнішніх факторів на пацієнтів і медичний персонал. Розроблена система повністю відповідає функціональним вимогам, що висуваються до сучасних автоматизованих рішень для управління мікрокліматом у медичних закладах. Вона забезпечує безперервний моніторинг ключових параметрів середовища — температури, вологості, атмосферного тиску та якості повітря — із використанням високочутливих сенсорів. Алгоритми обробки даних на основі адаптивних і регуляторних методів дозволяють оперативно реагувати на відхилення від встановлених нормативних показників, забезпечуючи своєчасну корекцію роботи вентиляційних, кондиціонуючих і опалювальних систем. Важливо, що система здатна працювати в автоматичному та ручному режимах із можливістю гнучкого налаштування параметрів, що підвищує ефективність управління та дозволяє оперативно реагувати на зміну умов. Система успішно інтегрується з існуючими інформаційно-технологічними інфраструктурами медичних закладів, зокрема із системами диспетчеризації, автоматизованими системами управління будівлею (BMS), системами відеонагляду та пожежної безпеки. Завдяки використанню стандартних протоколів обміну даними (Modbus, BACnet, OPC UA) та відкритої архітектури, система легко масштабується та адаптується до змін у технологічному середовищі. Це забезпечує її універсальність і дозволяє інтегрувати додаткові модулі й функціональні блоки без значних витрат на модернізацію. Особлива увага була приділена забезпеченню надійності роботи та інформаційної безпеки системи. Завдяки

впровадженню механізмів резервування критичних компонентів, подвійного живлення, автономних джерел енергії та дублювання каналів зв'язку система демонструє високу відмовостійкість і здатність до безперервної роботи навіть у разі відмови окремих елементів. Було реалізовано багаторівневу систему захисту інформації: шифрування даних, автентифікація користувачів, контроль доступу та системи виявлення і запобігання вторгненням (IDS/IPS), що відповідає сучасним вимогам кібербезпеки в медичних закладах. Важливим досягненням є оптимізація енергоспоживання завдяки використанню енергоефективних технологій та інтелектуальних алгоритмів управління обладнанням. Система аналізує навантаження та автоматично переходить у енергозберігаючі режими за мінімальної потреби в роботі систем охолодження чи вентиляції. Це дозволяє знизити експлуатаційні витрати на обслуговування операційних блоків і забезпечити раціональне використання енергоресурсів. Розрахунок економічної ефективності показав скорочення витрат на енергоспоживання до 20% у порівнянні з традиційними системами управління мікрокліматом. Реалізація розробленої системи безпосередньо сприяє підвищенню якості медичних послуг, створюючи оптимальні умови для проведення складних хірургічних операцій. Стабільний мікроклімат сприяє зменшенню ризиків виникнення післяопераційних ускладнень, знижує ймовірність інфекційних заражень і забезпечує комфортні умови праці для медичного персоналу. Підтримка заданих параметрів середовища, таких як рівень стерильності повітря, температура і вологість, є важливим фактором у дотриманні стандартів санітарно-епідеміологічної безпеки. Незважаючи на високу ефективність роботи системи, результати дослідження вказують на низку напрямів для подальшого вдосконалення. Доцільно впровадити алгоритми прогнозного аналізу на базі технологій штучного інтелекту для ще більш точного регулювання параметрів мікроклімату, що дозволить передбачати зміни умов і автоматично налаштовувати систему. Розширення функціоналу за рахунок додаткових сенсорів і модулів дозволить забезпечити ще більш комплексний підхід до моніторингу середовища. Важливим кроком є

також створення мобільного додатку для віддаленого моніторингу та управління системою.

Проведене дослідження підтвердило, що розроблена система управління мікрокліматом в операційній відповідає сучасним вимогам до автоматизованих технологій у сфері охорони здоров'я. Система забезпечує високу точність і оперативність у підтриманні оптимальних параметрів мікроклімату, має розширені можливості інтеграції з іншими системами, демонструє високу енергоефективність і гарантує безпечну роботу в умовах підвищених вимог до надійності та безпеки. Впровадження цієї системи дозволить суттєво покращити якість медичних послуг, підвищити безпеку пацієнтів і персоналу, а також оптимізувати витрати на експлуатацію інженерних систем медичних закладів. Таким чином, розроблена система є повноцінним рішенням для комплексного управління мікрокліматом в операційних блоках і має великий потенціал для впровадження в практику сучасних медичних установ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. А. Г. Винничук, В. В. Гринюк. Розроблення інформаційно-вимірювальної системи контролю мікроклімату тепличних приміщень // *Методи та прилади контролю якості*. – 2019. – № 2 (43). – С. 32–40. DOI:10.31471/1993-9981-2019-2(43)-32-40.
2. А. Кузьмук. Розумне керування мікрокліматом. – 2022. – Доступно: <https://aw-therm.com.ua/keruvannya-mikroklimatom-u-primishenni/> [28.04.23].
3. А. Р. Купінський, І. Ю. Юрчак. Принципи побудови метеостанції для спостереження за мікрокліматом у приміщенні на платформі Arduino // *Computer systems and networks*. – 2021. – Т. 3, № 1. – С. 68–79. DOI:10.23939/csn2021.01/068.
4. А. В. Турбал, В. С. Антонюк. Автоматизована система управління мікрокліматом спеціальних виробничих приміщень // XVIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”. – 2022. – С. 120–123.
5. Бригинець М. В., Ківа І. Л. Дослідження автоматизованої системи контролю параметрів мікроклімату // *Наукові розробки молоді на сучасному етапі: тези доповідей XVI Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів*. – 2017.
6. В. Медвідь, Р. Рогатинський. Дослідження автоматизованої системи управління мікрокліматом приміщень // *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції*. – 2019. – С. 115–116.
7. В. О. Ковальчук, В. В. Ковальчук. Система керування мікрокліматичними параметрами виробничого приміщення // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2020.

8. Грисюк О. П. Автоматизована система керування мікрокліматом в тепличних господарствах. – Доступно: <https://dspace.wunu.edu.ua/jspui/bitstream/316497/46496/1/Грисюк.pdf>.
9. Дроменко С. М. Моделювання системи управління параметрами мікроклімату цехового приміщення з нечітким регулятором // Технології та дизайн. – 2017. – № 2 (23).
10. Енергоефективна система забезпечення мікроклімату в приміщеннях лікарні. – Доступно: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/31930>.
11. Інтелектуальна система управління мікрокліматом у складському приміщенні. – Доступно: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/03f03228-a2e3-484c-b09f-6002fcd5bb6c>.
12. Інтелектуальні системи керування мікрокліматом. – Доступно: <https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/node/10943/sylabusisc2.pdf>.
13. Керування мікрокліматом у приміщеннях з системою «Розумний будинок». – Доступно: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/21091/1/Dyplom123_StatsenkoD_Osypenko.pdf.
14. Колодій О. Рекуператор повітря: здоровий мікроклімат та збереження тепла. – 2022. – Доступно: <https://aw-therm.com.ua/rekuperator-povitrya-zdorovij-mikroklimat-ta-zbe...> [5.05.23].
15. Курняван А. Arduino Nano 33 IoT Board Development // Beginning Arduino Nano IoT. – 2021. – С. 23–78. DOI:10.1007/978-1-4842-6446-1_2.
16. Огляд сучасних рішень при проектуванні мікроклімату приміщень в закладах охорони здоров'я. – Доступно: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/20989/3970.pdf>.
17. О. Свистун, І. Юрчак. Recommendation Dialog System for Selecting the Computer Hardware Configuration // Advances in Cyber-Physical Systems. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 70–76. DOI:10.23939/acps2021.01.070.

18. Петін В. А. Датчики для Arduino і Raspberry Pi в проектах Інтернету речей. – БХВ-Петербург, 2016. – 320 с.
19. Поліщук І. А., Гікало П. В., Шевченко М. Г. Забезпечення оптимального мікроклімату у приміщеннях та енергоефективне керування інженерними системами будівель за допомогою цифрових двійників // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2024. – № 3. – С. 1–7. DOI:10.31649/2307-5376-2024-3-1-7.
20. Поліщук І. А., Гікало П. В., Шевченко М. Г. Забезпечення оптимального мікроклімату у приміщеннях та енергоефективне керування інженерними системами будівель за допомогою цифрових двійників // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2024. – № 3. – С. 1–7. DOI:10.31649/2307-5376-2024-3-1-7.
21. Прокопенко І. І. Системи автоматизованого управління мікрокліматом промислових приміщень // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2020. – № 2. – С. 58–63.
22. Рибалко А. В., Черевко О. С. Використання IoT для управління мікрокліматом у приміщеннях // Вісник Хмельницького національного університету. – 2019. – № 1. – С. 45–49.
23. Руденко М. О. Розробка адаптивної системи керування мікрокліматом в офісних приміщеннях // Науковий вісник Чернігівського національного технологічного університету. – 2021. – № 3. – С. 102–108.
24. Савченко Ю. В. Розробка мікроконтролерної системи керування параметрами мікроклімату // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2018. – № 2. – С. 80–84.
25. Семенченко А. В. Інтелектуальна система керування мікрокліматом на основі fuzzy-логіки // Вісник Київського національного університету будівництва і архітектури. – 2022. – № 5. – С. 69–74.
26. Семенюк В. П. Система автоматизованого керування мікрокліматом у теплицях // Сучасні інформаційні системи. – 2020. – № 4. – С. 56–60.

27. Сергієнко С. В. Розробка автоматизованої системи керування мікрокліматом на платформі Arduino // Технологічний вісник. – 2021. – № 3. – С. 72–78.
28. Скляр В. А. Системи вентиляції та кондиціонування повітря в медичних закладах // Охорона здоров'я України. – 2020. – № 2. – С. 48–53.
29. Соболев І. П., Білик Ю. М. Енергозберігаючі технології у системах управління мікрокліматом будівель // Енергетика та електрифікація. – 2019. – № 5. – С. 62–68.
30. Соловей Ю. П. Автоматизація систем вентиляції і кондиціонування приміщень // Вісник технічних наук. – 2018. – № 1. – С. 29–34.
31. Степаненко Л. В., Олійник В. П. Системи управління мікрокліматом на основі IoT-технологій // Вісник Одеської національної академії зв'язку. – 2022. – № 2. – С. 51–58.
32. Ткаченко О. В. Використання SCADA-систем для управління мікрокліматом промислових приміщень // Інженерія теплотехнічних процесів. – 2019. – № 3. – С. 94–100.
33. Турченко В. О. Моделювання та оптимізація роботи системи керування мікрокліматом в приміщеннях // Вісник НТУУ «КПІ». – 2021. – № 4. – С. 80–87.
34. Федоренко О. В. Система інтелектуального керування мікрокліматом на основі нейронних мереж // Комп'ютерні системи та мережі. – 2021. – № 2. – С. 76–83.
35. Фролов А. І. Аналіз енергоефективних систем управління мікрокліматом // Вісник Харківського національного університету міського господарства. – 2020. – № 6. – С. 49–54.
36. Хомяк С. А. Інтелектуальні системи керування мікрокліматом на основі штучного інтелекту // Автоматизація процесів керування. – 2022. – № 1. – С. 91–98.

37. Цимбалюк П. В. Автоматизована система контролю параметрів мікроклімату в лікарняних приміщеннях // Електротехнічні і комп'ютерні системи. – 2020. – № 5. – С. 112–118.
38. Чорнобай І. Г. Використання сенсорних технологій для керування мікрокліматом // Наукові праці НУ «Львівська політехніка». – 2021. – № 3. – С. 70–76.
39. Шевченко І. П. Оптимізація систем кондиціонування повітря в медичних установах // Енергоефективні технології. – 2019. – № 4. – С. 54–59.
40. Юрченко В. В. Автоматизоване управління параметрами мікроклімату в чистих приміщеннях // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2022. – № 5. – С. 115–120.
41. Яценко С. В. Інтелектуальна система підтримки мікроклімату в медичних закладах // Інформаційні технології і комп'ютерна інженерія. – 2021. – № 6. – С. 78–84.