

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра електронних систем

ТЕРЕЩЕНКО АРТЕМ ВАЛЕРІЙОВИЧ

**СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ
МІКРОКЛІМАТУ «ЧИСТИХ» ПРИМІЩЕНЬ**

Спеціальність 171 Електроніка
Освітня програма Електронні системи

Кваліфікаційна робота
на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Науковий керівник:
Спесивих О. О.
канд. фіз.-мат наук,
доцент кафедри ЕС

Реєстрація _____
(номер)

« _____ » _____ 2026 р. _____
(підпис)

Кваліфікаційна робота допущена до захисту

Завідувач кафедри

_____ Тарас ЗАЯЦЬ
(підпис)

к.ф.-м.н., доцент

« _____ » _____ 2026 р.

Рецензент


(підпис)

_____ Віталій БІЛАНІЧ _____
(Ім'я, Прізвище)

_____ к.ф.-м.н., доц. _____
(науковий ступінь, вчене звання)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
Інженерно-технічний факультет
Кафедра електронних систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою,

доц. _____ (Заяць Т. М.)

“ ____ ” _____ 2026 року

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

На кваліфікаційну роботу бакалавра

на тему:

**СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ
МІКРОКЛІМАТУ «ЧИСТИХ» ПРИМІЩЕНЬ**

Студента групи ЕС: Артема ТЕРЕЩЕНКА ()

Керівник: к.ф.-м.н., кафедри ЕС
Олександр СПЕСИВИХ ()

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою,

доц. _____ (Заяць Т. М.)

“___” _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну бакалаврську роботу
студенту Терещенку Артему Валерійовичу

1. Тема роботи: Система моніторингу та регулювання мікроклімату «чистих» приміщень.
Затверджена на засіданні кафедри (протокол №__ від _____ 2025 р.)
2. Термін закінчення роботи: _____ 2026 року.
3. Вихідні дані до роботи

Створити систему моніторингу та регулювання мікроклімату чистих приміщень на базі мікроконтролера ATmega328P.

Забезпечити такі характеристики системи:

1. Контроль температури повітря в діапазоні від 0 °С до +50 °С.
2. Контроль відносної вологості повітря в діапазоні від 0 % до 100 %.
3. Контроль атмосферного тиску в діапазоні від 300 до 1100 гПа.
4. Контроль якості повітря за концентрацією газоподібних забруднювачів (CO₂, NH₃, NO_x, бензол, дим та інші леткі сполуки) за допомогою датчика MQ-135.
5. Автоматичне керування системами вентиляції, кондиціонування, опалення та зволоження повітря.
6. Відображення параметрів мікроклімату на LCD-дисплеї.
7. Передача даних мережею Ethernet.
8. Формування світлової та звукової сигналізації при аварійних ситуаціях.

Зміст роботи (перелік питань, що підлягають розробці)

ВСТУП

1. Теоретичні основи організації мікроклімату чистих приміщень
2. Інформаційні технології у моніторингу та регулюванні мікроклімату
3. Проектування системи моніторингу та регулювання мікроклімату

4. Практична реалізація та тестування системи

5. Розрахунок основних блоків пристрою

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль			

Дата видачі завдання _____ 2025 року.

Керівник роботи _____ (доц. Спесивих О.О.)
(підпис)

Завдання прийняв на виконання _____ (Терещенко А.В.)
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування етапів виконання КБР	Термін виконання етапів	Примітки
1.	Пошук та аналіз аналогів об'єкта досліджень.	до 20.12.2025 року	
2.	Огляд та аналіз аналогів.	до 20.02.2026 року	
3.	Вибір технічного рішення та обґрунтування технічної пропозиції.	до 20.03.2026 року	
4.	Синтез структурної та принципової схем, їх розрахунок.	до 20.04.2026 року	
5.	Виготовлення конструкторської документації.	до 20.05.2026 року	
6.	Оформлення кваліфікаційної бакалаврської роботи.	до 10.06.2026 року	
7.	Захист на державній екзаменаційній комісії.	Згідно з графіком захисту	

Студент _____ (Терещенко А.В.)
(підпис)

Керівник роботи _____ (доц. Спесивих О.О.)
(підпис)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна бакалаврська робота на тему «Система моніторингу та регулювання мікроклімату «чистих» приміщень»// УжНУ; Керівник Спесивих О.О.; Студент Терещенко А.В., група ЕС.

Пояснювальна записка: 54 сторінок, 2 рисунка, 17 таблиць, 25 джерел, 4 додатки.

Графічна частина: структурна схема системи, принципова електрична схема, блок-схема алгоритму роботи системи.

Об'єкт розробки – система моніторингу та регулювання параметрів мікроклімату чистих приміщень.

Предмет дослідження – методи автоматизованого контролю температури, вологості, тиску та якості повітря в чистих приміщеннях із використанням мікроконтролерних засобів.

Метод дослідження – аналіз нормативних вимог до чистих приміщень, аналіз існуючих систем моніторингу мікроклімату, вибір елементної бази, проєктування структурної та принципової схем, моделювання роботи системи в середовищі Proteus та проведення інженерних розрахунків.

У процесі виконання роботи розглянуто особливості організації мікроклімату чистих приміщень відповідно до вимог стандартів ISO 14644 та GMP. Проведено аналіз сучасних засобів автоматизації та обрано елементну базу системи, до складу якої входять мікроконтролер ATmega328P, датчики DHT22, BMP280, MQ-135, модуль Ethernet ENC28J60, LCD-дисплей та виконавчі пристрої системи HVAC.

Розроблено структурну та принципову схеми системи, алгоритм автоматичного контролю параметрів мікроклімату, виконано моделювання роботи системи в середовищі Proteus та проведено розрахунок основних блоків пристрою. Результати моделювання та розрахунків підтвердили працездатність системи та можливість автоматичного підтримання параметрів мікроклімату в установлених межах.

Ключові слова: **ЧИСТІ ПРИМІЩЕННЯ, МІКРОКЛІМАТ, АТМЕГА328Р, DHT22, BMP280, MQ-135, HVAC, МОНІТОРИНГ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, PROTEUS, ETHERNET, РЕГУЛЮВАННЯ.**

ABSTRACT

Bachelor Qualification Work on the topic: “**Monitoring and Control System for the Microclimate of Clean Rooms**” // Uzhhorod National University; Supervisor: Spesivkykh O.O.; Student: Tereschchenko A.V.; Group: ES.

Explanatory Note: 54 pages, 2 figures, 17 tables, 25 sources, 4 appendices.

Graphical Part: structural diagram, schematic diagram, and flowchart of the system operation algorithm.

Object of the study – development of a monitoring and control system for the microclimate parameters of clean rooms.

Research Method – analysis of regulatory requirements for clean rooms, review of existing microclimate monitoring systems, selection of hardware components, design of structural and schematic diagrams, simulation of the system operation in Proteus, and engineering calculations.

In the course of this work, the requirements for maintaining the microclimate of clean rooms according to ISO 14644 and GMP standards were analyzed. Existing solutions for monitoring temperature, humidity, pressure, and air quality were reviewed. Based on the obtained results and technical requirements, the structural and schematic diagrams of the system were developed.

The designed system is based on the ATmega328P microcontroller and includes DHT22 temperature and humidity sensor, BMP280 pressure sensor, MQ-135 air quality sensor, ENC28J60 Ethernet controller, LCD display, alarm indicators, and HVAC control devices. The system provides automatic monitoring and regulation of environmental parameters in real time.

The practical part of the work includes simulation of the developed system in Proteus, verification of the control algorithms, and calculation of the main functional blocks of the device. The simulation results confirmed the operability of the system and the possibility of maintaining the required microclimate parameters within the specified limits.

Keywords: CLEAN ROOMS, MICROCLIMATE, ATMEGA328P, DHT22, BMP280, MQ-135, HVAC, MONITORING, AUTOMATION, PROTEUS, ETHERNET, CONTROL.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОРГАНІЗАЦІЇ МІКРОКЛІМАТУ ЧИСТИХ ПРИМІЩЕНЬ	10
1.1 Поняття «чисті приміщення» та їх класифікація.....	10
1.2 Основні параметри мікроклімату чистих приміщень	11
1.3 Нормативні документи та стандарти (ISO 14644, GMP)	13
1.4 Традиційні системи вентиляції та кондиціонування.....	15
РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У МОНІТОРИНГУ ТА РЕГУЛЮВАННІ МІКРОКЛІМАТУ	18
2.1 Використання сенсорів для збору даних	18
2.2 Промислові контролери та системи автоматизації HVAC	20
2.3 Інтеграція з промисловими мережами (Ethernet, Modbus)	22
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ	25
3.1 Опис технічного завдання	25
3.2 Вибір обладнання та програмного забезпечення.....	26
3.3 Архітектура системи.....	30
3.4 Алгоритми регулювання параметрів мікроклімату.....	35
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ.....	37
4.1 Встановлення сенсорів та налаштування обладнання	37
4.2 Приклади роботи системи у різних режимах.....	38
4.3 Аналіз результатів тестування.....	40
4.4 Оцінка відповідності стандартам ISO/GMP	42
РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ БЛОКІВ ПРИСТРОЮ	44
5.1 Розрахунок джерела живлення системи	44
5.2 Розрахунок вузла живлення та розподілу напруги.....	45
5.3 Розрахунок кварцового генератора АТmega328P.....	47
5.4 Розрахунок резистора світлодіодної індикації.....	49
5.5 Розрахунок оптосімисторного вузла керування МОС3021 та ВТА16	50
ВИСНОВКИ	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

Перелік додатків:

- Додаток А Схема електрична структурна КРБ.ЕС.10314325.001. Е1
- Додаток Б Схема електрична принципова КРБ.ЕС.10314325.001. Е3
- Додаток В Перелік елементів КРБ.ЕС.10314325.001. ПЕ
- Додаток Г Специфікація КРБ.ЕС.10314325.001. СП

КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ					
Вимю	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	
Розробив		Герещенко А.В			
Перевірив		Спесивих О.О.			
Н.Контр.					
Затв.					
Система моніторингу та регулювання мікроклімату «чистих» приміщень			Літера	Аркуш	Аркушів
			Н	8	54
			УжНУ, ІТФ, гр.ЕС, 4-курс		

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку фармацевтичної промисловості, медицини, біотехнологій та виробництва електронних компонентів особливого значення набуває забезпечення стабільних параметрів мікроклімату у чистих приміщеннях [1, 3]. Чисті приміщення являють собою спеціально організовані технологічні зони, в яких підтримуються контрольовані параметри температури, вологості, тиску та чистоти повітря відповідно до міжнародних стандартів ISO 14644 та GMP [1, 3].

Підтримання необхідних параметрів мікроклімату здійснюється за допомогою систем HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), які забезпечують опалення, вентиляцію та кондиціонування повітря [4–6]. У сучасних чистих приміщеннях системи HVAC є основним засобом створення необхідних умов для технологічних процесів та забезпечення безпеки продукції [4].

Для більшості чистих приміщень характерними є такі параметри мікроклімату [1, 3]:

- температура повітря від +20 °С до +24 °С;
- відносна вологість 45–60 %;
- надлишковий тиск 10–20 Па відносно суміжних приміщень;
- контроль концентрації забруднюючих частинок та шкідливих домішок у повітрі.

Відхилення зазначених параметрів може призвести до порушення технологічних процесів, зниження якості продукції, появи конденсату, накопичення статичної електрики або потрапляння забрудненого повітря до контрольованої зони [3, 4].

Актуальність теми обумовлена необхідністю створення доступних автоматизованих систем моніторингу та регулювання мікроклімату, здатних у реальному часі контролювати стан повітряного середовища та автоматично керувати виконавчими пристроями систем HVAC [20].

У даній роботі розробляється система моніторингу та регулювання мікроклімату чистого приміщення на базі мікроконтролера ATmega328P [7]. Для контролю параметрів середовища використовуються датчики температури та вологості DHT22 [8], атмосферного тиску BMP280 [9] та якості повітря MQ-135 [10]. Візуалізація інформації здійснюється за допомогою LCD-дисплея, а передача даних мережею Ethernet реалізована на базі контролера ENC28J60 [11].

Для підтримання нормативних параметрів мікроклімату система автоматично керує виконавчими пристроями: вентилятором системи вентиляції, нагрівачем повітря та зволожувачем. У разі виходу параметрів за допустимі межі активується світлова та звукова сигналізація.

Проектування принципової схеми та дослідження роботи системи виконано в середовищі моделювання Proteus [16], що дозволило перевірити працездатність алгоритмів керування без виготовлення фізичного макета пристрою.

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОРГАНІЗАЦІЇ МІКРОКЛІМАТУ ЧИСТИХ ПРИМІЩЕНЬ

1.1 Поняття «чисті приміщення» та їх класифікація

Чисті приміщення (Clean Rooms) являють собою спеціально організовані виробничі або лабораторні зони, у яких здійснюється контроль концентрації аерозольних частинок, мікроорганізмів, температури, вологості та перепаду тиску відповідно до встановлених нормативних вимог.

Основною метою створення чистих приміщень є забезпечення стабільних умов технологічного процесу та мінімізація ризику забруднення продукції. Такі приміщення широко використовуються у фармацевтичній промисловості, медицині, мікроелектроніці, біотехнологіях, харчовій промисловості та науково-дослідних лабораторіях.

На відміну від звичайних виробничих приміщень, у чистих приміщеннях постійно підтримуються контрольовані параметри повітряного середовища. Для цього використовуються спеціалізовані системи HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), які забезпечують:

- вентиляцію повітря;
- очищення повітря через HEPA та ULPA-фільтри;
- підтримання температури;
- підтримання відносної вологості;
- створення необхідного перепаду тиску між зонами приміщення.

Класифікація чистих приміщень здійснюється відповідно до міжнародного стандарту ISO 14644-1 [1]. Клас чистоти визначається максимально допустимою кількістю механічних частинок певного розміру в одному кубічному метрі повітря.

Таблиця 1.1 – Класифікація чистих приміщень за стандартом ISO 14644-1

Клас ISO	Максимальна кількість частинок з лінійними розмірами $\geq 0,5$ мкм, част./м ³	Типове застосування
ISO 1	10	Виробництво мікропроцесорів
ISO 3	1 000	Нанотехнології
ISO 5	3 520	Фармацевтичне виробництво
ISO 6	35 200	Медичні лабораторії
ISO 7	352 000	Складання електроніки
ISO 8	3 520 000	Допоміжні чисті зони
ISO 9	35 200 000	Звичайні контрольовані

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Для фармацевтичної галузі додатково застосовується класифікація GMP (Good Manufacturing Practice), яка поділяє чисті приміщення на класи А, В, С та D залежно від вимог до стерильності виробничого процесу [3].

У чистих приміщеннях особливо важливим є підтримання надлишкового тиску відносно суміжних зон. Завдяки цьому під час відкривання дверей повітря рухається з чистої зони назовні, що запобігає проникненню пилу та інших забруднень.

Таким чином, чисті приміщення є складними інженерними об'єктами, ефективне функціонування яких неможливе без застосування автоматизованих систем моніторингу та регулювання параметрів мікроклімату.

1.2 Основні параметри мікроклімату чистих приміщень

Однією з основних вимог до чистих приміщень є забезпечення стабільних параметрів мікроклімату. Відхилення температури, вологості, тиску або якості повітря від нормативних значень може призвести до порушення технологічних процесів, погіршення якості продукції та зниження ефективності роботи обладнання [1].

Підтримання необхідних параметрів здійснюється за допомогою систем HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), які забезпечують функції опалення, вентиляції, кондиціонування та очищення повітря [2].

До основних параметрів мікроклімату чистих приміщень належать температура повітря, відносна вологість, перепад тиску та якість повітря.

Температура повітря

Температурний режим чистих приміщень визначається вимогами технологічного процесу. Для більшості фармацевтичних, медичних та лабораторних чистих приміщень температура підтримується в межах +20...+24 °С, однак для окремих виробництв можуть встановлюватися інші значення відповідно до нормативної документації та особливостей технології.

Підтримання температурного режиму здійснюється системою HVAC за допомогою нагрівальних та охолоджувальних елементів. При підвищенні температури зовнішнього повітря, наприклад до +35 °С, система кондиціонування охолоджує припливне повітря до необхідного рівня перед подачею його в приміщення. У випадку зниження температури нижче встановленого значення система автоматично вмикає нагрівач повітря [2].

У розробленій системі контроль температури здійснюється за допомогою датчика DHT22 (характеристики альтернативних датчиків наведено в табл. 3.3), а рішення щодо активації нагрівача або кондиціонера приймається мікроконтролером ATmega328P.

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Відносна вологість повітря

Вологість повітря впливає на комфорт персоналу, накопичення статичної електрики та стабільність технологічних процесів. Значення відносної вологості визначаються особливостями технологічного процесу. Для більшості чистих приміщень вологість підтримується в межах 45–60 %, однак у виробництві електроніки, фармацевтиці та біотехнологіях можуть застосовуватися інші нормативні значення.[3]

При недостатній вологості збільшується ризик виникнення електростатичних розрядів, що особливо небезпечно під час виробництва електронних компонентів. При надмірній вологості виникає ризик утворення конденсату та розвитку мікроорганізмів.

Для підтримання необхідної вологості використовуються системи зволоження повітря. Якщо вологість знижується нижче встановленого рівня, система автоматично активує зволожувач. У разі перевищення допустимого значення вологості вмикається вентиляція або кондиціонування повітря [2].

Для вимірювання відносної вологості обрано датчик DHT22. Вибір даного датчика обумовлений широким діапазоном вимірювання (0–100 %), достатньою точністю (± 2 %), простотою підключення та підтримкою цифрового інтерфейсу. Порівняльний аналіз DHT22 з альтернативними датчиками наведено в табл. 3.3.

Перепад тиску

Для запобігання проникненню забрудненого повітря із суміжних приміщень у чистих приміщеннях підтримується надлишковий тиск. Залежно від класу чистоти перепад тиску між суміжними приміщеннями зазвичай становить від 10 до 20 Па [1, 4].

Надлишковий тиск створюється за рахунок роботи припливно-витяжної вентиляції. При відкриванні дверей повітря рухається з більш чистої зони до менш чистої, що зменшує ймовірність потрапляння забруднень усередину приміщення.

Для контролю атмосферного тиску обрано датчик BMP280, який забезпечує вимірювання в діапазоні 300–1100 гПа, має високу точність та підтримує інтерфейси SPI і I²C. Порівняльні характеристики датчика наведені в табл. 3.4.

Якість повітря

Якість повітря є одним із ключових показників ефективності роботи чистого приміщення. Вона характеризується концентрацією пилу, газоподібних домішок та інших забруднювачів [1].

Для контролю якості повітря обрано датчик MQ-135, оскільки він дозволяє виявляти широкий спектр газоподібних забруднювачів (CO₂, NH₃, NO_x, бензол, дим). Порівняння з альтернативними рішеннями наведено в табл. 3.5.

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

При перевищенні встановленого порога система автоматично вмикає вентиляцію, активує світлову та звукову сигналізацію та переводить систему у режим аварійного сповіщення.

Автоматичне регулювання параметрів мікроклімату

Запропонована система передбачає автоматичний контроль параметрів мікроклімату. Алгоритм роботи передбачає:

- увімкнення кондиціонера при температурі вище 24 °С;
- увімкнення нагрівача при температурі нижче 20 °С;
- увімкнення зволожувача при вологості нижче 45 %;
- увімкнення вентиляції при погіршенні якості повітря;
- формування аварійного повідомлення при виході будь-якого параметра за допустимі межі.

Таким чином, автоматизована система має забезпечувати підтримання необхідних параметрів мікроклімату відповідно до вимог чистих приміщень та підвищує надійність технологічних процесів.

1.3 Нормативні документи та стандарти (ISO 14644, GMP)

Проектування, експлуатація та контроль чистих приміщень здійснюються відповідно до міжнародних стандартів і нормативних документів, які регламентують вимоги до чистоти повітря, параметрів мікроклімату, систем вентиляції та методів контролю виробничого середовища.

Найбільш поширеними нормативними документами у сфері чистих приміщень є стандарти серії ISO 14644 та правила належної виробничої практики GMP (Good Manufacturing Practice) [1].

Стандарт ISO 14644

Серія міжнародних стандартів ISO 14644 визначає вимоги до класифікації, проектування, експлуатації та моніторингу чистих приміщень і контрольованих середовищ [1].

Основним документом є стандарт ISO 14644-1, який встановлює класи чистоти повітря залежно від концентрації механічних частинок певного розміру в одному кубічному метрі повітря.

Відповідно до ISO 14644-1 виділяють класи чистоти від ISO 1 до ISO 9. Чим менше числове значення класу, тим вищими є вимоги до чистоти повітря.

Крім класифікації чистоти повітря, стандарти серії ISO 14644 регламентують:

- методики вимірювання концентрації частинок;
- вимоги до систем вентиляції та фільтрації;

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

- процедури випробувань і валідації чистих приміщень;
- контроль температури та вологості;
- моніторинг параметрів повітряного середовища.[1]

Таблиця 1.2 – Типові параметри мікроклімату для чистих приміщень

Клас ISO	Температура, °C	Вологість, %	Перепад тиску, Па
ISO 5	20–24	45–60	15–20
ISO 6	20–24	45–60	10–15
ISO 7	20–25	40–60	10–15
ISO 8	18–25	40–60	5–10

Для підтримання необхідного рівня чистоти використовуються високоефективні фільтри HEPA та ULPA, а також спеціалізовані системи вентиляції та кондиціонування повітря [2].

Правила GMP

Належна виробнича практика (Good Manufacturing Practice, GMP) являє собою систему вимог до організації виробництва лікарських засобів, медичних виробів та іншої продукції, для якої критичним є контроль чистоти виробничого середовища [3].

Однією з основних вимог GMP є забезпечення стабільних параметрів мікроклімату та запобігання контамінації продукції.

Згідно з вимогами GMP у чистих приміщеннях повинні контролюватися:

- температура повітря;
- відносна вологість;
- перепад тиску між зонами;
- концентрація частинок;
- ефективність роботи систем вентиляції та кондиціонування.

Для більшості виробництв GMP рекомендованими є такі значення параметрів:

- температура 18–25 °C;
- відносна вологість 40–60 %;
- перепад тиску між зонами 10–15 Па;
- концентрація частинок відповідно до класу чистоти приміщення;
- безперервний контроль роботи систем HVAC.

Особлива увага приділяється безперервному моніторингу параметрів середовища та документуванню результатів вимірювань. У випадку відхилення

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

параметрів від встановлених значень система повинна своєчасно повідомляти персонал про виникнення аварійної ситуації [3].

Роль автоматизованих систем моніторингу

Сучасні вимоги ISO 14644 та GMP передбачають широке використання автоматизованих систем контролю параметрів мікроклімату. Такі системи забезпечують безперервне вимірювання температури, вологості, тиску та інших параметрів середовища, а також дозволяють оперативно реагувати на виникнення відхилень [4].

Таким чином, застосування автоматизованих систем моніторингу дозволяє забезпечити відповідність чистих приміщень вимогам міжнародних стандартів ISO 14644 та GMP і підвищити надійність технологічних процесів.

1.4 Традиційні системи вентиляції та кондиціонування

Підтримання необхідних параметрів мікроклімату в чистих приміщеннях забезпечується системами HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), які об'єднують функції опалення, вентиляції, кондиціонування та очищення повітря [1].

Основним завданням систем HVAC є забезпечення стабільних умов технологічного процесу та підтримання нормативних параметрів повітряного середовища відповідно до вимог ISO 14644 та GMP.

Системи вентиляції

Вентиляція є основним елементом будь-якого чистого приміщення. Її призначення полягає у подачі очищеного повітря та видаленні забрудненого повітря із приміщення.

У чистих приміщеннях застосовуються припливно-витяжні системи вентиляції, які забезпечують необхідну кратність повітрообміну. Залежно від класу чистоти кратність повітрообміну може становити від 10 до 60 циклів на годину [3].

Для очищення повітря використовуються вискоелективні фільтри HEPA (High Efficiency Particulate Air) та ULPA (Ultra Low Penetration Air), які затримують більшість механічних частинок, мікроорганізмів та інших забруднювачів [1].

Таблиця 1.3 – Характеристики фільтрів HEPA та ULPA

Тип фільтра	Ефективність
HEPA H13	99,95 % для частинок 0,3 мкм
HEPA H14	99,995 % для частинок 0,3 мкм
ULPA U15	99,9995 % для частинок 0,12 мкм
ULPA U16	99,99995 % для частинок 0,12 мкм

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Вентиляційна система також використовується для створення необхідного перепаду тиску між суміжними приміщеннями. Завдяки цьому забезпечується рух повітря з більш чистої зони до менш чистої, що знижує ризик потрапляння забруднень.

Системи кондиціонування

Кондиціонування повітря використовується для підтримання заданої температури та вологості у приміщенні.

У випадку підвищення температури зовнішнього повітря кондиціонер охолоджує припливне повітря до необхідного рівня перед його подачею до приміщення. Крім того, під час охолодження відбувається часткове осушення повітря, що дозволяє контролювати відносну вологість [4].

Сучасні системи кондиціонування забезпечують:

- підтримання заданої температури;
- підтримання необхідної вологості;
- осушення повітря;
- фільтрацію повітря;
- циркуляцію повітря в приміщенні.

Таблиця 1.4 – Пристрої систем кондиціонування

Пристрій	Призначення
Кондиціонер	Охолодження повітря
Калорифер	Нагрівання повітря
Осушувач	Зменшення вологості
Вентилятор	Циркуляція повітря
Фільтр HEPA	Очищення повітря

Системи опалення

Для підтримання температури в холодний період року використовуються системи опалення. У складі HVAC вони можуть бути реалізовані у вигляді електричних нагрівачів, водяних калориферів або інших теплогенеруючих пристроїв [2].

У разі зниження температури нижче допустимого рівня система автоматично вмикає нагрівальні елементи та підтримує необхідний температурний режим.

Системи зволоження повітря

Для підтримання оптимальної вологості використовуються системи зволоження повітря.

Недостатня вологість призводить до накопичення статичної електрики та погіршення умов роботи обладнання. Надлишкова вологість може викликати утворення конденсату та створювати сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів [4].

Недоліки традиційних систем

Традиційні системи вентиляції та кондиціонування здатні підтримувати необхідні параметри мікроклімату, проте без використання автоматизованих засобів контролю їх ефективність суттєво знижується.

Основними недоліками ручного контролю є:

- несвоєчасне виявлення відхилень параметрів;
- залежність від людського фактора;
- підвищені експлуатаційні витрати;
- складність документування результатів вимірювань;
- неможливість оперативного реагування на аварійні ситуації.

Саме тому сучасні чисті приміщення оснащуються автоматизованими системами моніторингу та регулювання, які забезпечують безперервний контроль температури, вологості, тиску та якості повітря в режимі реального часу [5].

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У МОНІТОРИНГУ ТА РЕГУЛЮВАННІ МІКРОКЛІМАТУ

2.1 Використання сенсорів для збору даних

Одним із ключових елементів автоматизованих систем моніторингу мікроклімату є сенсори (датчики), які забезпечують отримання інформації про стан контрольованого середовища в режимі реального часу [5].

У сучасних системах HVAC датчики використовуються для вимірювання температури, вологості, тиску, концентрації газів, швидкості повітряних потоків та інших параметрів. Отримані дані передаються до контролера, який аналізує поточний стан середовища та формує керуючі сигнали для виконавчих пристроїв [6].

Використання сенсорів дозволяє:

- здійснювати безперервний моніторинг параметрів мікроклімату;
- своєчасно виявляти відхилення від нормативних значень;
- підвищувати точність регулювання;
- зменшувати вплив людського фактора;
- забезпечувати автоматичне керування системами HVAC.

Для реалізації системи було розглянуто декілька типів датчиків температури, вологості, тиску та якості повітря. Порівняльний аналіз наведено в табл. 3.3–3.5. За результатами аналізу обрано датчики DHT22, BMP280 та MQ-135, основні характеристики яких наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.1.1 – основні характеристики датчиків

Датчик	Параметр	Діапазон	Точність
DHT22	Температура	-40...+80 °C	±0,5 °C
DHT22	Вологість	0...100 %	±2 %
BMP280	Тиск	300...1100 гПа	±1 гПа
MQ-135	Якість повітря	10...1000 ppm	залежить від калібрування

Датчик температури та вологості DHT22

Для контролю температури та відносної вологості повітря використовується цифровий датчик DHT22 (AM2302).

DHT22 є комбінованим сенсором, який містить ємнісний сенсор вологості та терморезистивний сенсор температури. Обробка результатів вимірювання

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

виконується вбудованим мікроконтролером датчика, після чого дані передаються до зовнішнього контролера цифровим інтерфейсом [7].

Основні характеристики DHT22:

- діапазон вимірювання температури від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- точність вимірювання температури $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- діапазон вимірювання вологості від 0% до 100% ;
- точність вимірювання вологості $\pm 2\%$;
- напруга живлення $3,3\text{--}6\text{ В}$.

У системі DHT22 використовується для контролю температури та вологості повітря, а також для формування команд керування нагрівачем, кондиціонером та зволожувачем.

Датчик атмосферного тиску BMP280

Для контролю атмосферного тиску використовується цифровий барометричний сенсор BMP280 виробництва Bosch.

BMP280 дозволяє вимірювати атмосферний тиск та температуру з високою точністю та низьким енергоспоживанням [8].

Основні характеристики BMP280:

- діапазон вимірювання тиску $300\text{--}1100\text{ гПа}$;
- точність вимірювання $\pm 1\text{ гПа}$;
- інтерфейси SPI та I²C;
- напруга живлення $1,8\text{--}3,6\text{ В}$;
- низьке енергоспоживання.

У розробленій системі BMP280 використовується для контролю параметрів повітряного середовища та виявлення відхилень тиску від встановлених значень.

Датчик якості повітря MQ-135

Для оцінювання якості повітря використовується газовий сенсор MQ-135.

Принцип роботи MQ-135 базується на зміні електричного опору чутливого шару при зміні концентрації газів у навколишньому середовищі [9].

Таблиця 2.1.2 - Основні технічні характеристики MQ-135

Параметр	Значення
Напруга живлення	5 В
Струм нагрівача	до 150 мА
Діапазон концентрації	10–1000 ppm

Параметр	Значення
Час прогріву	24–48 год
Виявлювані гази	NH ₃ , CO ₂ , NO _x , бензол, дим

Датчик дозволяє виявляти:

- аміак (NH₃);
- оксиди азоту (NO_x);
- бензол;
- дим;
- вуглекислий газ (CO₂);
- інші газоподібні забруднювачі.

Основні характеристики MQ-135:

- напруга живлення 5 В;
- аналоговий вихідний сигнал;
- висока чутливість до широкого спектра газів;
- можливість використання в системах контролю якості повітря.

У даній роботі сигнал MQ-135 використовується для оцінювання загального рівня забруднення повітря. У випадку перевищення встановленого порогового значення система активує вентиляцію та аварійну сигналізацію.

Переваги використання сенсорів у системі

Для реалізації систем моніторингу мікроклімату можуть застосовуватися датчики DHT11, DHT22, BME280, MQ-135, CCS811 та інші. Порівняльний аналіз показав, що комбінація DHT22, BME280 та MQ-135 забезпечує необхідну точність контролю параметрів.

Отримані дані надходять до мікроконтролера ATmega328P, який аналізує їх та автоматично керує роботою вентилятора, кондиціонера, нагрівача і зволожувача. Завдяки цьому забезпечується підтримання параметрів середовища відповідно до вимог стандартів ISO 14644 та GMP.

2.2 Промислові контролери та системи автоматизації HVAC

Сучасні системи HVAC характеризуються високим рівнем автоматизації та використовують спеціалізовані контролери для збору, обробки та аналізу інформації від сенсорів, а також керування виконавчими механізмами [10].

Основним завданням контролера є підтримання заданих параметрів мікроклімату шляхом аналізу даних, отриманих від датчиків температури, вологості, тиску та якості повітря. На основі результатів аналізу контролер формує

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

сигнали керування вентиляторами, нагрівачами, кондиціонерами, зволожувачами та іншими виконавчими пристроями [11].

У промислових системах автоматизації HVAC найчастіше використовуються:

- програмовані логічні контролери (PLC);
- промислові контролери HVAC;
- мікроконтролерні системи керування;
- вбудовані IoT-контролери.

Для розробки системи моніторингу та регулювання мікроклімату було проведено порівняльний аналіз декількох популярних мікроконтролерних платформ.

Таблиця 2.1 – Порівняння мікроконтролерів для систем автоматизації HVAC

Параметр	ATmega328P	STM32F103C8T6	ESP32-WROOM-32
Архітектура	AVR 8-bit	ARM Cortex-M3	Xtensa LX6
Тактова частота	16 МГц	72 МГц	до 240 МГц
Flash-пам'ять	32 КБ	64 КБ	4 МБ
SRAM	2 КБ	20 КБ	520 КБ
EEPROM	1 КБ	відсутня	відсутня
Кількість GPIO	23	37	до 34
Канали АЦП	6	10	до 18
Інтерфейс SPI	є	є	є
Інтерфейс I ² C	є	є	є
Інтерфейс UART	є	є	є
Робоча напруга	1,8–5,5 В	2,0–3,6 В	2,2–3,6 В
Ethernet через зовнішній модуль	є	є	є

Порівняння мікроконтролерів ATmega328P, STM32F103 та ESP32 наведено в табл. 2.1. За результатами аналізу обрано ATmega328P, оскільки він має достатню кількість входів-виходів, вбудований АЦП, підтримує необхідні інтерфейси зв'язку та повністю підтримується середовищем Proteus.

Основними причинами вибору ATmega328P є:

- достатня кількість входів-виходів для підключення сенсорів та виконавчих пристроїв;
- наявність аналогово-цифрового перетворювача для роботи з датчиком MQ-135;

- підтримка інтерфейсів SPI, I²C та UART;
- можливість підключення мережевого модуля ENC28J60;
- низьке енергоспоживання;
- велика кількість готових бібліотек для Arduino IDE;
- повна підтримка моделювання в середовищі Proteus.

У розробленій системі мікроконтролер ATmega328P має виконувати такі функції:

- зчитування даних із датчиків DHT22, BMP280 та MQ-135;
- обробку та аналіз отриманої інформації;
- формування сигналів керування виконавчими пристроями;
- керування LCD-дисплеєм;
- формування аварійних повідомлень;
- передачу даних через мережевий модуль ENC28J60.

2.3 Інтеграція з промисловими мережами (Ethernet, Modbus)

Сучасні системи моніторингу та автоматизації мікроклімату рідко працюють як автономні пристрої. Для централізованого збору інформації, віддаленого керування та архівування даних вони інтегруються з промисловими мережами передачі даних [13].

Використання мережевих технологій дозволяє забезпечити безперервний контроль параметрів мікроклімату, швидке реагування на аварійні ситуації та передачу інформації до диспетчерських систем або серверів моніторингу.

Основними вимогами до промислових мереж є:

- надійність передачі даних (коефіцієнт доступності не менше 99,9 %);
- завадостійкість до електромагнітних впливів;
- час реакції мережі до 100 мс;
- підтримка від 32 до декількох тисяч вузлів;
- сумісність із промисловими протоколами Modbus, ProfiNet та Ethernet/IP.

У системах HVAC найчастіше використовуються мережі Ethernet, Modbus, BACnet, KNX та інші промислові протоколи [14].

Технологія Ethernet

Ethernet є однією з найпоширеніших технологій передачі даних у локальних комп'ютерних мережах.

Основними перевагами Ethernet є:

- висока швидкість передачі даних (10, 100 або 1000 Мбіт/с);

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

- наявність стандартизованих апаратних та програмних засобів інтеграції;
- сумісність із більшістю мережевого обладнання;
- можливість підключення до глобальної мережі Інтернет;
- підтримка віддаленого моніторингу.

У системах автоматизації Ethernet використовується для передачі даних від контролерів до серверів, операторських станцій та систем диспетчеризації.

У запропонованій системі для реалізації мережевого інтерфейсу використовується контролер ENC28J60(порівняння у табл. 3.6), який забезпечує передачу даних через інтерфейс Ethernet зі швидкістю до 10 Мбіт/с [15].

Модуль ENC28J60 підключається до мікроконтролера ATmega328P через інтерфейс SPI та дозволяє передавати інформацію про температуру, вологість, тиск та якість повітря до зовнішніх інформаційних систем.

Протокол Modbus

Modbus є одним із найпоширеніших промислових протоколів обміну даними між пристроями автоматизації [16].

Протокол підтримує архітектуру типу «ведучий-підлеглий» (Master-Slave) та використовується для обміну інформацією між контролерами, датчиками, виконавчими пристроями та системами диспетчеризації.

Основними перевагами Modbus є:

- відкритість специфікації;
- висока сумісність обладнання різних виробників;
- широке застосування в промислових системах.

Найбільш поширеними реалізаціями протоколу є:

- Modbus RTU;
- Modbus ASCII;
- Modbus TCP/IP.[14]

У системах HVAC протокол Modbus TCP часто використовується поверх мереж Ethernet для передачі даних між контролерами та серверними системами моніторингу.

Мережеві технології у системах моніторингу мікроклімату

Інтеграція систем моніторингу мікроклімату з промисловими мережами дозволяє реалізувати такі функції:

- віддалений контроль параметрів середовища;

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

- централізований збір інформації;
- ведення журналів подій;
- зберігання архівів вимірювань;
- дистанційне керування обладнанням;
- передавання аварійних повідомлень.

ЕС ДТФ УЖЖТ

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ

3.1 Опис технічного завдання

Метою даного проєкту є розробка автоматизованої системи моніторингу та регулювання мікроклімату чистого приміщення, яка забезпечує безперервний контроль параметрів навколишнього середовища та автоматичне керування виконавчими пристроями відповідно до вимог стандартів ISO 14644 та GMP [1, 3].

Розроблювана система повинна забезпечувати вимірювання температури, відносної вологості, атмосферного тиску та якості повітря в режимі реального часу, а також своєчасно реагувати на відхилення контрольованих параметрів від встановлених нормативних значень.

Основними функціями системи є:

- вимірювання температури повітря;
- вимірювання відносної вологості;
- вимірювання атмосферного тиску;
- контроль якості повітря;
- відображення поточних параметрів на LCD-дисплеї;
- автоматичне керування виконавчими пристроями;
- формування аварійних повідомлень;
- передача даних мережею Ethernet.

Відповідно до технічного завдання система повинна підтримувати такі параметри мікроклімату:

Таблиця 3.1 – Контрольовані параметри системи

Параметр	Допустиме значення
Температура	20–24 °C
Відносна вологість	45–60 %
Атмосферний тиск	1000–1025 гПа
Якість повітря	концентрація забруднювачів не повинна перевищувати порогове значення, встановлене для датчика MQ-135 (550 умовних одиниць АЦП у моделі Proteus).

При виході параметрів за допустимі межі система повинна автоматично виконувати коригувальні дії.

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Алгоритм роботи системи передбачає:

- увімкнення кондиціонера при температурі вище 24 °С;
- увімкнення нагрівача при температурі нижче 20 °С;
- увімкнення зволожувача при вологості нижче 45 %;
- увімкнення вентилятора при погіршенні якості повітря;
- активацію світлової та звукової сигналізації при виникненні аварійної ситуації.

Для забезпечення автоматичного контролю та регулювання параметрів середовища система повинна працювати безперервно та виконувати циклічне опитування датчиків.

Крім локального моніторингу, система повинна забезпечувати можливість передачі даних через мережу Ethernet для подальшого зберігання, аналізу та диспетчеризації.

Розробка системи виконується з використанням мікроконтролерної платформи ATmega328P та спеціалізованих сенсорів контролю параметрів мікроклімату. Перевірка працездатності системи здійснюється шляхом комп'ютерного моделювання у середовищі Proteus 8 Professional.

Очікуваним результатом виконання проєкту є створення автоматизованої системи, здатної підтримувати контрольовані параметри мікроклімату чистого приміщення та оперативно реагувати на зміну умов навколишнього середовища.

3.2 Вибір обладнання та програмного забезпечення

Для реалізації системи моніторингу та регулювання мікроклімату чистого приміщення було виконано аналіз доступних апаратних та програмних засобів. Основними критеріями вибору були точність вимірювань, надійність роботи, сумісність з мікроконтролером, простота інтеграції та можливість моделювання в середовищі Proteus.

Вибір мікроконтролера

Для побудови системи керування було розглянуто три популярні мікроконтролерні платформи: ATmega328P, STM32F103C8T6 та ESP32.

Таблиця 3.2 – Порівняння мікроконтролерів

Параметр	ATmega328P	ATmega16	STM32F103C8T6
Розрядність	8 біт	8 біт	32 біти
Тактова частота	16 МГц	16 МГц	72 МГц
Flash	32 КБ	16 КБ	64 КБ

пам'ять			
SRAM	2 КБ	1 КБ	20 КБ
EEPROM	1 КБ	512 Б	відсутня
Кількість GPIO	23	32	37
АЦП	10 біт, 6 каналів	10 біт, 8 каналів	12 біт, 10 каналів
SPI	є	є	є
UART	є	є	є
I ² C	є	є	є
Напруга живлення	1,8–5,5 В	4,5–5,5 В	2,0–3,6 В

Для реалізації проєкту було обрано мікроконтролер ATmega328P. Незважаючи на нижчу продуктивність порівняно з STM32 та ESP32, його характеристик повністю достатньо для обробки даних від датчиків температури, вологості, тиску та якості повітря. Додатковою перевагою є повна підтримка середовища Proteus та наявність великої кількості бібліотек для Arduino IDE [12].

Вибір датчика температури та вологості

Для контролю температури та вологості було розглянуто датчики DHT11, DHT22 та BME280.

Таблиця 3.3 – Порівняння датчиків температури та вологості

Параметр	DHT11	DHT22	DS18B20
Температура	0...50 °C	-40...80 °C	-55...125 °C
Точність температури	±2 °C	±0,5 °C	±0,5 °C
Вологість	20...90 %	0...100 %	Немає
Точність вологості	±5 %	±2 %	—
Інтерфейс	Digital	Digital	1-Wire

За результатами аналізу було обрано DHT22, оскільки він забезпечує одночасне вимірювання температури та вологості, має широкий діапазон вимірювань та достатню точність для контролю параметрів мікроклімату чистих приміщень [7].

Вибір датчика тиску

Для вимірювання атмосферного тиску були розглянуті датчики BMP180, BMP280 та BME280.

									КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						27

Таблиця 3.4 – Порівняння датчиків тиску

Параметр	BMP180	BMP280	BME280
Діапазон тиску	300–1100 гПа	300–1100 гПа	300–1100 гПа
Точність вимірювання	±1 гПа	±1 гПа	±1 гПа
Інтерфейс	I ² C	I ² C, SPI	I ² C, SPI
Вимірювання температури	так	так	так
Вимірювання вологості	ні	ні	так
Напруга живлення	1,8–3,6 В	1,71–3,6 В	1,71–3,6 В
Споживання струму	12 мкА	2,7 мкА	3,6 мкА

Для реалізації системи було обрано BMP280, оскільки він має підтримку інтерфейсу SPI та характеризується низьким енергоспоживанням [8].

Основні характеристики BMP280

- діапазон вимірювання тиску: 300–1100 гПа;
- точність вимірювання: ±1 гПа;
- інтерфейси: SPI, I²C;
- напруга живлення: 1,71–3,6 В;
- споживаний струм: до 2,7 мкА у режимі вимірювання.

Вибір датчика якості повітря

Для контролю якості повітря були розглянуті датчики MQ-2, MQ-135 та CCS811.

Таблиця 3.5 – Порівняння датчиків якості повітря

Параметр	MQ-2	MQ-135	CCS811
Контроль CO ₂	обмежено	так	так
Контроль NH ₃	ні	так	ні
Контроль бензолу	ні	так	ні
Контроль диму	так	так	ні
Тип виходу	аналоговий	аналоговий	цифровий
Інтерфейс	Analog	Analog	I ² C
Напруга живлення	5 В	5 В	1,8–3,6 В
Час прогріву	24 год	24 год	не потребує

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ

Арк.

28

Параметр	MQ-2	MQ-135	CCS811
Споживання струму	до 150 мА	до 90 мА	до 30 мА

Для даного проєкту було обрано MQ-135, оскільки він забезпечує контроль широкого спектра газоподібних забруднювачів та легко інтегрується з аналоговими входами ATmega328P [9].

Вибір мережевого модуля

Для реалізації мережевої взаємодії були розглянуті ENC28J60 та W5500.

Таблиця 3.6 – Порівняння Ethernet-контролерів

Параметр	ENC28J60	W5100	W5500
Інтерфейс підключення	SPI	SPI	SPI
Швидкість Ethernet	10 Мбіт/с	10/100 Мбіт/с	10/100 Мбіт/с
Буфер пам'яті	8 КБ	16 КБ	32 КБ
Підтримка TCP/IP	програмна	апаратна	апаратна
Напруга живлення	3,3 В	3,3 В	3,3 В
Максимальна частота SPI	20 МГц	14 МГц	80 МГц
Підтримка UDP	так	так	так
Підтримка TCP	так	так	так

За результатами аналізу було обрано контролер ENC28J60. Його технічні характеристики є достатніми для передавання даних про температуру, вологість, тиск та якість повітря в локальній мережі. Контролер підтримує інтерфейс SPI та повністю сумісний з мікроконтролером ATmega328P [9].

Таблиця 3.6.1 – характеристики ENC28J60

Параметр	Значення
Інтерфейс	SPI
Швидкість Ethernet	10 Мбіт/с
Напруга живлення	3,3 В
Буфер пам'яті	8 КБ
Підтримка TCP/IP	через програмний стек

Вибір програмного забезпечення

Для розробки програмного забезпечення використовується середовище Arduino IDE. Вибір обумовлений підтримкою мікроконтролера ATmega328P та наявністю бібліотек для роботи з DHT22, BMP280, LCD-дисплеями та Ethernet-модулями.

Для перевірки працездатності системи використовується середовище моделювання Proteus 8 Professional, яке дозволяє створювати принципові електричні схеми, моделювати роботу мікроконтролера та виконувати тестування програмного коду без виготовлення фізичного макета пристрою.

Таким чином, обрана елементна база забезпечує реалізацію всіх функцій системи моніторингу та регулювання мікроклімату чистого приміщення, а також відповідає вимогам стандартів ISO 14644 та GMP.

3.3 Архітектура системи

Архітектура розробленої системи моніторингу та регулювання мікроклімату побудована за модульним принципом та складається з підсистем збору даних, обробки інформації, відображення результатів, мережевої взаємодії та керування виконавчими пристроями.

Структурна схема системи наведена на рисунку 3.1.



Рис 3.1 – Структурна схема системи моніторингу та регулювання мікроклімату «чистих» приміщень

Основним елементом системи є мікроконтролер ATmega328P, який здійснює зчитування даних із сенсорів, аналіз отриманої інформації та формування керуючих сигналів для виконавчих пристроїв.

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

До складу системи входять такі функціональні блоки:

- блок живлення;
- блок стабілізації напруги;
- блок сенсорів;
- блок обробки даних;
- блок відображення інформації;
- блок мережевої взаємодії;
- блок керування виконавчими пристроями;
- система аварійної сигналізації.

Блок збору даних

Блок збору даних призначений для отримання інформації про параметри мікроклімату чистого приміщення.

До його складу входять:

- датчик температури та вологості DHT22;
- датчик атмосферного тиску BMP280;
- датчик якості повітря MQ-135.

Датчик DHT22 забезпечує вимірювання температури та відносної вологості повітря. Отримані значення використовуються для контролю роботи нагрівача, кондиціонера та зволожувача.

Датчик BMP280 здійснює контроль атмосферного тиску та дозволяє контролювати стабільність параметрів повітряного середовища.

Датчик MQ-135 використовується для оцінювання рівня забруднення повітря та формування аварійного сигналу при перевищенні допустимого рівня забруднення.

Блок обробки даних

Центральним елементом системи є мікроконтролер ATmega328P.

Основними функціями мікроконтролера є:

- опитування датчиків;
- обробка результатів вимірювання;
- порівняння параметрів із заданими порогоми;
- формування керуючих сигналів;
- керування дисплеєм;
- формування аварійних повідомлень;
- передача даних до мережевого модуля.

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Мікроконтролер працює в режимі безперервного циклічного опитування сенсорів, що забезпечує актуальність інформації про стан мікроклімату.

Блок відображення інформації

Для локальної візуалізації даних використовується рідкокристалічний дисплей LCD 16×2.

На дисплей почергово виводяться:

- температура повітря;
- відносна вологість;
- атмосферний тиск;
- показники якості повітря;
- аварійні повідомлення.

Через обмежений розмір дисплея інформація відображається циклічно з автоматичним перемиканням екранів через певний інтервал часу.

Блок мережевої взаємодії

Для передачі даних використовується Ethernet-контролер ENC28J60.

Модуль підключається до мікроконтролера через інтерфейс SPI та забезпечує передачу інформації мережею Ethernet.

Використання мережевого модуля дозволяє реалізувати:

- дистанційний моніторинг;
- передавання даних на сервер;
- інтеграцію з системами диспетчеризації;
- архівування результатів вимірювань.

У запропонованій системі передбачено передачу даних мережею Ethernet за допомогою модуля ENC28J60. Інформація, отримана від датчиків DHT22, BMP280 та MQ-135, може передаватися до комп'ютера або серверної системи для подальшого аналізу, зберігання та моніторингу параметрів мікроклімату.

Використання мережевого інтерфейсу забезпечує можливість централізованого контролю стану чистого приміщення та оперативного реагування на відхилення контрольованих параметрів від встановлених значень.

Візуалізація та аналіз даних у реальному часі

Однією з важливих складових сучасних систем автоматизації є можливість оперативного відображення та аналізу даних, отриманих від сенсорів. Візуалізація параметрів мікроклімату дозволяє оператору контролювати стан середовища,

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

своєчасно виявляти відхилення від нормативних значень та приймати необхідні рішення щодо коригування роботи системи [17].

У системах моніторингу чистих приміщень у режимі реального часу контролюються такі параметри:

- температура повітря;
- відносна вологість;
- атмосферний тиск;
- якість повітря;
- стан виконавчих пристроїв;
- аварійні повідомлення.
- стан обладнання

Отримані дані надходять від сенсорів до мікроконтролера, де виконуються їх обробка, аналіз та порівняння з установленими пороговими значеннями [18].

Візуалізація даних

Для відображення інформації в розроблених системах часто використовується символічний рідкокристалічний дисплей LCD.

LCD-дисплей забезпечує простий та наочний спосіб представлення інформації без необхідності використання додаткового комп'ютерного обладнання.

На дисплеї відображаються: поточна інформація о стану обладнання та параметри чистого приміщення.

Такий підхід дозволяє забезпечити відображення всіх необхідних даних навіть при використанні компактного дисплея.

Аналіз даних

Після зчитування показників із сенсорів мікроконтролер ATmega328P виконує їх аналіз та порівняння з установленими нормативними значеннями.

Якщо параметри перебувають у допустимих межах, система працює в штатному режимі.

У разі виходу будь-якого параметра за встановлені межі система формує керуючий сигнал для відповідного виконавчого пристрою:

- при температурі вище 24 °C вмикається кондиціонер;
- при температурі нижче 20 °C вмикається нагрівач;
- при вологості нижче 45 % вмикається зволожувач;
- при погіршенні якості повітря активується вентиляція;

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

- при виникненні аварійної ситуації вмикаються світлова та звукова сигналізація.

Моніторинг у реальному часі

Робота системи здійснюється в режимі безперервного моніторингу. Дані від сенсорів регулярно оновлюються, що дозволяє оперативно реагувати на будь-які зміни параметрів мікроклімату.

Використання мережевого модуля ENC28J60 забезпечує можливість подальшої передачі даних мережею Ethernet до віддалених систем диспетчеризації або архівування інформації [19].

Таким чином, реалізована система забезпечує безперервний контроль параметрів мікроклімату, їх відображення в режимі реального часу та автоматичне керування виконавчими пристроями відповідно до вимог чистих приміщень.

Порівняльний аналіз елементів керування виконавчими пристроями

Для комутації виконавчих пристроїв системи було проведено порівняння декількох способів керування навантаженням.

Таблиця 3.6 – Порівняння елементів керування навантаженням

Параметр	Реле SRD-05VDC-SL-C	IRFZ44N	МОС3021 + ВТА16
Тип навантаження	AC/DC	DC	AC
Гальванічна розв'язка	так	ні	так
Керування від МК	так	так	так
Комутація 220 В AC	так	ні	так
Максимальний струм навантаження	10 А	49 А (DC)	16 А (AC)
Наявність механічних контактів	так	ні	ні
Знос під час роботи	присутній	відсутній	відсутній
Швидкодія	середня	висока	висока
Рівень електробезпеки	середній	середній	високий

Для реалізації системи було обрано комбінацію оптосимістора МОС3021 та силового симістора ВТА16-600В.

Таке рішення забезпечує гальванічну розв'язку між мікроконтролером та силовою частиною схеми, дозволяє безпечно керувати навантаженнями змінного струму

напругою 220 В та не містить механічних контактів, що підвищує надійність роботи системи.

Симістор ВТА16-600В забезпечує комутацію струму до 16 А, що значно перевищує струми навантажень, використаних у системі. Оптосимістор МОС3021 забезпечує електричну ізоляцію низьковольтної та силової частин схеми, що підвищує безпеку експлуатації пристрою.

Система аварійної сигналізації

Для інформування персоналу про аварійні ситуації використовується світлодіодна та звукова сигналізація.

Система аварійного оповіщення активується у випадках:

- перевищення допустимої температури;
- зниження температури нижче допустимого рівня;
- погіршення якості повітря;
- виходу параметрів вологості за встановлені межі;
- виникнення помилок роботи системи.

Таким чином, розроблена архітектура забезпечує комплексний контроль параметрів мікроклімату чистого приміщення, автоматичне керування виконавчими пристроями та можливість інтеграції з мережевими системами моніторингу.

3.4 Алгоритми регулювання параметрів мікроклімату

Для забезпечення нормативних параметрів мікроклімату в чистому приміщенні розроблено алгоритм автоматичного моніторингу та регулювання температури, вологості, тиску та якості повітря.

Основною задачею алгоритму є безперервний збір інформації від сенсорів, аналіз отриманих даних та автоматичне керування виконавчими пристроями системи HVAC відповідно до встановлених порогових значень.

Робота системи реалізується циклічно та складається з таких етапів:

1. Ініціалізація мікроконтролера та периферійних пристроїв.
2. Зчитування даних із датчиків DHT22, BMP280 та MQ-135.
3. Аналіз отриманих значень.
4. Порівняння параметрів із допустимими межами.
5. Формування керуючих сигналів.
6. Відображення інформації на LCD-дисплеї.
7. Передача даних до мережевого модуля ENC28J60.
8. Перехід до нового циклу опитування датчиків.

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Блок-схема алгоритму роботи системи

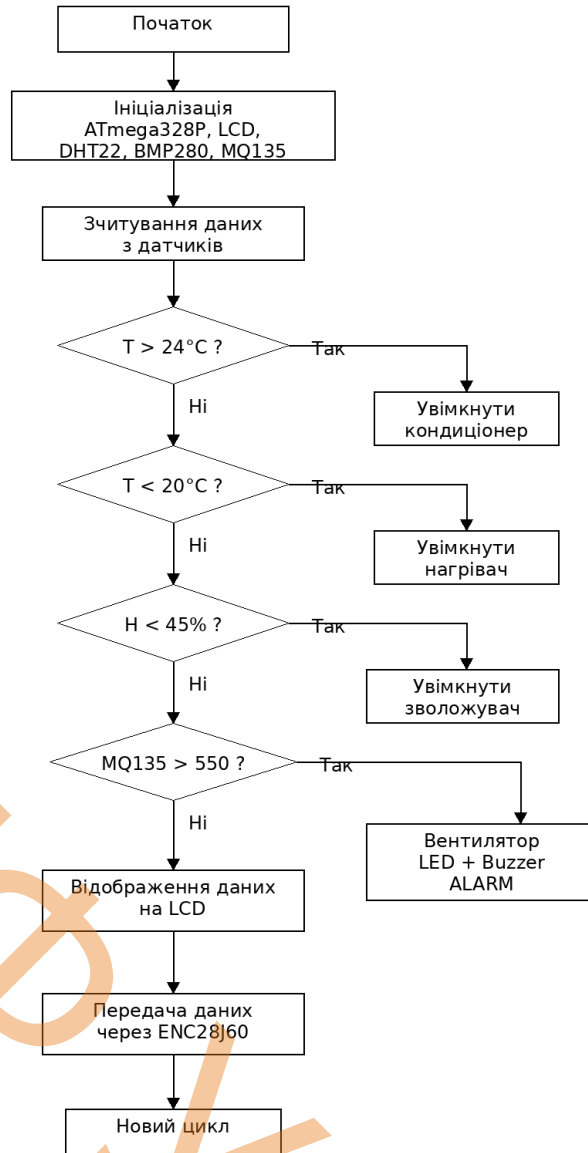


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму роботи системи моніторингу та регулювання мікроклімату чистого приміщення.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ

Арк.

36

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

4.1 Встановлення сенсорів та налаштування обладнання

Розроблена система складається з підсистем збору даних, обробки інформації, індикації, мережевої взаємодії та виконавчих пристроїв. Структурна схема системи наведена на рис. 3.1. Для перевірки працездатності виконано моделювання в Proteus.

У процесі моделювання була створена принципова електрична схема системи моніторингу та регулювання мікроклімату чистого приміщення на базі мікроконтролера ATmega328P.

До мікроконтролера були підключені такі сенсори:

- датчик температури та вологості DHT22;
- датчик атмосферного тиску BMP280;
- датчик контролю якості повітря MQ-135.

Для відображення результатів вимірювання використовувався символічний LCD-дисплей 16×2.

Передача даних у мережу реалізована за допомогою Ethernet-контролера ENC28J60, підключеного через інтерфейс SPI.

Для керування виконавчими пристроями використано оптосимістор MOC3021 та силовий симістор ВТА16-600В, що забезпечують гальванічну розв'язку між мікроконтролером і навантаженням мережі 220 В.

У системі передбачено керування такими виконавчими пристроями:

- вентилятором системи вентиляції;
- кондиціонером;
- нагрівачем повітря;
- зволожувачем повітря.

Для інформування оператора про аварійні ситуації використано світлодіодну та звукову сигналізацію.

Перед початком моделювання було виконано налаштування параметрів усіх компонентів схеми та завантаження програмного коду до моделі мікроконтролера ATmega328P у форматі HEX-файлу.

Після запуску симуляції мікроконтролер виконує ініціалізацію периферійних пристроїв, опитування сенсорів та аналіз отриманих даних у режимі реального часу.

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Результати вимірювань циклічно відображаються на LCD-дисплеї, що дозволяє контролювати поточний стан мікроклімату чистого приміщення.

Використання середовища Proteus дозволило перевірити працездатність електричної схеми, коректність алгоритму керування та взаємодію між усіма компонентами системи без виготовлення фізичного макета пристрою.

4.2 Приклади роботи системи у різних режимах

Для перевірки працездатності розробленої системи було проведено серію експериментів у середовищі моделювання Proteus. Під час тестування перевірялася реакція системи на зміну параметрів мікроклімату та коректність роботи алгоритмів автоматичного керування.

Нормальний режим роботи

У штатному режимі всі параметри мікроклімату знаходяться в межах встановлених нормативних значень:

- температура від 20 °С до 24 °С;
- відносна вологість від 45 % до 60 %;
- рівень забруднення повітря не перевищує допустимий поріг;
- атмосферний тиск знаходиться в допустимому діапазоні.

У цьому режимі система лише виконує моніторинг параметрів середовища та відображає поточні показники на LCD-дисплеї.

Виконавчі пристрої та аварійна сигналізація залишаються вимкненими.

Режим підвищеної температури

Для перевірки роботи системи охолодження значення температури було збільшено вище допустимого порогу.

При перевищенні температури 24 °С мікроконтролер формує керуючий сигнал на систему кондиціонування.

У результаті:

- активується кондиціонер;
- на дисплеї відображається поточна температура;
- система продовжує моніторинг інших параметрів.

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Режим зниженої температури

Для перевірки роботи системи опалення значення температури було знижено нижче встановленого порога.

При температурі нижче 20 °С система автоматично вмикає нагрівач повітря.

У результаті:

- активується нагрівач;
- система підтримує необхідний температурний режим;
- інформація про температуру відображається на LCD-дисплеї.

Режим недостатньої вологості

Для перевірки алгоритму підтримання вологості було змодельовано зниження вологості нижче 45 %.

У цьому випадку система автоматично вмикає зволожувач повітря.

У результаті:

- активується система зволоження;
- відображаються поточні значення вологості;
- після досягнення необхідного рівня вологості зволожувач вимикається.

Режим погіршення якості повітря

Для перевірки роботи датчика MQ-135 було змодельовано збільшення рівня забруднення повітря.

При перевищенні встановленого порогового значення:

$MQ135 > 550$

система переходить у режим аварійного реагування.

У результаті:

- вмикається вентилятор;
- активується світлодіодна індикація;
- активується звукова сигналізація;
- на дисплеї відображається повідомлення «ALARM».

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Контроль атмосферного тиску

Для перевірки роботи датчика BMP280 було змодельовано зміну атмосферного тиску.

Отримані значення коректно зчитувалися мікроконтролером та відображалися на LCD-дисплеї.

Під час тестування підтверджено правильність роботи інтерфейсу обміну даними між BMP280 та ATmega328P.

Аварійний режим

При одночасному виході декількох параметрів за допустимі межі система переходить у аварійний режим роботи.

У цьому режимі:

- активується світлодіодна індикація;
- активується звуковий сигнал;
- запускаються відповідні виконавчі пристрої;
- на LCD-дисплеї відображається повідомлення про аварію.

Після повернення параметрів у допустимий діапазон система автоматично повертається до штатного режиму роботи.

Проведене моделювання підтвердило працездатність усіх основних функцій системи, коректність роботи алгоритмів керування та взаємодію між сенсорами, мікроконтролером і виконавчими пристроями.

4.3 Аналіз результатів тестування

Для оцінки ефективності розробленої системи було проведено комплексне тестування її роботи в середовищі моделювання Proteus.

У процесі тестування перевірялися:

- коректність зчитування даних із сенсорів;
- працездатність алгоритмів керування;
- правильність відображення інформації на LCD-дисплеї;
- функціонування виконавчих пристроїв;
- робота аварійної сигналізації;
- взаємодія між окремими блоками системи.

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Результати моделювання показали, що всі сенсори коректно передають інформацію до мікроконтролера ATmega328P.

DHT22 забезпечив стабільне вимірювання температури та вологості повітря. Отримані значення використовувалися для автоматичного керування нагрівачем, кондиціонером та зволожувачем.

BMP280 успішно виконував вимірювання атмосферного тиску та передавав результати до мікроконтролера через цифровий інтерфейс.

MQ-135 забезпечував контроль рівня забруднення повітря. Під час перевищення встановленого порога система коректно переходила в аварійний режим та активувала вентиляцію й сигналізацію.

Проведене тестування підтвердило правильність реалізації алгоритмів автоматичного керування.

Результати роботи системи наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати тестування системи

Перевірка	Очікуваний результат	Отриманий результат
Вимірювання температури	Коректне зчитування DHT22	Виконано
Вимірювання вологості	Коректне зчитування DHT22	Виконано
Вимірювання тиску	Коректне зчитування BMP280	Виконано
Контроль якості повітря	Коректне зчитування MQ-135	Виконано
Температура > 24 °C	Увімкнення кондиціонера	Виконано
Температура < 20 °C	Увімкнення нагрівача	Виконано
Вологість < 45 %	Увімкнення зволожувача	Виконано
MQ-135 > поріг	Увімкнення вентилятора	Виконано
Аварійний режим	LED + Buzzer + ALARM	Виконано
Відображення на LCD	Коректний показ параметрів	Виконано

Аналіз результатів показав, що система забезпечує стабільний контроль параметрів мікроклімату та своєчасно реагує на їх зміну.

Під час моделювання не було виявлено критичних помилок у роботі алгоритмів або взаємодії між окремими модулями системи.

Використання автоматичного керування дозволило мінімізувати час реагування на зміну параметрів середовища та забезпечити підтримання необхідних умов функціонування чистого приміщення.

Отримані результати підтверджують можливість застосування розробленої системи для моніторингу та регулювання мікроклімату чистих приміщень відповідно до вимог сучасних систем HVAC.

4.4 Оцінка відповідності стандартам ISO/GMP

Одним із головних завдань розробленої системи є забезпечення контролю параметрів мікроклімату відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 14644 та правил належної виробничої практики GMP [1], [3].

Згідно зі стандартом ISO 14644, у чистих приміщеннях необхідно забезпечувати контроль параметрів повітряного середовища, які безпосередньо впливають на якість технологічних процесів та рівень забруднення приміщення.

До таких параметрів належать:

- температура повітря;
- відносна вологість;
- перепад тиску;
- якість повітря;
- ефективність роботи систем вентиляції та кондиціонування.

У розробленій системі реалізовано контроль усіх зазначених параметрів за допомогою датчиків DHT22, BMP280 та MQ-135.

Температура та відносна вологість контролюються датчиком DHT22. Отримані дані використовуються для автоматичного керування кондиціонером, нагрівачем та зволожувачем повітря.

Контроль атмосферного тиску виконується за допомогою датчика BMP280, що дозволяє здійснювати моніторинг стану повітряного середовища та виявляти відхилення від установлених значень.

Для оцінювання якості повітря використовується датчик MQ-135, який дозволяє контролювати рівень забруднення та своєчасно активувати вентиляцію при погіршенні умов середовища.

Однією з важливих вимог GMP є безперервний моніторинг параметрів виробничого середовища та оперативне реагування на виникнення аварійних ситуацій [3].

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

У розробленій системі ця вимога реалізована шляхом:

- циклічного опитування сенсорів;
- автоматичного аналізу отриманих даних;
- формування керуючих сигналів;
- активації аварійної сигналізації;
- відображення повідомлень на LCD-дисплеї;
- передачі даних через Ethernet-мережу.

Результати аналізу відповідності наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Відповідність функцій системи вимогам ISO 14644 та GMP

Вимога стандартів	Реалізація в системі
Контроль температури	Датчик DHT22
Контроль вологості	Датчик DHT22
Контроль тиску	Датчик BMP280
Контроль якості повітря	Датчик MQ-135
Автоматичне регулювання параметрів	Реалізовано
Аварійне сповіщення	LED + Buzzer
Відображення параметрів	LCD 16×2
Передача даних мережею	ENC28J60 Ethernet
Безперервний моніторинг	Реалізовано

Проведене моделювання в середовищі Proteus підтвердило працездатність алгоритмів контролю та регулювання параметрів мікроклімату.

Розроблена система не замінює повноцінні промислові комплекси керування чистими приміщеннями, однак забезпечує виконання основних функцій моніторингу та автоматичного регулювання параметрів середовища відповідно до вимог стандартів ISO 14644 та GMP.

Отримані результати свідчать про можливість використання запропонованої системи як основи для побудови більш складних систем автоматизації чистих приміщень із розширеними функціями диспетчеризації та віддаленого моніторингу.

РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ БЛОКІВ ПРИСТРОЮ

5.1 Розрахунок джерела живлення системи

Для забезпечення роботи системи моніторингу та регулювання мікроклімату необхідно визначити сумарне споживання струму всіма електронними компонентами.

Таблиця 5.1 – Споживання струму елементами системи

Елемент	Струм споживання, мА
АТmega328P	20
DHT22	2
BMP280	1
MQ-135	90
LCD 16×2	25
ENC28J60	180
Світлодіод	10
Зумер	30
МОС3021	15
Разом	373

Сумарний струм навантаження визначається за формулою:

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

де:

I_{Σ} – сумарний струм навантаження;

$I_1 \dots I_n$ – струми окремих елементів системи.

Підставляємо значення:

$$I_{\Sigma} = 20 + 2 + 1 + 90 + 25 + 180 + 10 + 30 + 15$$

$$I_{\Sigma} = 373 \text{ мА} = 0,373 \text{ А}$$

Для забезпечення надійної роботи системи приймається запас по струму 30 %.

Необхідний струм джерела живлення визначається за формулою:

$$I_{дж} = 1,3 \cdot I_{\Sigma}$$

Після підстановки отримуємо:

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

$$I_{дж} = 1,3 \cdot 0,373$$

$$I_{дж} = 0,485 \text{ А}$$

Отже, мінімальний струм джерела живлення повинен становити не менше 0,5 А.

Потужність джерела живлення визначається за формулою:

$$P = U \cdot I$$

де:

P – потужність, Вт;

U – напруга живлення, В;

I – струм навантаження, А.

Для даної системи:

$$P = 5 \cdot 0,485$$

$$P = 2,43 \text{ Вт}$$

Для забезпечення стабільної роботи обирається джерело живлення з такими параметрами:

$$U = 5 \text{ В};$$

$$I = 1 \text{ А};$$

$$P = 5 \text{ Вт}.$$

Таким чином, для живлення системи достатньо джерела постійної напруги 5 В зі струмом не менше 1 А, що забезпечує необхідний запас по потужності та надійність роботи всіх елементів системи.

5.2 Розрахунок вузла живлення та розподілу напруги

У розробленій системі використовується кілька рівнів живлення. Основна логічна частина системи працює від напруги 5 В, а окремі модулі, зокрема BMP280 та ENC28J60, потребують живлення 3,3 В.

До лінії живлення 5 В підключаються:

- мікроконтролер ATmega328P;
- LCD-дисплей 16×2;
- датчик DHT22;

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

- датчик MQ-135;
- світлодіодна індикація;
- зумер;
- вхідна частина оптосимістора МОС3021.

До лінії живлення 3,3 В підключаються:

- датчик атмосферного тиску BMP280;
- мережевий контролер ENC28J60.

Для забезпечення стабільної роботи системи необхідно, щоб джерело живлення забезпечувало достатній струм як для лінії 5 В, так і для лінії 3,3 В.

Струм навантаження лінії 5 В визначається як сума струмів усіх елементів, підключених до цієї лінії:

$$I_{5V} = I_{ATmega} + I_{LCD} + I_{DHT22} + I_{MQ135} + I_{LED} + I_{Buzzer} + I_{MOC3021}$$

Підставимо значення:

$$I_{5V} = 20 + 25 + 2 + 90 + 10 + 30 + 15$$

$$I_{5V} = 192 \text{ мА}$$

Струм навантаження лінії 3,3 В визначається за формулою:

$$I_{3,3V} = I_{BMP280} + I_{ENC28J60}$$

Підставимо значення:

$$I_{3,3V} = 1 + 180$$

$$I_{3,3V} = 181 \text{ мА}$$

Загальний струм системи:

$$I_{\Sigma} = I_{5V} + I_{3,3V}$$

$$I_{\Sigma} = 192 + 181$$

$$I_{\Sigma} = 373 \text{ мА}$$

Отримане значення збігається з розрахунком сумарного споживання системи.

Для забезпечення стабільної роботи джерело живлення повинно мати запас по струму не менше 30 %:

$$I_{дж} = 1,3 \cdot I_{\Sigma}$$

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

$$I_{дж} = 1,3 \cdot 0,373$$

$$I_{дж} = 0,485 \text{ А}$$

Отже, для живлення системи необхідне джерело живлення з вихідною напругою 5 В та струмом не менше 0,5 А.

Для живлення модулів BMP280 та ENC28J60 від напруги 3,3 В використовується окрема лінія стабілізованої напруги. У практичній реалізації для цього може бути використаний стабілізатор типу LM1117-3.3 або готовий модуль пониження напруги 5 В → 3,3 В.

Потужність, що споживається лінією 3,3 В, визначається за формулою:

$$P_{3,3В} = U_{3,3В} \cdot I_{3,3В}$$

$$P_{3,3В} = 3,3 \cdot 0,181$$

$$P_{3,3В} = 0,597 \text{ Вт}$$

Потужність, що споживається лінією 5 В:

$$P_{5В} = U_{5В} \cdot I_{5В}$$

$$P_{5В} = 5 \cdot 0,192$$

$$P_{5В} = 0,96 \text{ Вт}$$

Загальна споживана потужність електронної частини системи:

$$P_{\Sigma} = P_{5В} + P_{3,3В}$$

$$P_{\Sigma} = 0,96 + 0,597$$

$$P_{\Sigma} = 1,557 \text{ Вт}$$

З урахуванням запасу по потужності доцільно використовувати джерело живлення потужністю не менше 3 Вт.

Отже, для живлення електронної частини системи достатньо джерела постійної напруги 5 В зі струмом 1 А. Для модулів BMP280 та ENC28J60 необхідно передбачити стабілізовану лінію 3,3 В.

5.3 Розрахунок кварцового генератора ATmega328P

Для забезпечення стабільної роботи мікроконтролера ATmega328P використовується зовнішній кварцовий резонатор. У розробленій системі

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

застосовується кварцовий резонатор із частотою 16 МГц, що відповідає типовій схемі роботи ATmega328P у середовищі Arduino IDE.

Кварцовий генератор забезпечує стабільну тактову частоту, необхідну для виконання програмного коду, роботи таймерів, інтерфейсів обміну даними та коректної взаємодії з периферійними пристроями.

Для підключення кварцового резонатора використовуються два конденсатори навантаження. Їх номінал визначається за формулою:

$$C = 2 \cdot (CL - Cп)$$

де:

C – ємність кожного конденсатора, пФ;

CL – навантажувальна ємність кварцового резонатора, пФ;

Cп – паразитна ємність монтажу та виводів, пФ.

Для типового кварцового резонатора 16 МГц приймаємо:

$$CL = 16 \text{ пФ};$$

$$Cп = 5 \text{ пФ}.$$

Підставимо значення:

$$C = 2 \cdot (16 - 5)$$

$$C = 2 \cdot 11$$

$$C = 22 \text{ пФ}$$

Отже, для стабільної роботи кварцового генератора використовуються два конденсатори ємністю 22 пФ.

Схема підключення кварцового резонатора:

- перший вивід кварца підключається до входу XTAL1 мікроконтролера;
- другий вивід кварца підключається до входу XTAL2;
- від кожного виводу кварца встановлюється конденсатор 22 пФ на землю.

Частота тактування мікроконтролера становить:

$$f = 16 \text{ МГц}$$

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Період одного тактового імпульсу визначається за формулою:

$$T = 1 / f$$

Підставимо значення:

$$T = 1 / 16\,000\,000$$

$$T = 0,0000000625 \text{ с}$$

$$T = 62,5 \text{ нс}$$

Отже, при частоті 16 МГц період одного тактового імпульсу становить 62,5 нс.

Використання кварцового резонатора 16 МГц забезпечує стабільну роботу мікроконтролера ATmega328P, коректне виконання програмного коду та надійну взаємодію з датчиками, LCD-дисплеєм і мережевим модулем ENC28J60.

5.4 Розрахунок резистора світлодіодної індикації

У розробленій системі світлодіод використовується для аварійної індикації. Він вмикається у разі виходу параметрів мікроклімату за допустимі межі або при погіршенні якості повітря.

Для обмеження струму через світлодіод необхідно встановити послідовний резистор.

Опір резистора визначається за формулою:

$$R = (U_{\text{жив}} - U_{\text{LED}}) / I_{\text{LED}}$$

де:

R – опір резистора, Ом;

U_{жив} – напруга живлення, В;

U_{LED} – пряме падіння напруги на світлодіоді, В;

I_{LED} – робочий струм світлодіода, А.

Приймаємо:

$$U_{\text{жив}} = 5 \text{ В};$$

$$U_{\text{LED}} = 2 \text{ В};$$

$$I_{\text{LED}} = 0,01 \text{ А}.$$

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Підставимо значення:

$$R = (5 - 2) / 0,01$$

$$R = 3 / 0,01$$

$$R = 300 \text{ Ом}$$

Найближче стандартне значення резистора:

$$R = 330 \text{ Ом}$$

Перевіримо струм через світлодіод при використанні резистора 330 Ом:

$$I_{LED} = (U_{жив} - U_{LED}) / R$$

$$I_{LED} = (5 - 2) / 330$$

$$I_{LED} = 0,009 \text{ А}$$

$$I_{LED} = 9 \text{ мА}$$

Отриманий струм є допустимим для стандартного світлодіода та не перевищує допустиме навантаження виходу мікроконтролера АТmega328Р.

Отже, для світлодіодної індикації аварійного режиму використовується резистор номіналом 330 Ом.

5.5 Розрахунок оптосимісторного вузла керування МOC3021 та ВТА16

У розробленій системі для керування навантаженням змінного струму використовується оптосимістор МOC3021 та силовий симістор ВТА16-600В.

Такий спосіб керування дозволяє забезпечити гальванічну розв'язку між низьковольтною частиною схеми, де працює мікроконтролер АТmega328Р, та силовою частиною, яка керує навантаженням змінного струму 220 В.

Оптосимістор МOC3021 виконує функцію електричної ізоляції та передає керуючий сигнал від мікроконтролера до силового симістора. Симістор ВТА16-600В виконує комутацію навантаження змінного струму.

Розрахунок резистора на вході МOC3021

Вхід МOC3021 містить світлодіод, тому для обмеження струму необхідно встановити послідовний резистор.

Опір резистора визначається за формулою:

$$R = (U_{МК} - U_{LED}) / I_{LED}$$

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

де:

R – опір резистора, Ом;

$U_{МК}$ – напруга виходу мікроконтролера, В;

U_{LED} – пряме падіння напруги на світлодіоді оптосимістора, В;

I_{LED} – струм через світлодіод оптосимістора, А.

Приймаємо:

$U_{МК} = 5$ В;

$U_{LED} = 1,2$ В;

$I_{LED} = 0,01$ А.

Підставимо значення:

$R = (5 - 1,2) / 0,01$

$R = 3,8 / 0,01$

$R = 380$ Ом

Найближче стандартне значення резистора:

$R = 330$ Ом

Перевіримо струм при використанні резистора 330 Ом:

$I_{LED} = (U_{МК} - U_{LED}) / R$

$I_{LED} = (5 - 1,2) / 330$

$I_{LED} = 0,0115$ А

$I_{LED} = 11,5$ мА

Отриманий струм є допустимим для входу МС3021 і забезпечує надійне спрацювання оптосимістора.

Розрахунок струму навантаження симістора ВТА16

Симістор ВТА16-600В використовується для комутації вентилятора змінного струму.

Прийmemo потужність вентилятора:

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

$$P = 60 \text{ Вт}$$

Напруга мережі:

$$U = 220 \text{ В}$$

Струм навантаження визначається за формулою:

$$I = P / U$$

Підставимо значення:

$$I = 60 / 220$$

$$I = 0,27 \text{ А}$$

Максимально допустимий струм симістора ВТА16 становить 16 А.

Коефіцієнт запасу за струмом визначається за формулою:

$$K = I_{\text{max}} / I$$

де:

I_{max} – максимально допустимий струм симістора;

I – робочий струм навантаження.

Підставимо значення:

$$K = 16 / 0,27$$

$$K = 59,3$$

Отже, симістор ВТА16-600В має значний запас за струмом і може безпечно використовуватися для керування вентилятором змінного струму.

Розрахунок резистора керуючого електрода Gate

Для обмеження струму керуючого електрода симістора використовується резистор у колі Gate.

Опір резистора визначається за формулою:

$$R_{\text{gate}} = U / I_{\text{gate}}$$

де:

R_{gate} – опір резистора в колі керуючого електрода, Ом;

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

U – напруга керування, В;

I_{gate} – струм керуючого електрода, А.

Приймаємо:

$U = 5$ В;

$I_{gate} = 0,015$ А.

Підставимо значення:

$R_{gate} = 5 / 0,015$

$R_{gate} = 333$ Ом

Найближче стандартне значення:

$R_{gate} = 330$ Ом

Отже, у колі керування симістором використовується резистор номіналом 330 Ом.

Висновок

Проведені розрахунки підтверджують можливість використання оптосимістора МОС3021 та симістора ВТА16-600В для керування навантаженням змінного струму.

Оптосимістор забезпечує електричну ізоляцію мікроконтролера від силової частини схеми, а симістор ВТА16-600В має достатній запас за струмом для керування вентилятором та іншими виконавчими пристроями системи HVAC.

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

ВИСНОВКИ

У результаті виконання роботи було досліджено особливості організації мікроклімату чистих приміщень та проаналізовано основні вимоги міжнародних стандартів ISO 14644 і GMP щодо контролю параметрів повітряного середовища.

Під час виконання роботи розглянуто основні параметри мікроклімату чистих приміщень, а саме температуру, відносну вологість, атмосферний тиск та якість повітря. Проведений аналіз показав, що підтримання зазначених параметрів у встановлених межах є необхідною умовою забезпечення належного функціонування технологічних процесів у фармацевтичній, медичній, електронній та інших галузях промисловості.

У роботі виконано аналіз сучасних засобів автоматизації та сенсорних систем, які використовуються для моніторингу параметрів мікроклімату. На основі порівняльного аналізу було обрано мікроконтролер ATmega328P, датчик температури та вологості DHT22, датчик атмосферного тиску BMP280, датчик контролю якості повітря MQ-135 та мережевий модуль ENC28J60.

Було розроблено структурну та принципову схеми системи моніторингу та регулювання мікроклімату чистого приміщення. Для автоматичного керування виконавчими пристроями використано вентилятор, кондиціонер, нагрівач та зволожувач повітря. Керування навантаженнями здійснюється через оптосимістор МОС3021 та силовий симістор ВТА16-600В.

Розроблено алгоритм автоматичного контролю параметрів мікроклімату, який забезпечує безперервне опитування сенсорів, аналіз отриманих даних та автоматичне керування виконавчими пристроями відповідно до встановлених порогових значень.

Практична перевірка працездатності системи була виконана шляхом моделювання в середовищі Proteus 8 Professional. Результати тестування підтвердили коректність роботи сенсорів, правильність функціонування алгоритмів керування та працездатність системи аварійного оповіщення.

У ході виконання розрахунків визначено параметри джерела живлення, вузла розподілу напруги, кварцового генератора, світлодіодної індикації та оптосимісторного вузла керування. Проведені розрахунки підтвердили можливість використання обраної елементної бази для реалізації поставленого завдання.

Отримані результати свідчать про те, що розроблена система забезпечує ефективний моніторинг та автоматичне регулювання параметрів мікроклімату чистого приміщення відповідно до вимог стандартів ISO 14644 та GMP.

Перспективним напрямком подальшого розвитку системи є розширення функцій віддаленого моніторингу, інтеграція з промисловими системами

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

диспетчеризації, використання хмарних сервісів для зберігання даних та впровадження додаткових датчиків контролю параметрів повітряного середовища.

ЕРС
ІТФ
Ф
У
Ж
Т
У

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ISO 14644-1:2015 Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration. Geneva : International Organization for Standardization, 2015. 29 p.
2. ISO 14644-2:2015 Cleanrooms and associated controlled environments – Part 2: Monitoring to provide evidence of cleanroom performance related to air cleanliness by particle concentration. Geneva : International Organization for Standardization, 2015. 19 p.
3. EudraLex. The Rules Governing Medicinal Products in the European Union. Volume 4. Good Manufacturing Practice (GMP). Annex 1 : Manufacture of Sterile Medicinal Products. Brussels : European Commission, 2022. 59 p.
4. WHO good manufacturing practices for heating, ventilation and air-conditioning systems for non-sterile pharmaceutical dosage forms. Geneva : World Health Organization, 2018. 84 p.
5. ASHRAE Handbook. HVAC Systems and Equipment. Atlanta : ASHRAE, 2024. 1056 p.
6. ASHRAE Handbook. HVAC Applications. Atlanta : ASHRAE, 2023. 1120 p.
7. ATmega328P Datasheet / Microchip Technology Inc. Chandler : Microchip Technology, 2021. 660 p.
8. DHT22 (AM2302) Digital Temperature and Humidity Sensor Datasheet / Aosong Electronics Co. Ltd. Guangzhou, 2021. 10 p.
9. BMP280 Digital Pressure Sensor Datasheet / Bosch Sensortec GmbH. Reutlingen, 2022. 54 p.
10. MQ-135 Gas Sensor Datasheet / Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd. Zhengzhou, 2021. 6 p.
11. ENC28J60 Stand-Alone Ethernet Controller with SPI Interface Datasheet / Microchip Technology Inc. Chandler : Microchip Technology, 2022. 70 p.
12. MOC3021 Optically Isolated Triac Driver Datasheet / onsemi. Phoenix, 2021. 8 p.
13. BTA16-600B Triac Datasheet / STMicroelectronics. Geneva, 2022. 12 p.
14. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. Hopkinton : Modbus Organization, 2012. 50 p.
15. Arduino IDE Documentation. Arduino Official Documentation. 2024.
16. Proteus Design Suite User Guide. Version 8 Professional / Labcenter Electronics Ltd. Yorkshire, 2024. 850 p.
17. Bolton W. Programmable Logic Controllers. 7th ed. Oxford : Newnes, 2021. 376 p.
18. Petruzella F. D. Programmable Logic Controllers. 6th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2020. 432 p.
19. Webb J. W., Reis R. A. Process Control Instrumentation Technology. 9th ed. Boston : Pearson Education, 2019. 768 p.
20. Wang L. Intelligent HVAC Control Systems and Building Automation. Cham : Springer, 2021. 418 p.

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

21. Çengel Y. A., Boles M. A. Thermodynamics: An Engineering Approach. 9th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2019. 1024 p.

22. Khandpur R. S. Handbook of Biomedical Instrumentation. 4th ed. New Delhi : McGraw-Hill Education, 2020. 1100 p.

23. Sedra A. S., Smith K. C. Microelectronic Circuits. 8th ed. Oxford : Oxford University Press, 2020. 1488 p.

24. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 3rd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2015. 1225 p.

25. Fundamentals of Data Acquisition Systems. Austin : National Instruments, 2021. 245 p.

ЕЦІТФ
УЖТФ

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Додатки

Додаток А Схема електрична структурна КРБ.ЕС.10314325.001. Е1

Додаток Б Схема електрична принципова КРБ.ЕС.10314325.001. Е3

Додаток В Перелік елементів КРБ.ЕС.10314325.001. ПЕ

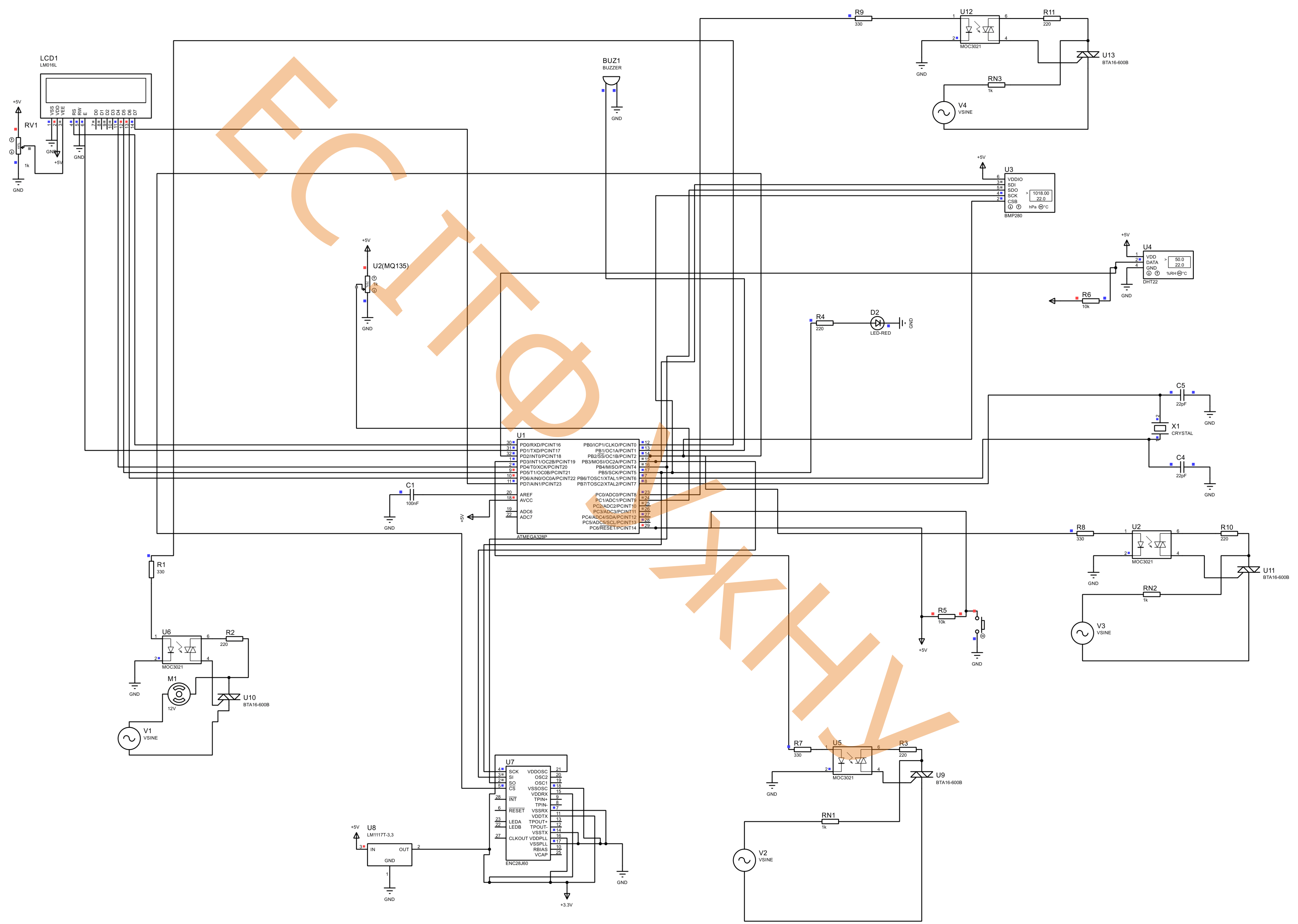
Додаток Г Специфікація КРБ.ЕС.10314325.001. СП

					КРБ.ЕС.10314325.001.ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Поз. позн-чення	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Резистори</u>		
R1, R7, R8, R9	Резистор 330 Ом ±5%	4	0,25 Вт
R2, R3, R4, R10, R11	Резистор 220 Ом ±5%	5	0,25 Вт
R5, R6	Резистор 10 кОм ±5%	2	0,25 Вт
RV1	Потенціометр 1 кОм	1	Регулювання контрастності LCD
	<u>Конденсатори</u>		
C1	Конденсатор 100 нФ	1	Керамічний
C4, C5	Конденсатор 22 пФ	2	Керамічний
	<u>Мікросхеми та модулі</u>		
U1	Мікроконтролер ATmega328P-PU	1	Основний контролер
U2, U5, U6, U12	Оптосимістор MOC3021	2	Керування симісторами
U7	Ethernet-контролер ENC28J60	1	Передача даних мережею Ethernet
U8	Стабілізатор напруги LM1117-3.3	1	Живлення ENC28J60
	<u>Індикатори та сигналізація</u>		
LCD1	РК-дисплей LM016L (16×2)	1	Відображення параметрів
BUZ1	Звуковий сигналізатор (Buzzer)	1	Аварійна сигналізація

КРБ.ЕС.10314325.001.ПЕ					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	
Розробив		Терещенко А.В.			
Перевірив		Спесивих О.О.			
Т/Контр.					
Н/Контр.		Папн О.В.			
Затвердив		Заяць Т. М.			
Система моніторингу та регулювання мікроклімату «чистих» приміщень			Літера	Аркуш	Аркушів
			У	1	2
			УжНУ, ІТФ		
			4 курс, гр. ЕС		





				КРБ.ЕС.10314.325.001.E3			
Зм.	Арк.	№ докум.	Піп.	Дата.			
Розроб.	Терешенко А.В.				Літера	Арк.	Архивів
Перевір.	Слесивих О.О.				У		1
№ контр.					УжНУ, ІТФ, гр.ЕС, 4-курс		
Затв.							

Система моніторингу та регулювання мікроклімату чистих приміщень

Завідувачу кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ

К.ф-м.н. доц. Зявко Тарас Михайлович

Студента (-ки) 4 курсу
спеціальності 171 Електроніка
Терещанко А.В.
(прізвище, ініціали)

ЗАЯВА

щодо самостійного виконання
навчальної/кваліфікаційної роботи здобувачем освіти

Я, Терещанко Артем Валерійович
(прізвище, ім'я, по батькові),

Студент(-ка) дзша, інженерно-технічний, ч
(форма навчання, факультет, курс)

заявляю: моя письмова робота на тему: Система моніторингу та регулювання мікроклімату "чистих" приміщень

виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату.

Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше робіт мають відповідні посилання. Я ознайомлений(а) з діючим Положенням, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску навчальної/кваліфікаційної роботи до захисту та притягнення до академічної відповідальності.

17.06.2026
Дата

А.В.
Підпис



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

2026_КБР_ТЕРЕЩЕНКО.А.В.

Автор

Артем Терещенко

Науковий керівник / Експерт

Ігор Михайлович Юркін

ІД документу

334349349

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

Uzhhorod National University

підрозділ

Department

ЗВІТ

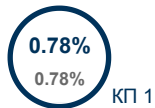
Дата звіту

6/17/2026

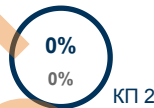
Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.

**25**

Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2

**4868**

Кількість слів

**39169**

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		0
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		2