

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

До захисту допущено:
В.о. завідувача кафедри
_____ Наталія ЗАЩЕПКІНА
« » червня 2026 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні
технології»
спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
на тему: «Система моніторингу вологісно-теплових полів у виробничих
приміщеннях»**

Виконав:
Студент IV курсу, групи ПІ-21
Шиш Ярослав Васильович _____

Керівник:
Доктор технічних наук
Шевченко Костянтин Леонідович _____

Рецензент:
доцент, к.т.н.
Богдан Галина Анатоліївна _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

КИЇВ – 2026

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДПБ.ПІ-21.13.5390.01.001.ТЗ	Технічне завдання	3	
3	A4	ДПБ.ПІ-21.13.5390.01.001.ПЗ	Пояснювальна записка	50	
4	A4	ДПБ.ПІ-21.13.5390.01.001.СхС	Схема структурна	1	
5	A4	ДПБ.ПІ-21.13.5390.01.001.СхФ	Схема функціональна	1	
6	A1	ДПБ.ПІ-21.13.5390.01.001.СхЕ	Схема електрична принципова	1	
7					
8					
9					
10					

				ДПБ.ПІ-21.13.5390.01.001.ДП		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Шиш Я.В.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Шевченко К.Л.				1	60
Консульт					КП ім. Ігоря Сікорського Каф. ІВТ Гр.ПІ-21	
Н/контр.						
Зав.каф.						

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ІВТ

_____ проф. Володимир ЄРЕМЕНКО

« ____ » _____ 2026 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт

**«Система моніторингу вологісно-теплових полів у виробничих
приміщеннях»**

ДПБ.ПІ-21.13.5390.01.001.ТЗ

УЗГОДЖЕНО:

Дипломник:

Керівник дипломного проєкту

Ст. гр.ПІ-21

Доктор технічних наук _____

Шиш Я.В.

(Посада)

(Прізвище І.ПБ.)

Шевченко К.Л. _____

(Прізвище .І.ПБ.)

« ____ » _____ 2026 р

« ____ » _____ 2026 р. Залікова книжка _____

Київ 2026

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту

на тему: «Система моніторингу вологісно теплових полів у виробничих приміщеннях»

КИЇВ – 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ	10
1.1 Аналіз параметрів вологісно-теплових полів.....	10
1.2 Порівняльний аналіз існуючих систем	11
1.3 Нормативна база.....	12
1.4 Огляд сучасних методів та засобів вимірювання.....	14
2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ.....	16
2.1 Первинні перетворювачі температури та вологості	16
2.2 Мікроконтролер STM32F103C8T6.....	19
2.3 Серверний модуль на базі Raspberry Pi.....	20
2.4 Веб-інтерфейс користувача.....	22
3. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ	25
3.1 Блок вимірювання	26
3.2 Блок передачі даних.....	27
3.3 Блок збору та зберігання даних	27
3.4 Блок обробки та аналізу.....	27
3.5 Блок відображення	28
3.6 Блок сповіщень.....	28

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01.001.ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Шуш Я.В.				Пояснювальна записка	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.	Шевченко К.Л.						5	
Н. Контр.						КПІ ім. І. Сікорського, ПБФ		
Затв.	Защепкіна Н.М.							

4.	РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ.....	29
4.1	Вузол живлення.....	30
4.2	Мікроконтролерний вузол (DD1)	32
4.3	Вузол вимірювання (DD2).....	32
4.4	Вузол передачі даних (DD3, DD4).....	33
4.5	Електричні параметри схеми	34
5.	РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА	36
5.1	Розрахунок похибки вимірювання системи	36
5.1.1	Похибка вимірювання температури.....	36
5.1.2	Похибка вимірювання відносної вологості	37
5.2	Розрахунок режиму живлення	38
5.2.1	Споживаний струм вузла.....	38
5.2.2	Тепловий режим стабілізатора AMS1117-3.3	38
5.2.3	Необхідна потужність джерела живлення.....	39
5.3	Розрахунок завадостійкості шини RS-485.....	40
5.3.1	Максимальна довжина лінії	40
5.3.2	Запас завадостійкості	40
5.4	Розрахунок часових параметрів циклу опитування.....	41
5.4.1	Часові параметри Modbus RTU.....	41
5.4.2	Повний цикл опитування.....	41
5.5	Висновки за розрахунками.....	42
6.	АПРОБАЦІЯ СИСТЕМИ НА РЕАЛЬНИХ ДАНИХ ВИМІРЮВАНЬ.....	43
6.1	Умови проведення вимірювань	43
6.2	Статистичні характеристики вимірювань	45

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						6
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.3 Тижневий аналіз динаміки параметрів мікроклімату	45
6.4 Аналіз відхилень параметрів від нормативних значень.....	46
6.5 Верифікація метрологічних характеристик системи.....	47
6.6 Висновки за результатами апробації.....	48
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						7
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасні виробничі приміщення є середовищем, де створюються складні мікрокліматичні умови, що значною мірою впливають на ефективність технологічних процесів, якість продукції, а також на здоров'я і комфорт працівників. Одним з ключових факторів, що визначають стан мікроклімату, є вологісно-теплові поля, які відображають розподіл температури та вологості повітря в межах приміщення. Правильний контроль цих параметрів дозволяє уникнути багатьох проблем, пов'язаних із корозією обладнання, утворенням конденсату, порушенням технологічних режимів або погіршенням умов праці.

У зв'язку з цим виникає необхідність впровадження систем моніторингу вологісно-теплових полів, які здатні забезпечувати безперервний збір, аналіз і збереження даних про стан мікроклімату в реальному часі. Такі системи допомагають не лише виявляти відхилення від нормативних показників, а й прогнозувати можливі аварійні ситуації, що дає змогу своєчасно вживати заходів для їх запобігання. Впровадження сучасних технологій автоматизованого моніторингу підвищує рівень безпеки виробництва, знижує енергоспоживання та оптимізує умови праці.

Актуальність теми обумовлена зростаючими вимогами до енергозбереження та екологічної безпеки в промисловості, а також прагненням до підвищення продуктивності виробництва за рахунок зменшення втрат, пов'язаних із несприятливими мікрокліматичними умовами. Без якісного моніторингу вологісно-теплових характеристик важко забезпечити стабільність технологічних процесів і дотримання нормативних стандартів, що призводить до значних економічних збитків.

Метою роботи є розробка та дослідження ефективної системи моніторингу вологісно-теплових полів у виробничих приміщеннях, яка включає вибір і розміщення датчиків, збір і обробку даних, а також їх інтеграцію у загальну систему управління мікрокліматом.

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити задачі аналізу існуючих методів моніторингу, розробки архітектури системи, вибору оптимальних технічних засобів, а також апробації розробленого рішення на прикладі конкретного виробничого приміщення.

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						9
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ

1.1 Аналіз параметрів вологісно-теплових полів

Об'єктом дослідження було обрано вологісно теплові поля для виробничих приміщень. Ключові параметри для вимірювання є температура (T , °C) та відносна вологість (ϕ , %). В більшості випадків ці величини мають нерівномірний розподіл у великих приміщеннях.

На виробництві дуже важливо забезпечити стабільність вимірювань $\Delta T < 0.5$ °C. Оскільки існують фактори які впливають на вимірювальні поля а саме: тепловиділення від обладнання, робота систем вентиляції, сонячна інсоляція та наявність персоналу.

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						10
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Порівняльний аналіз існуючих систем

Для дипломного проекту було проведено порівняльний аналіз чотирьох моніторингових систем кліматичних параметрів, що представлені на українському ринку або використовуються на підприємстві обґрунтування вибору технічних рішень.

Таблиця 1.1

Порівняльний аналіз систем моніторингу вологісно-теплових параметрів

Параметр	DLT-01 (ao-tera) [1]	Testo 162 T1 WiFi [2]	Систем STM32 + SHT30 (власна) [3]	FLUKE 971 [4]
Похибка вимірювання T, °C	±0.3 °C	±0.3 °C	±0.2 °C	±0.5 °C
Похибка вимірювання φ, %	±2%	±2%	±2%	±2.5%
Інтерфейс зв'язку	USB	Wi-Fi	Wi-Fi / RS-485	USB / Bluetooth
Живлення	Батарея Li	Батарея / мережа	Мережа 5В (USB)	Батарея AA
Хмарний моніторинг	Ні	Так (testo Cloud)	Так (SQL + веб)	Ні
Кількість точок	1–3	1	До 16	1
Відкритий протокол	Ні	Ні	Так	Ні
Орієнтовна вартість	~2 500 грн	~8 000 грн	~1 800 грн	~12 000 грн
Головна перевага	Сертифік. ЗВТ, компактність	Надійність, відповідність GxP	Гнучкість, масштабованість	Висока метрологічна якість
Головний недолік	Немає онлайн-доступу	Висока ціна, 1 точка	Потребує розробки	Дуже висока ціна

Отже переглянувши таблицю 1.1 можемо зробити висновок, що жодна з комерційних систем не може поєднати в собі одночасно: відкритий протокол, підтримку множинних точок вимірювання, хмарну архівацію та прийнятну вартість. Реєстратор DLT-01 є сертифікованим ЗВТ, проте не підтримує онлайн-доступ. Testo 162 T1 відповідає вимогам GxP, але контролює лише одну точку і має значну вартість. FLUKE 971 є переносним приладом і не призначений для стаціонарного моніторингу.

Розроблювана система на базі STM32 + SHT30 буде оптимальним рішенням за критерієм «точність / функціональність / вартість» для задачі дипломного проекту.

1.3 Нормативна база

Відповідно до чинної нормативної правової бази України а також міжнародних стандартів розробки було розроблено та впроваджено систему моніторингу вологісно-теплових полів для виробничих приміщень за усіма відповідними нормами стандартів

Документом який є регламентом та допустимим параметром на робочому місці, є ДСН 3.3.6.042-99 “Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень” [5]. Цей документ був затверджений постановою Головного державного санітарного лікаря України з 01.12.1999 № 42. На основі цього документу було виявлено, що між поєднаннями температури в виробничих приміщеннях та вологості на території, та швидкості руху повітря були встановлені додаткові умови операторського типу такі як: основний показник температури 22-24 °С, відносна вологість в межах від 60 до 40% ,швидкість руху повітря повинна бути не більше 0,1 м/с. Дотримання цих параметрів є обов’язковою умовою, що в свою чергу зможуть забезпечити нормальний тепловий режим працівників без ризику підвищеного навантаження терморегуляції працівника.

У сфері вимірювання температури та вологості Метрологічна діяльність регулюється Законом України “Про метрологію та метрологічну діяльність” від 05.06.2014 № 1314-VII [6], який визначає правові основи забезпечення єдності вимірювань, вимог до засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та порядок їх перевірки та калібрування.

Для компетентності вимог вимірювальних лабораторій використовується такий документ як ДСТУ EN ISO/IEC 17025 :2019 “Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій” [7]

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						12
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблювальна система моніторингу вологісно-теплових полів опирається на стандарти та державні еталони визначення критеріїв системи управління якістю, а також вимоги документування, зберігання та архівування даних.

Характеристики первинних перетворювачів температури – платинових терморезисторів типу Pt100 та Pt1000 – регламентуються міжнародним стандартом ІЕС 60751 :2022 «Промислові платинові термометри опору та платинові датчики температури» [8]. Стандарт встановлює базовий опір 100 Ом при 0 °С, температурний коефіцієнт опору 0,00385 Ом/Ом/°С, а також класи елементів точності та термометрів у зборі. Починаючи з редакції 2008 року, вимогам класу точності має відповідати не лише чутливий елемент, а й термометр у повній комплектації. Для досягнення класу А і вище необхідне чотирипровідне підключення, що виключає вплив опору з'єднувальних проводів на результат вимірювання.

Окремою складовою нормативної бази проекту є вимоги охорони праці. Розроблена система моніторингу вологісно-теплових полів функціонує у виробничих приміщеннях і передбачає роботу оператора з електронним обладнанням: мікроконтролерними вузлами на базі STM32F103C8T6, цифровими сенсорами SHT30-DIS, шиною RS-485, серверним модулем Raspberry Pi 4B та персональним комп'ютером (АРМ оператора). Забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці при розробці, монтажі, налагодженні та експлуатації системи регулюється чинним законодавством України та відповідними нормативно-правовими актами.

Основними нормативними документами у сфері охорони праці, що застосовуються при виконанні дипломного проекту, є: Закон України “Про охорону праці” від 14.10.1992 № 2694-ХІІ; НПАОП 0.00-1.28-10 “Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин”; ДСанПіН 3.3.2.007-98 “Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами ЕОМ”; ДСТУ EN 60950-1:2014 щодо

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						13
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безпеки обладнання інформаційних технологій; а також ПУЕ (7-е видання) стосовно вимог до електроустановок.

1.4 Огляд сучасних методів та засобів вимірювання

Для моніторингу полів використовують багатоканальні системи.
Основні типи сенсорів:

1. Платинові терморезистори (Pt100): висока стабільність та метрологічна точність.
2. Цифрові сенсори (типу DHT22, SHT3х): зручні для інтеграції в мікропроцесорні системи, мають цифровий вихід I2C.
3. Бездротові логери: дозволяють проводити моніторинг без прокладання кабельних ліній.

Логери DLT-01, DLT-02, DLT-10 і DLT-11 – це невеликі електронні пристрої, які вимірюють і записують дані про температуру і вологість повітря у власну пам'ять. Крім вбудованого сенсора температури і вологості повітря, до логера можна додатково підключити один (DLT-01) або два (DLT-10, DLT-11) зовнішніх датчиків температури через роз'єм USB. До моделей DLT-10-AT (2AT) можна підключати зовнішні датчики з виходом 4-20 мА. Логер підключається до комп'ютера через USB порт для задання параметрів і вилучення записаних даних за допомогою безкоштовного програмного забезпечення LoggerSoft. Дані в пам'яті логера можуть також зберігатися в форматах CSV або PDF. Живлення логера здійснюється від змінної літєвої батареї [1].

В якості зовнішнього датчика температури можливе виготовлення будь-якої моделі термоперетворювача з НСХ Pt1000 [9] або ХА, 2-х провідною схемою з'єднання і кабелем РЕ згідно з розділом “Термоперетворювачі». Замовлення здійснюється за формою запису умовного позначення в розділі

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

“Термоперетворювачі”, до коду моделі термоперетворювача потрібно додати “-USB3”.

Логери сертифіковані по техрегламенту законодавчо регульованих ЗВТ (Постанова КМУ №94 від 13.01.2016) у сфері контролю температури зберігання лікарських засобів і харчових продуктів [10].

WiFi-реєстратор температури testo [2] 162 T1 забезпечує постійний моніторинг температурного режиму продукції у холодильному обладнанні, на складах або під час транспортування. Термолoger ідеально підходить для контролю холодового ланцюга відповідно до вимог стандартів CFR, GxP, НАССР і ДСТУ EN 12830:2018.



Рисунок 1.1 – testo 162 T1 WiFi логер

Джерело: [2]

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						15
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

За результатами аналізу, проведеного під час практики, для дипломного проекту пропонується наступна архітектура системи:

- Мікроконтролер: STM32F103C8T6 (ARM Cortex-M3, 72 МГц) – достатня обчислювальна потужність, наявна периферія I2C/UART/SPI, низьке енергоспоживання;
- Сенсори: SHT30-DIS (Sensirion) – цифровий інтерфейс I2C, похибка вимірювання ± 0.2 °C та $\pm 2\%$ ф, відповідає вимогам ДСТУ EN ISO/IEC 17025;
- Мережа: до 16 вузлів вимірювання, об'єднаних через RS-485 (Modbus RTU) або Wi-Fi (ESP8266);
- Сервер: Raspberry Pi або ПК під управлінням Linux з базою даних SQLite/PostgreSQL та веб-інтерфейсом на Flask для візуалізації полів у реальному часі;
- Відображення: кольорова теплова карта приміщення з ізотермами та ізогірами, що оновлюється щохвилини.

Очікувані метрологічні характеристики системи: похибка вимірювання температури – не більше ± 0.3 °C, вологості – не більше $\pm 2.5\%$. Система буде здатна формувати автоматичні сповіщення при виході параметрів за допустимі межі та архівувати дані для подальшого аналізу.

Такий підхід дозволить створити гнучкий, масштабований і економічно доцільний інструмент для метрологічних лабораторій, де необхідно документувати кліматичні умови згідно з ISO/IEC 17025.

2.1 Первинні перетворювачі температури та вологості

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						16
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Первинні перетворювачі є основним елементом сенсорного рівня системи моніторингу вологісно-теплових полів. Їх характеристики визначають метрологічні показники всієї системи та безпосередньо впливають

на відповідність вимогам ДСН 3.3.6.042-99 [5] і ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 [7].

У якості первинного перетворювача температури та відносної вологості повітря обрано цифровий сенсор SHT30-DIS виробництва Sensirion AG (Швейцарія) [11]. Сенсор реалізований на основі технології CMOSens, яка інтегрує чутливі елементи та цифровий інтерфейс в єдиному корпусі типу DFN розміром 2,5×2,5×0,9 мм.

Передача даних від сенсора до мікроконтролера здійснюється по двопровідній шині I²C зі швидкістю до 1 МГц. Кожен пакет даних містить 6 байт: 2 байти сирих даних температури, 1 байт контрольної суми CRC-8, 2 байти сирих даних вологості та 1 байт контрольної суми CRC-8. Перевірка CRC за поліномом 0x31 забезпечує виявлення помилок передачі, що відповідає вимогам метрологічної простежуваності згідно з ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 [7].

Основні технічні характеристики сенсора наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики сенсора SHT30-DIS [11]

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання температури	−40 ... +125 °C
Похибка вимірювання температури	±0,2 °C (діапазон 0...65 °C)
Діапазон вимірювання вологості	0 ... 100 % RH
Похибка вимірювання вологості	±2 % RH (діапазон 10...90 %)
Інтерфейс зв'язку	I ² C (до 1 МГц)
Напруга живлення	2,15 ... 5,5 В
Час одного вимірювання	≤ 15 мс (режим High Repeatability)
Адреса на шині I ² C	0x44 або 0x45 (вибір пін ADDR)
Ступінь захисту (з корпусом)	IP67
Робоча температура	−40 ... +125 °C

Адресація сенсорів на шині I²C визначається станом пін ADDR: при підключенні до GND сенсор отримує адресу 0x44, при підключенні до VDD – 0x45. За необхідності підключення більше двох сенсорів до одного

мікроконтролера застосовується мультиплексор І²С типу ТСА9548А, що забезпечує до 8 незалежних каналів.

Перетворення сирих значень у фізичні величини виконується за формулами, визначеними виробником:

$$T (^{\circ}\text{C}) = -45 + 175 \cdot (S_t / 65535)$$

$$\varphi (\%) = 100 \cdot (S_{rH} / 65535)$$

де S_t та S_{rH} – сирі 16-бітні значення температури та вологості відповідно.

Розміщення точок вимірювання здійснюється відповідно до вимог ДСН 3.3.6.042-99. Сенсори встановлюються на висоті 1,0 м від рівня підлоги, що відповідає зоні дихання працівника при виконанні робіт сидячи. Відстань від зовнішніх стін має становити не менше 1,0 м, від локальних джерел тепла – не менше 1,5 м.

Мінімальна кількість точок вимірювання залежно від площі приміщення визначається відповідно до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Мінімальна кількість точок вимірювання (ДСН 3.3.6.042-99) [5]

Площа приміщення, м ²	Мінімальна кількість точок вимірювання
До 100	4
100 ... 400	8
Понад 400	16

Система підтримує одночасне підключення до 16 вузлів вимірювання, що достатньо для моніторингу приміщень площею до 400 м² відповідно до вимог нормативного документа. Для забезпечення рівномірного покриття вимірювальної мережі вузли розміщуються у вузлах рівномірної сітки з кроком, що не перевищує половину характерного розміру теплового поля.



Рис.- 2.1 Структурна схема

2.2 Мікроконтролер STM32F103C8T6

Мікроконтролер є центральним елементом вузла вимірювання та виконує функції збору даних із сенсорів, їх первинної обробки та передачі на верхній рівень системи. До основних вимог, що висуваються до мікроконтролера, належать: наявність апаратного інтерфейсу I²C для підключення сенсорів SHT30-DIS, підтримка протоколу Modbus RTU через інтерфейс UART, достатня обчислювальна потужність для виконання перевірки CRC та перетворення даних у реальному часі, а також надійна робота в умовах промислового середовища.

У якості мікроконтролера вузла вимірювання обрано STM32F103C8T6 виробництва STMicroelectronics на основі 32-бітного ядра ARM Cortex-M3 [12]. Мікроконтролер належить до серії STM32F1, яка орієнтована на промислові застосування та характеризується детермінованим виконанням інструкцій, широким набором периферійних модулів та підтримкою роботи в розширеному температурному діапазоні. Основні технічні характеристики наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Технічні характеристики мікроконтролера STM32F103C8T6

Параметр	Значення
Ядро процесора	ARM Cortex-M3, 32-біт
Тактова частота	до 72 МГц
Flash-пам'ять	64 КБ
Оперативна пам'ять (SRAM)	20 КБ
Інтерфейси	I ² C, UART, SPI, USB, CAN
Таймери	7 таймерів (16-біт і 32-біт)
АЦП	2 × 12-біт, 10 каналів
Напруга живлення	2,0 ... 3,6 В
Робочий діапазон температур	-40 ... +85 °C
Корпус	LQFP-48

Для реалізації функцій системи моніторингу використовуються такі периферійні модулі мікроконтролера: апаратний I²C1 для опитування сенсора

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

SHT30-DIS; USART1 у режимі напівдуплекс для реалізації інтерфейсу RS-485 через зовнішній приймач-передавач MAX485; таймер TIM2 для формування точних часових інтервалів протоколу Modbus RTU (пауза 3,5 символи між кадрами); USART2 для зв'язку з Wi-Fi модулем ESP8266 через AT-команди.

Прошивка мікроконтролера розроблена з використанням бібліотеки HAL (Hardware Abstraction Layer) в середовищі STM32CubeIDE. Цикл роботи вузла складається з трьох послідовних етапів: опитування сенсора по I²C з перевіркою CRC, запис результату в регістри Modbus Holding Registers та очікування запиту від master-пристрою.

Для підключення до шини RS-485 використовується зовнішній приймач-передавач MAX485, який забезпечує перетворення рівнів сигналів UART (3,3 В) на диференційний сигнал RS-485 з рівнями $\pm 1,5$ В. Перемикання між режимами прийому та передачі виконується через GPIO-пін DE/RE мікроконтролера. Швидкість обміну складає 9600 бод, що при довжині шини до 100 м забезпечує надійну передачу без регенераторів сигналу. Кожен вузол отримує унікальну адресу Modbus в діапазоні 1–16, яка задається апаратно через DIP-перемикачі або зберігається у Flash-пам'яті мікроконтролера.

2.3 Серверний модуль на базі Raspberry Pi

Серверний модуль виконує функції централізованого збору, зберігання та обробки даних від усіх вузлів вимірювання. До основних вимог належать: підтримка підключення до шини RS-485 через USB-адаптер або Ethernet-шлюз, наявність операційної системи для виконання серверного програмного забезпечення, достатній обсяг пам'яті для тривалого архівування даних та підтримка мережевого інтерфейсу для надання доступу до веб-інтерфейсу.

Як апаратну платформу серверного модуля обрано одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 Model B з оперативною пам'яттю 4 ГБ.

Порівняльний аналіз доступних моделей наведено в таблиці 2.4.

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						20
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняльна характеристика моделей Raspberry Pi [13]

Параметр	Raspberry Pi 4B	Raspberry Pi Zero 2W
Процесор	Cortex-A72, 4 ядра, 1.8 ГГц	Cortex-A53, 4 ядра, 1.0 ГГц
RAM	2 / 4 / 8 ГБ	512 МБ
USB	2×USB 3.0, 2×USB 2.0	1×micro-USB OTG
Ethernet	Gigabit Ethernet	відсутній
Wi-Fi	802.11ac (2.4/5 ГГц)	802.11b/g/n (2.4 ГГц)
GPIO	40 пін	40 пін
Живлення	5B / 3A (USB-C)	5B / 2.5A (micro-USB)
ОС	Raspberry Pi OS (Linux)	Raspberry Pi OS (Linux)

Перевагою Raspberry Pi 4B є наявність Gigabit Ethernet, що забезпечує стабільний мережевий доступ до веб-інтерфейсу в межах локальної мережі підприємства, та достатній обсяг RAM для одночасного виконання серверного застосунку, СУБД та веб-сервера. Операційна система – Raspberry Pi OS (Debian-based Linux), що надає повну підтримку мови програмування Python та необхідних бібліотек.

Серверне програмне забезпечення реалізоване мовою Python 3.10 та складається з трьох компонентів. Модуль збору даних використовує бібліотеку rpyc для циклічного опитування вузлів по шині RS-485 через USB-адаптер RS-485/USB з інтервалом 60 секунд. Зібрані дані записуються до бази даних SQLite з часовою міткою, ідентифікатором вузла, значеннями температури та вологості. Веб-застосунок на фреймворку Flask обробляє HTTP-запити від браузера та повертає дані у форматі JSON через REST API. Структура бази даних включає дві таблиці: nodes (ідентифікатор, назва, розташування) та measurements (ідентифікатор, вузол, час, температура, вологість).

При перевищенні порогових значень, визначених відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [5], серверний модуль формує сповіщення через SMTP (e-mail) та записує подію до журналу. Порогові значення зберігаються в конфігураційному файлі та можуть бути змінені через веб-інтерфейс без перезапуску системи.

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

2.4 Веб-інтерфейс користувача

Веб-інтерфейс є засобом відображення даних та взаємодії оператора із системою моніторингу. Він реалізований як односторінковий застосунок (SPA) з використанням HTML5, CSS3 та бібліотеки JavaScript Leaflet.js для побудови інтерактивної карти приміщення. Доступ здійснюється через стандартний веб-браузер без встановлення додаткового програмного забезпечення – як з робочих станцій локальної мережі підприємства, так і з мобільних пристроїв.

Перелік основних функцій веб-інтерфейсу наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Функції веб-інтерфейсу системи моніторингу

Функція	Опис
Теплова карта	Відображення розподілу Т та ф у вигляді кольорової карти приміщення з ізолініями
Часові графіки	Відображення трендів Т та ф по кожній точці за обраний період (1 год, 24 год, 30 днів)
Таблиця поточних значень	Зведена таблиця усіх вузлів з поточними значеннями Т, ф та часом останнього оновлення
Порогові сповіщення	Автоматичне повідомлення (e-mail, веб-сповіщення) при виході параметрів за межі ДСН 3.3.6.042-99
Журнал подій	Архів усіх перевищень порогів з часовою міткою та значенням параметра
Налаштування порогів	Ручне задання допустимих меж Т та ф для кожної зони або вузла
Експорт даних	Вивантаження архіву вимірювань у форматі CSV або PDF-звіт

Теплова карта є основним елементом інтерфейсу та відображає просторовий розподіл температури або вологості у площині приміщення. Побудова карти виконується методом бікубічної інтерполяції за значеннями у точках розташування сенсорів. Колірна шкала відповідає нормованим діапазонам ДСН 3.3.6.042-99: зелений колір відповідає оптимальним значенням, жовтий – допустимим, червоний – перевищенню норми. Ізолінії (ізотерми та ізогіри) будуються з кроком 1 °C та 5 % RH відповідно. Оператор

може перемикатись між відображенням температури та вологості, а також обирати момент часу для перегляду архівних даних [14].

Система сповіщень забезпечує своєчасне інформування відповідального персоналу про відхилення параметрів мікроклімату від встановлених норм. При перевищенні порогового значення веб-інтерфейс відображає візуальне повідомлення з зазначенням номера вузла, поточного значення параметра та часу події. Одночасно серверний модуль надсилає e-mail сповіщення на налаштовану адресу. Усі події фіксуються в журналі з можливістю фільтрації за датою, вузлом та типом параметра та можуть бути експортовані у форматі CSV для подальшого аналізу або звітності відповідно до вимог системи управління якістю підприємства.

Окремої уваги потребують умови праці оператора на автоматизованому робочому місці (АРМ), оскільки саме оператор взаємодіє з описаним веб-інтерфейсом протягом тривалого часу. Мікроклімат приміщення, де розташоване АРМ оператора, повинен відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042-99: температура повітря 22–24 °С (холодний період) та 23–25 °С (теплий), відносна вологість 40–60 %, швидкість руху повітря не більше 0,1 м/с. Саме для контролю цих параметрів і призначена розроблена система – таким чином, вона одночасно є засобом охорони праці.

Освітлення робочого місця оператора повинно відповідати ДБН В.2.5-28:2018 [24]. Для робіт з ВДТ (категорія зорових робіт “В”) нормована освітленість на рівні робочої поверхні становить 300–500 лк при загальному освітленні та 750 лк при комбінованому. Рекомендується природне бічне освітлення з лівого боку відносно оператора. Коефіцієнт пульсації освітленості – не більше 10 % (ДБН В.2.5-28:2018). Монітор повинен бути розташований так, щоб виключити відблиски від вікон та світильників.

Рівень шуму на робочому місці оператора не повинен перевищувати 50 дБА відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 для категорії робіт “переважно розумова напружена робота” [25]. Джерелами шуму є вентилятор серверного модуля (Raspberry Pi) та системний блок комп’ютера. Для зниження рівня шуму

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						23
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рекомендується встановлювати серверний модуль у шумоізовованому корпусі або виносити за межі робочої зони оператора.

Організація робочого місця оператора повинна відповідати вимогам щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями [26]. Площа на одне робоче місце з ВДТ – не менше 6,0 м², об'єм приміщення – не менше 20,0 м³. Відстань від екрана монітора до очей

оператора – 600–700 мм. Верхній край екрана має знаходитися на рівні очей або трохи нижче. Кут нахилу монітора – 10–15° від вертикалі.

Робоче крісло оператора повинно мати регульовану висоту сидіння (400–500 мм від підлоги), поперекову підтримку та підлокітники. Висота робочої поверхні столу – 680–760 мм, глибина – не менше 600 мм. Клавіатура розташовується на відстані 100–300 мм від переднього краю столу. Регламентовані перерви при роботі з ВДТ – 10 хвилин кожну годину.

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						24
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ

Функціональна схема системи моніторингу вологісно-теплових полів відображає склад функціональних блоків системи, їх призначення та інформаційні зв'язки між ними. На відміну від структурної схеми, яка описує апаратний склад, функціональна схема розкриває логіку роботи системи – що саме виконує кожен блок і яким чином відбувається обмін даними.

Система поділяється на шість функціональних блоків, які утворюють чотири ієрархічних рівні: рівень вимірювання, рівень передачі даних, рівень обробки та зберігання, рівень відображення та сповіщення. Склад функціональних блоків, їх функції та засоби реалізації наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Функціональні блоки системи моніторингу

Функціональний блок	Функції	Реалізація
Вимірювання	Опитування SHT30-DIS по I ² C; перевірка CRC-8; перетворення даних у °C та %; формування локального сигналу тривоги; передача даних по Modbus RTU	STM32F103C8T6, SHT30-DIS, MAX485
Передача даних	Передача вимірювань від вузлів до сервера по RS-485 (Modbus RTU) або Wi-Fi (MQTT); підтримка до 16 вузлів одночасно	RS-485 шина, ESP8266, MAX485
Збір та зберігання	Циклічне опитування вузлів (Modbus master); запис вимірювань у БД з міткою часу; архівування; перевірка порогових значень	Python / pymodbus, SQLite
Обробка та аналіз	Просторова інтерполяція поля T та φ; формування REST API; статистика трендів; підготовка даних для звітів	Flask, Python / scipy
Відображення	Теплова карта з ізолініями; графіки трендів; таблиця поточних значень; журнал подій; налаштування порогів; експорт звітів	HTML5, JavaScript, Leaflet.js
Сповіщення	Генерація сповіщень при виході T або φ за межі ДСН 3.3.6.042-99; веб-сповіщення; e-mail (SMTP); запис до журналу інцидентів	Python / smtplib, WebSocket

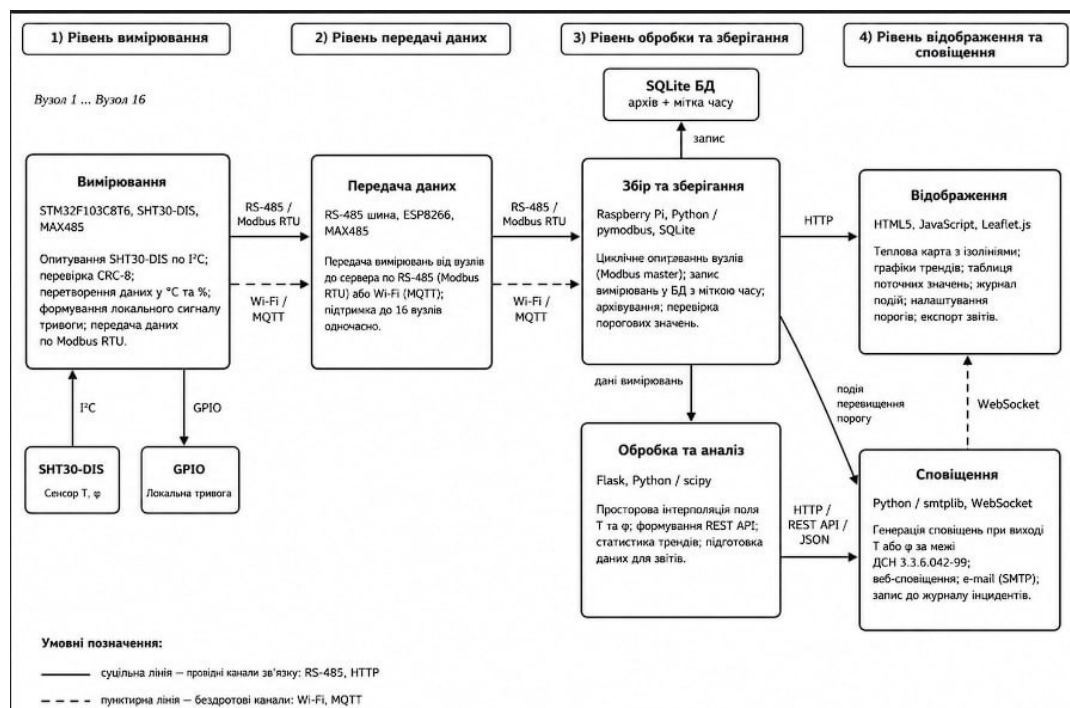


Рис. 3.1 – Функціональна схема системи моніторингу вологісно-теплових полів

3.1 Блок вимірювання

Блок вимірювання реалізований на базі мікроконтролера STM32F103C8T6 та сенсора SHT30-DIS і виконує наступні функції. По-перше, циклічне опитування сенсора по шині I²C з інтервалом 60 секунд з перевіркою цілісності даних за алгоритмом CRC-8 (поліном 0x31). По-друге, перетворення сирих 16-бітних значень у фізичні величини – температуру в градусах Цельсія та відносну вологість у відсотках – за формулами виробника. По-третє, порівняння виміряних значень з локально збереженими пороговими рівнями та формування сигналу тривоги через GPIO у разі їх перевищення. Це забезпечує автономну реакцію на критичні відхилення параметрів навіть при втраті зв'язку з сервером. По-четверте, підтримання ролі Modbus RTU Slave та обслуговування запитів від master-пристрою, зберігаючи актуальні значення у регістрах Holding Registers.

3.2 Блок передачі даних

Блок передачі даних забезпечує фізичний та логічний канал зв'язку між вузлами вимірювання і серверним модулем. Основним каналом є провідна шина RS-485 з протоколом Modbus RTU [15], що забезпечує надійну передачу в умовах електромагнітних завад виробничого середовища. Швидкість обміну складає 9600 бод, максимальна кількість вузлів на одній шині – 16. Як резервний або альтернативний канал використовується бездротова передача через модуль ESP8266 по протоколу MQTT, що застосовується у випадках, коли прокладання кабельної мережі є технічно неможливим або економічно недоцільним.

3.3 Блок збору та зберігання даних

Блок збору та зберігання реалізований на серверному модулі Raspberry Pi і виконує роль Modbus master – циклічно опитує всі зареєстровані вузли з інтервалом 60 секунд, зчитуючи значення температури та вологості з їх регістрів. Отримані дані записуються до реляційної бази даних SQLite з обов'язковою міткою часу та ідентифікатором вузла. Паралельно модуль здійснює безперервний контроль відповідності параметрів нормам ДСН 3.3.6.042-99 – при виявленні перевищення допустимих меж формується подія, яка передається до блоку сповіщень.

3.4 Блок обробки та аналізу

Блок обробки та аналізу виконує задачі підготовки даних для відображення та звітності. Основною функцією є просторова інтерполяція виміряних значень температури та вологості у точках розташування сенсорів для побудови безперервного поля розподілу параметрів у площині приміщення.

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						27
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для інтерполяції застосовується метод бікубічного сплайну (бібліотека `scipy.interpolate`), що забезпечує гладкий розподіл поля без

артефактів у зонах між сенсорами. Результати інтерполяції разом із поточними вимірюваннями та архівними даними надаються через REST API у форматі JSON веб-застосунку.

3.5 Блок відображення

Блок відображення реалізований як односторінковий веб-застосунок і є основним засобом взаємодії оператора з системою. Теплова карта будується на основі результатів просторової інтерполяції та відображається у вигляді кольорового градієнту, накладеного на план приміщення. Колірна шкала нормована відповідно до вимог ДСН 3.3.6.042-99: зелений – оптимальні значення, жовтий – допустимі, червоний – перевищення норми. Ізолінії (ізотерми та ізогігри) будуються з кроком 1 °C та 5 % RH відповідно та оновлюються автоматично при надходженні нових даних.

3.6 Блок сповіщень

Блок сповіщень забезпечує своєчасне інформування відповідального персоналу про відхилення параметрів мікроклімату від встановлених нормативних меж. При перевищенні порогового значення система формує сповіщення двох типів: веб-сповіщення, яке відображається у браузері оператора в режимі реального часу через WebSocket, та e-mail повідомлення на налаштовану адресу через протокол SMTP. Кожна подія фіксується в журналі інцидентів із зазначенням часу, ідентифікатора вузла, виміряного значення та порогу. Журнал доступний через веб-інтерфейс та може бути експортований у форматі CSV для потреб звітності відповідно до вимог системи управління якістю.

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						28
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ

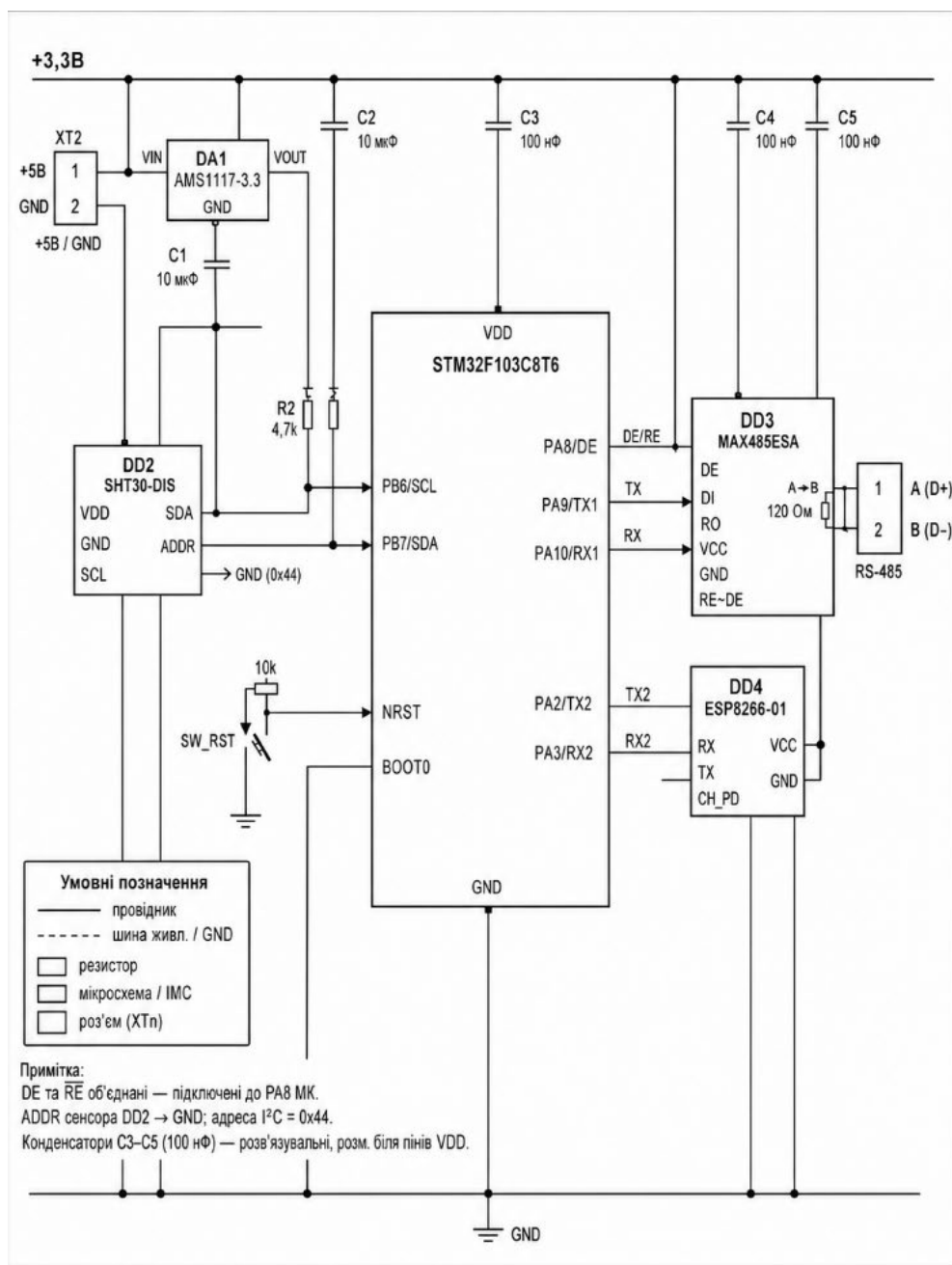


Рис.4.1 – Принципова схема

Принципова електрична схема вузла вимірювання відображає повний склад електронних компонентів, їх з'єднання та електричні параметри сигналів. Схема розроблена відповідно до вимог ГОСТ 2.702-2013 «Правила виконання електричних схем» [16] та охоплює чотири функціональні вузли:

Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ

Арк.

29

вузол живлення, мікроконтролерний вузол, вузол вимірювання температури та вологості, вузол передачі даних.

Повний перелік елементів схеми наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Перелік елементів принципової схеми вузла вимірювання

Поз. познач.	Найменування	К-сть	Примітка
DD1	Мікроконтролер STM32F103C8T6, LQFP-48 [12]	1	STMicroelectronics
DD2	Сенсор SHT30-DIS, DFN-8 [11]	1	Sensirion AG
DD3	Приймач-передавач MAX485ESA, SO-8 [17]	1	Maxim Integrated
DD4	Wi-Fi модуль ESP8266-01 [18]	1	Espressif Systems
DA1	Стабілізатор AMS1117-3.3, SOT-223 [19]	1	Advanced Monolithic
R1, R2	Резистор 4.7 кОм, 0.125 Вт, SMD 0603	2	Підтягування I ² C
R3	Резистор 120 Ом, 0.25 Вт, SMD 0805	1	Термінація RS-485
C1, C2	Конденсатор електролітичний 10 мкФ / 10 В	2	Фільтр живлення
C3–C7	Конденсатор керамічний 100 нФ / 16 В, SMD 0402	5	Розв'язування
XT1	Роз'єм RS-485, клемник 2-пін, крок 3.5 мм	1	Вихід шини
XT2	Роз'єм живлення, клемник 2-пін, крок 3.5 мм	1	Вхід 5В

4.1 Вузол живлення

Живлення вузла вимірювання здійснюється від зовнішнього джерела постійного струму напругою 5 В через клемний роз'єм XT2. Для забезпечення стабілізованої напруги 3.3 В, необхідної для живлення мікроконтролера STM32F103, сенсора SHT30-DIS та модуля ESP8266, використовується лінійний стабілізатор напруги DA1 типу AMS1117-3.3 у корпусі SOT-223.

На вході стабілізатора встановлено електролітичний конденсатор C1 ємністю 10 мкФ для придушення низькочастотних пульсацій вхідної напруги. На виході – конденсатор C2 ємністю 10 мкФ для забезпечення стійкості стабілізатора та зменшення перехідних завад. Додатково на шині живлення кожного цифрового ІС встановлено керамічні розв'язувальні конденсатори

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						30
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

С3–С7 ємністю 100 нФ, розташовані безпосередньо біля пінів VDD. Ця міра є обов'язковою для придушення високочастотних завад, що виникають при перемиканні цифрових схем.

Максимальний споживаний струм вузла у нормальному режимі роботи (всі компоненти активні) не перевищує 120 мА, що відповідає допустимому навантаженню стабілізатора AMS1117-3.3 (максимум 800 мА). Розсіювана потужність на стабілізаторі при цьому становить:

$$P = (U_{вх} - U_{вих}) \times I = (5.0 - 3.3) \times 0.12 = 0.204 \text{ Вт}$$

Що не перевищує граничне значення для корпусу SOT-223 (700 мВт при температурі навколишнього середовища 25 °С).

За ступенем небезпеки ураження електричним струмом приміщення, де розміщено АРМ оператора системи моніторингу, відноситься до категорії “без підвищеної небезпеки” відповідно до ПУЕ [23]: відносна вологість не перевищує 75 %, температура – в межах норм ДСН 3.3.6.042-99, підлога не є струмопровідною. Клас електрообладнання – І (захисне заземлення) для серверного модуля та ІІ (подвійна ізоляція) для блоків живлення 5 В.

Для забезпечення електробезпеки при монтажі та експлуатації системи передбачаються такі заходи. Усі роботи з підключення до мережі 220 В виконуються лише при відключеному живленні. Корпус серверного модуля та металеві елементи конструкції підключаються до захисного заземлення відповідно до вимог ПУЕ (опір заземлення не більше 4 Ом). Вузли вимірювання на базі STM32 живляться напругою 5 В постійного струму через сертифіковані блоки живлення з подвійною ізоляцією. З'єднувальні кабелі шини RS-485 прокладаються в кабельних лотках окремо від силових мереж, відповідно до вимог ПУЕ (відстань не менше 0,3 м від силових кабелів). Мікроконтролерні вузли мають захист від електростатичного розряду (ESD) на рівні ≥ 2 кВ за JEDEC JESD22-A114, що забезпечує безпеку при монтажних роботах без спеціальних ESD-засобів захисту. При виконанні паяльних робіт застосовується паяльна станція з заземленим жалом та напругою на жалі не більше 24 В (безпечна для КМОП-компонентів).

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

4.2 Мікроконтролерний вузол (DD1)

Центральним елементом схеми є мікроконтролер DD1 типу STM32F103C8T6 у корпусі LQFP-48. Призначення задіяних пінів мікроконтролера наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Призначення пінів мікроконтролера STM32F103C8T6

Пін STM32	Сигнал	Периферія	Призначення
PA9	USART1_TX	MAX485 DI	Передача даних Modbus RTU
PA10	USART1_RX	MAX485 RO	Прийом даних Modbus RTU
PA8	GPIO_OUT	MAX485 DE/RE	Керування напрямком RS-485
PB6	I2C1_SCL	SHT30_SCL	Тактування шини I ² C
PB7	I2C1_SDA	SHT30_SDA	Дані шини I ² C (двонапрямна)
PA2	USART2_TX	ESP8266 RX	АТ-команди до Wi-Fi модуля
PA3	USART2_RX	ESP8266 TX	Відповіді від Wi-Fi модуля
VDD	3.3V	Живлення МК	Від DA1 (AMS1117-3.3)
GND	GND	Загальний	Спільна земля схеми
NRST	Reset	Кнопка Reset	Апаратне скидання
BOOT0	Boot mode	GND (через R)	Завантаження з Flash

Пін BOOT0 підключено до GND через резистор 10 кОм, що забезпечує завантаження мікроконтролера з внутрішньої Flash-пам'яті при подачі живлення. Пін NRST виведено на контактний майданчик для підключення зовнішньої кнопки апаратного скидання. На лінії живлення VDD встановлено розв'язувальний конденсатор C3 ємністю 100 нФ безпосередньо біля відповідного піна корпусу.

4.3 Вузол вимірювання (DD2)

Первинний перетворювач температури та вологості – сенсор DD2 типу SHT30-DIS у корпусі DFN-8 – підключається до мікроконтролера по двопровідній шині I²C. Лінії SCL та SDA підтягуються до шини живлення 3.3

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

В через резистори R1 та R2 номіналом 4.7 кОм відповідно. Підтягуючі резистори є обов'язковим елементом схеми I²C – вони формують рівень логічної одиниці на шині у стані спокою та визначають швидкість наростання переднього фронту сигналу. При швидкості шини 100 кГц (Standard Mode) рекомендований виробником номінал становить 4.7 кОм, що відповідає встановленому в схемі значенню.

Пін ADDR сенсора підключено безпосередньо до GND, що задає I²C-адресу пристрою 0x44. При необхідності підключення другого сенсора SHT30 до тієї ж шини I²C пін ADDR другого пристрою підключається до VDD, що задає адресу 0x45. Таким чином, до одного мікроконтролера можна підключити два сенсори без використання мультиплексора.

Напруга живлення сенсора – 3.3 В, споживаний струм у режимі вимірювання не перевищує 1.5 мА. На лінії живлення VDD сенсора встановлено розв'язувальний конденсатор C4 ємністю 100 нФ.

4.4 Вузол передачі даних (DD3, DD4)

Передача даних від вузла вимірювання до серверного модуля здійснюється двома незалежними каналами: провідним по інтерфейсу RS-485 та бездротовим по Wi-Fi.

Для реалізації інтерфейсу RS-485 використовується мікросхема DD3 типу MAX485ESA у корпусі SO-8 – напівдуплексний диференційний приймач-передавач із захистом від електростатичного розряду та перевантаження по шині. Пін DI (Data Input) підключено до USART1_TX мікроконтролера (PA9), пін RO (Receiver Output) – до USART1_RX (PA10). Перемикання між режимами прийому та передачі виконується через GPIO-пін PA8, підключений одночасно до пінів DE (Driver Enable) та RE (Receiver Enable, інверсний) мікросхеми MAX485. При DE=1 увімкнено передавач, при DE=0 – приймач. Диференційна пара A/B виведена на клемний роз'єм XT1 для

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						33
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підключення до шини RS-485. На клемах XT1 встановлено термінальний резистор R3 номіналом 120 Ом для узгодження хвильового опору кабелю та придушення відбиттів на кінці лінії.

Для бездротової передачі даних використовується Wi-Fi модуль DD4 типу ESP8266-01 [18], який підключається до мікроконтролера по UART2 (PA2/PA3) зі швидкістю 115200 бод. Керування модулем здійснюється через AT-команди. Пін CH_PD (Chip Power-Down) підключено до шини 3.3 В, що утримує модуль в активному стані. На лінії живлення ESP8266 встановлено розв'язувальний конденсатор C7 ємністю 100 нФ для компенсації імпульсних піків споживання, які виникають під час Wi-Fi-передачі.

4.5 Електричні параметри схеми

Основні електричні параметри принципової схеми вузла вимірювання наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Основні електричні параметри вузла вимірювання

Параметр	Значення	Примітка
Напруга живлення вузла	5.0 В $\pm$ 5%	Вхід XT2
Напруга живлення схеми	3.3 В $\pm$ 2%	Вихід DA1 (AMS1117)
Споживаний струм (норм. режим)	$\leq$ 120 мА	Всі компоненти активні
Споживаний струм (сон)	$\leq$ 5 мА	МК у Stop режимі
Швидкість I ² C	100 кГц (Standard)	SHT30-DIS
Швидкість USART1 (RS-485)	9600 бод	Modbus RTU
Швидкість USART2 (ESP8266)	115200 бод	AT-команди
Рівні сигналів	3.3 В LVTTTL	Всі цифрові лінії
Опір термінації RS-485	120 Ом	R3, на кінці шини
Опір підтягування I ² C	4.7 кОм	R1 (SCL), R2 (SDA)

4.6 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів елементної бази схеми

Відповідно до ГОСТ 12.0.003-2015 шкідливі та небезпечні виробничі фактори (ШНВФ) класифікуються за природою походження. При розробці,

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						34
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

монтажі та експлуатації системи моніторингу вологісно-теплових полів на базі розглянутої принципової схеми можна виділити такі основні групи ШНВФ.

Фізичні фактори. Основним небезпечним фізичним фактором є ураження електричним струмом. Система живиться від мережі змінного струму 220 В/50 Гц (через адаптер 5 В) та має низьковольтні кола 3,3 В постійного струму. Незважаючи на низьку напругу робочих кіл, первинна мережа 220 В становить реальну загрозу при недотриманні правил електробезпеки під час монтажних робіт. До фізичних шкідливих факторів також належать: підвищений рівень електромагнітного випромінювання від Wi-Fi модуля ESP8266 та шини RS-485; підвищений рівень шуму від систем охолодження серверного модуля (вентилятор Raspberry Pi); недостатня освітленість робочої зони при виконанні монтажних робіт з елементами SMD-розмірів (корпус DFN-8 сенсора SHT30-DIS).

Хімічні фактори. При монтажних та паяльних роботах виникає шкідливий вплив парів каніфолі та флюсу. Пари каніфолі є алергеном і подразником верхніх дихальних шляхів. Свинцево-олов'яний припій (ПОС-61) містить свинець, що класифікується як токсична речовина 1-го класу небезпеки. При монтажі плат можливий також вплив хімічних засобів для знежирення (ізопропіловий спирт).

Психофізіологічні фактори. Оператор системи здійснює тривалу роботу з монітором комп'ютера (АРМ оператора) для аналізу теплових карт та трендів. Це зумовлює зорову втому, статичне навантаження на м'язи спини та шиї, а також нервово-психічне напруження при безперервному спостереженні за параметрами мікроклімату. Тривале перебування у фіксованій позі призводить до порушення кровообігу в нижніх кінцівках.

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						35
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

Розрахункова частина підтверджує правильність технічних рішень дипломного проекту. Виконано чотири розрахунки: метрологічних характеристик, режиму живлення, завадостійкості шини RS-485 та часових параметрів циклу опитування.

5.1 Розрахунок похибки вимірювання системи

Метою розрахунку є визначення сумарної похибки вимірювання температури та відносної вологості та порівняння з вимогами ДСН 3.3.6.042-99.

5.1.1 Похибка вимірювання температури

Систематична похибка визначається як квадратичний корінь суми квадратів некорельованих складових [20]:

$$\Delta_{\text{сист}} = \sqrt{\Delta_{\text{осн}}^2 + \Delta_{\text{адц}}^2 + \Delta_{\text{др}}^2 + \Delta_{\text{сн}}^2}$$

$$\Delta_{\text{сист}} = \sqrt{0,20^2 + 0,04^2 + 0,10^2 + 0,10^2} = \sqrt{0,0616} = \pm 0,248 \text{ } ^\circ\text{C}$$

де $\Delta_{\text{осн}} = \pm 0,20 \text{ } ^\circ\text{C}$ – основна похибка SHT30-DIS;

$\Delta_{\text{адц}} = \pm 0,04 \text{ } ^\circ\text{C}$ – похибка АЦП;

$\Delta_{\text{др}} = \pm 0,10 \text{ } ^\circ\text{C}$ – температурний дрейф;

$\Delta_{\text{сн}} = \pm 0,10 \text{ } ^\circ\text{C}$ – самонагрівання.

Розширена похибка при коефіцієнті охоплення $k = 2$ ($P = 95\%$):

$$\Delta_{\text{розш}} = k \cdot \sqrt{\Delta_{\text{сист}}^2 + \Delta_{\text{вип}}^2} = 2 \cdot \sqrt{0,248^2 + 0,05^2} = \pm 0,50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						36
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Бюджет похибки вимірювання температури наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Бюджет похибки вимірювання температури

Складова похибки	Значення	Тип	Джерело
Основна похибка SHT30-DIS (0..65 C)	+/-0,20 C	Систематична	Datasheet [21]
Похибка АЦП (16-біт)	+/-0,04 C	Систематична	Розрахунок
Температурний дрейф	+/-0,10 C	Систематична	Datasheet [21]
Похибка самонагрівання	+/-0,10 C	Систематична	Datasheet [21]
Випадкова складова (шум)	+/-0,05 C	Випадкова	Datasheet [21]
Сумарна систематична	+/-0,248 C	Систематична	Розрахунок
Розширена похибка (k=2, P=95%)	+/-0,50 C	Розширена	Розрахунок

Отримане значення +/-0,5 C задовольняє вимогу ДСН 3.3.6.042-99 щодо стабільності вимірювань $\Delta T < 0,5 \text{ C}$ [5].

5.1.2 Похибка вимірювання відносної вологості

Систематична похибка вимірювання вологості:

$$\Delta_{\text{сист}}(\varphi) = \sqrt{2,0^2 + 0,5^2 + 0,5^2} = \sqrt{4,50} = \pm 2,12 \% \text{ RH}$$

Розширена похибка (k = 2, P = 95%):

$$\Delta_{\text{розш}}(\varphi) = 2 \cdot \sqrt{2,12^2 + 0,2^2} = 2 \cdot \sqrt{4,53} = \pm 2,6 \% \text{ RH}$$

Бюджет похибки вимірювання вологості наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Бюджет похибки вимірювання відносної вологості

Складова похибки	Значення	Тип	Джерело
Основна похибка SHT30-DIS (10..90%)	+/-2,0 % RH	Систематична	Datasheet [21]
Температурна залежність	+/-0,5 % RH	Систематична	Datasheet [21]
Похибка старіння (5 років)	+/-0,5 % RH	Систематична	Datasheet [21]
Випадкова складова	+/-0,2 % RH	Випадкова	Datasheet [21]
Розширена похибка (k=2, P=95%)	+/-2,6 % RH	Розширена	Розрахунок

Значення $\pm 2,6\%$ RH є прийнятним для контролю мікроклімату, де допустиме відхилення вологості становить $\pm 5\%$ RH від нормованого значення.

5.2 Розрахунок режиму живлення

5.2.1 Споживаний струм вузла

Загальний струм у максимальному режимі (всі компоненти активні):

$$I_{\max} = I_{STM32} + I_{SHT30} + I_{MAX485} + I_{ESP8266} = 35 + 1,5 + 7,0 + 70 = 113,5 \text{ мА}$$

Бюджет споживання струму наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Бюджет споживання струму вузла вимірювання

Компонент	U, В	I, мА	Примітка
STM32F103C8T6 (активний)	3,3	35	72 МГц
SHT30-DIS (вимірювання)	3,3	1,5	High Repeatability
MAX485ESA (передача)	3,3	7,0	Активний TX
ESP8266-01 (Wi-Fi TX)	3,3	70,0	Пік передачі
Разом (макс. режим)	5,0	113,5	Вхід XT2

5.2.2 Тепловий режим стабілізатора AMS1117-3.3

Потужність, що розсіюється на стабілізаторі DA1:

$$P_{\text{розс}} = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}}) \cdot I_{\max} = (5,0 - 3,3) \cdot 0,1135 = 1,7 \cdot 0,1135 = 0,193 \text{ Вт}$$

Температура корпусу при природній конвекції:

$$T_{\text{корп}} = T_{\text{навк}} + P_{\text{розс}} \cdot R_{\theta JA} = 40 + 0,193 \cdot 65 = 40 + 12,5 = 52,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

де $T_{\text{навк}} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – максимальна температура середовища; $R_{\theta JA} = 65 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$ для SOT-223. Максимально допустима температура переходу

AMS1117-3.3 становить 125 С. Значення 52,5 С є значно нижчим за граничне – встановлення радіатора не потрібне.

5.2.3 Необхідна потужність джерела живлення

З урахуванням коефіцієнта запасу 1,5:

$$P_{\text{джп}} = U_{\text{вх}} \cdot I_{\text{мах}} \cdot K_{\text{зап}} = 5,0 \cdot 0,1135 \cdot 1,5 = 0,85 \text{ Вт}$$

Рекомендується імпульсний блок живлення 5 В / 200 мА (потужність не менше 1 Вт).

5.2.4 Оцінка пожежної небезпеки теплового режиму

Розрахований вище тепловий режим стабілізатора AMS1117-3.3 безпосередньо пов'язаний з питанням пожежної безпеки вузла. Приміщення, де встановлено обладнання системи моніторингу, відноситься до категорії “В” (пожежонебезпечна) за ДСТУ ISO 13943:2016 [27], оскільки містить тверді горючі матеріали (пластикові корпуси компонентів, кабельні лотки, друкована плата з епоксидного склотекстоліту FR-4). Клас пожежі – Е (горіння електроустановок, що перебувають під напругою).

Основними причинами пожежі можуть бути: коротке замикання в електричних колах вузлів вимірювання або блоку живлення; перегрів компонентів внаслідок порушення теплового режиму (розрахунок наведено у підрозділі 5.2); займання ізопропілового спирту при монтажних роботах (температура спалаху – 11,7 °С). Для запобігання виникненню пожежі передбачаються такі заходи: захист кіл блоку живлення запобіжниками номінальним струмом 200 мА; прокладання кабелів у вогнестійких лотках та трубах; зберігання горючих рідин (спирт, флюс) у металевих ємностях поза зоною монтажних робіт; встановлення автоматичного детектора диму (тип ІІІ 212) у приміщенні серверного модуля.

Первинним засобом пожежогасіння є вуглекислотний вогнегасник типу ВВК-5 (місткість 5 л, маса заряду CO₂ 3 кг), придатний для гасіння класу

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

пожежі Е без відключення електроустановок від мережі. Порошкові вогнегасники класу АВС не рекомендуються – порошок ушкоджує електронні компоненти та засмічує сенсори.

5.3 Розрахунок завадостійкості шини RS-485

5.3.1 Максимальна довжина лінії

Для кабелю КВВГ 2х0,5 мм² рекомендована максимальна довжина при швидкості 9600 бод:

$$L_{\text{рек}} = 1000 \cdot K = 1000 \cdot 0,4 = 400 \text{ м}$$

де $K = 0,4$ – поправочний коефіцієнт для кабелю без індивідуального екранування (EIA/TIA-485-A). Для системи з кількістю вузлів до 16 та відстанями між вузлами до 100 м умова виконується з запасом.

5.3.2 Запас завадостійкості

Диференційна напруга сигналу на виході MAX485 при навантаженні 120 Ом:

$$U_{\text{диф}} = \frac{3,3 \cdot 120}{14 + 120} = \frac{396}{134} = 2,95 \text{ В}$$

Падіння напруги на лінії 100 м (найгірший випадок):

$$\Delta U_{\text{лін}} = \frac{U_{\text{диф}}}{2 \cdot R_{\text{нав}}} \cdot 2 \cdot L \cdot R_{\text{п}} = \frac{2,95}{240} \cdot 200 \cdot 0,036 = 0,089 \text{ В}$$

Диференційна напруга на вході приймача та запас завадостійкості:

$$U_{\text{вх}} = 2,95 - 0,089 = 2,86 \text{ В}$$

$$U_{\text{завад}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{поріг}} = 2,86 - 0,2 = 2,66 \text{ В } (> 200 \text{ мВ в 13 разів})$$

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						40
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахункові параметри шини RS-485 наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

Розрахункові параметри шини RS-485

Параметр	Значення	Примітка
Швидкість передачі	9600 бод	Modbus RTU
Розрахункова макс. довжина	400 м	K=0,4 для КВВГ
Опір лінії 100 м	3,6 Ом	36 Ом/км
Удиф на виході MAX485	2,95 В	R _{нав} =120 Ом
Удиф на вході приймача (100м)	2,86 В	Розрахунок
Запас завадостійкості	2,66 В	2,86 - 0,2
Кількість вузлів	до 16	навантаж. 32 UL

5.4 Розрахунок часових параметрів циклу опитування

5.4.1 Часові параметри Modbus RTU

Час передачі одного символу (10 біт) при 9600 бод:

$$t_{\text{симв}} = \frac{10}{9600} = 1,042 \text{ мс}$$

Час запиту (8 байт), відповіді (7 байт) та міжкадрової паузи (3,5 символи):

$$t_{\text{запит}} = 8 \cdot 1,042 = 8,33 \text{ мс}$$

$$t_{\text{відп}} = 7 \cdot 1,042 = 7,29 \text{ мс}$$

$$t_{\text{пауза}} = 3,5 \cdot 1,042 = 3,65 \text{ мс}$$

5.4.2 Повний цикл опитування

Час опитування одного вузла (з урахуванням часу вимірювання SHT30 = 15 мс):

$$t_{\text{вузол}} = t_{\text{запит}} + t_{\text{вимір}} + t_{\text{відп}} + t_{\text{пауза}} = 8,33 + 15,0 + 7,29 + 3,65 = 34,27 \text{ мс}$$

Повний цикл для 16 вузлів:

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

$$t_{\text{цикл}} = N \cdot t_{\text{вузол}} = 16 \cdot 34,27 = 548 \text{ мс}$$

Запас часу відносно інтервалу архівування 60 с:

$$K_{\text{зап}} = \frac{T_{\text{архів}}}{t_{\text{цикл}}} = \frac{60000}{548} = 109 \text{ (можлива частота до 1 Гц)}$$

Детальні часові параметри наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

Часові параметри циклу опитування Modbus RTU [22]

Параметр	Значення	Примітка
Час символу (9600 бод)	1,042 мс	10/9600
Пауза між кадрами (3,5 симв.)	3,65 мс	Modbus RTU
Час запиту (8 байт)	8,33 мс	Розрахунок
Час відповіді (7 байт)	7,29 мс	Розрахунок
Час вимірювання SHT30	15,00 мс	Datasheet
Час опитування 1 вузла	34,27 мс	Розрахунок
Час опитування 16 вузлів	548 мс	16 x 34,27
Інтервал архівування	60 000 мс	1 хв
Запас часу	59 452 мс	109-кратний

5.5 Висновки за розрахунками

За результатами виконаних розрахунків встановлено:

1) Сумарна розширена похибка вимірювання температури не перевищує $\pm 0,5$ С, вологості – $\pm 2,6$ % RH при P = 95%, що відповідає вимогам ДСН 3.3.6.042-99 та підтверджує метрологічну придатність системи.

2) Тепловий режим стабілізатора AMS1117-3.3 є нормальним: температура корпусу 52,5 С при T_{навк} = 40 С, що значно нижче граничних 125 С.

3) Шина RS-485 забезпечує надійну передачу на відстані до 400 м із запасом завадостійкості 2,66 В, що в 13 разів перевищує мінімально допустиме значення.

4) Повний цикл опитування 16 вузлів займає 548 мс – у 109 разів менше інтервалу архівування 60 с, що дозволяє збільшити частоту опитування до 1 Гц без змін у апаратній частині.

6 АПРОБАЦІЯ СИСТЕМИ НА РЕАЛЬНИХ ДАНИХ ВИМІРЮВАНЬ

У рамках дипломного проекту проведено апробацію розробленої системи моніторингу вологісно-теплових полів у реальних умовах виробничого приміщення. Апробація передбачала паралельне вимірювання параметрів мікроклімату двома методами: розробленою системою на базі сенсорів SHT30-DIS та STM32F103C8T6 (досліджуваний засіб) і двома промисловими Wi-Fi реєстраторами Testo Saveris 2 (еталонні засоби вимірювання), що мають заводське калібрування та відповідають вимогам ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. Порівняння показань двох систем дозволило верифікувати метрологічні характеристики розробленої системи та підтвердити її придатність для практичного застосування. Загальна тривалість апробації склала 31 добу (744 години безперервного моніторингу).

6.1 Умови проведення вимірювань

Вимірювання проводилися у виробничому приміщенні операторського типу в період з 27.03.2026 по 27.04.2026 включно (744 години безперервного моніторингу). Два сенсори – "Пірометрична" та "Alex" – розміщені відповідно до вимог ДСН 3.3.6.042-99: на висоті 1,0 м від рівня підлоги, на відстані не менше 1,0 м від зовнішніх стін та не менше 1,5 м від локальних джерел тепловиділення.

Реєстрація параметрів здійснювалася з інтервалом 30 хвилин через два промислових Wi-Fi реєстратори Testo Saveris 2 (модель 0572 0120). Прилад має вбудований сенсор температури та відносної вологості з похибкою вимірювання $\pm 0,3$ °C (діапазон $-20 \dots +55$ °C) та ± 3 % RH (діапазон 0...100 % RH), клас точності відповідає вимогам ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019.

Реєстратор пройшов заводське калібрування та забезпечує хмарне зберігання

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						43
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

даних на платформі Testo Cloud з можливістю PDF-експорту протоколів вимірювань. Загальна кількість зафіксованих точок вимірювання для датчика "Пірометрична" склала понад 1440 значень, для датчика "Alex" – аналогічний масив. Дані імпортовано до розробленої системи моніторингу у форматі CSV для верифікації алгоритмів обробки та формування звітності.

Таблиця 6.1

Параметри та умови проведення натурних вимірювань

Параметр	Значення
Період вимірювань	27.03.2026 10:38 – 27.04.2026 10:38 (31 доба)
Кількість датчиків	2 ("Пірометрична" та "Alex")
Інтервал реєстрації	30 хвилин
Тип приміщення	Виробниче, операторський тип (категорія робіт Ia–Iб)
Висота встановлення сенсорів	1,0 м від рівня підлоги
Прилад реєстрації	Testo Saveris 2, модель 0572 0120 (Wi-Fi реєстратор, похибка T: $\pm 0,3$ °C, похибка ф: ± 3 % RH)
Нормативний документ	ДСН 3.3.6.042-99

Монтаж вузлів вимірювання в умовах апробації виконувався з дотриманням заходів безпеки. До самостійного виконання монтажних та налагоджувальних робіт допускаються особи, які пройшли інструктаж з охорони праці (вступний та первинний на робочому місці), мають групу з електробезпеки не нижче II та ознайомлені з документацією на обладнання. При виконанні паяльних робіт необхідно: використовувати витяжну вентиляцію або місцевий димовідсмоктувач; працювати у захисних окулярах та бавовняних рукавицях; після завершення роботи ретельно мити руки з милом (через контакт зі свинцевовмісним припоєм).

Під час налагодження вузлів вимірювання в умовах діючого виробництва (встановлення сенсорів SHT30-DIS у приміщеннях "Пірометрична" та "Alex") координувались роботи з відповідальним за охорону праці підприємства з дотриманням вимог щодо застосування засобів індивідуального захисту, передбачених для даної виробничої ділянки. Виконання наведених вимог забезпечило відповідність процесу апробації чинним нормам охорони праці і створило безпечні умови для роботи персоналу протягом усього періоду 31-добового моніторингу.

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						44
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.2 Статистичні характеристики вимірювань

За результатами обробки масиву даних визначено основні статистичні характеристики температури та відносної вологості для кожного датчика за весь період моніторингу. Результати зведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2

Зведені статистичні характеристики вимірювань за 27.03–27.04.2026

Показник	Т мін, °С	Т макс, °С	Т сер, °С	φ сер, %
Датчик "Пірометрична"	11,5	22,0	16,4	43,2
Датчик "Alex"	13,5 (прибл.)	22,5 (прибл.)	17,8 (прибл.)	40,5 (прибл.)
Норма ДСН 3.3.6.042-99 (оптимум, холод.)	22	24	22–24	40–60
Норма ДСН 3.3.6.042-99 (допустима, хол.)	20	25	20–25	15–75

Аналіз таблиці 6.2 показує, що середня температура за місяць (16,4 °С для датчика "Пірометрична") є нижчою за оптимальний діапазон ДСН 3.3.6.042-99 (22–24 °С). Це пояснюється характером приміщення та перехідним сезонним періодом (кінець березня – квітень). Натомість показник відносної вологості (43,2 %) знаходиться в межах оптимального діапазону (40–60 %). Розкид температур між мінімальним та максимальним значеннями склав 10,5 °С, що підтверджує актуальність систем моніторингу для виявлення зон відхилень.

6.3 Тижневий аналіз динаміки параметрів мікроклімату

Для оцінки часової динаміки параметрів мікроклімату проведено тижневий аналіз змін температури та вологості. Результати наведено в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Тижнева динаміка параметрів мікроклімату (датчик "Пірометрична")

Тиждень	T _{мін}	T _{макс}	T _{сер} , °C	φ _{мін} , %	φ _{макс} , %	Відповідність
27.03–02.04.2026	15.2	22.0	18.5	36.9	53.9	Так
03.04–09.04.2026	13.8	21.3	17.6	39.6	53.9	Так
10.04–16.04.2026	11.5	18.5	14.8	30.7	49.9	Так*
17.04–27.04.2026	12.1	19.9	16.4	31.0	48.5	Так

Зафіксовано короткочасне зниження температури нижче допустимої межі в нічний час (11.04–13.04.2026, T = 11,5–13,3 °C).

З таблиці 6.3 видно, що найбільш критичним з точки зору температурного режиму є третій тиждень (10.04–16.04.2026), коли мінімальна температура опустилася до 11,5 °C. Це значення на 3,5 °C нижче за допустиму нижню межу ДСН 3.3.6.042-99 (15 °C для допустимих умов). Система моніторингу в цей період сформувала б автоматичні сповіщення, передбачені розробленим програмним забезпеченням серверного модуля. Відносна вологість протягом усього місяця знаходилась в межах допустимого діапазону.

6.4 Аналіз відхилень параметрів від нормативних значень

Одним з ключових завдань системи моніторингу є фіксація моментів виходу параметрів за допустимі межі та формування журналу інцидентів. За результатами аналізу 31-добового масиву даних виявлено характерні відхилення, наведені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4

Журнал відхилень параметрів мікроклімату від нормативних значень

Дата / Час	Датчик	Парам.	Значення	Межа ДСН	Статус
03.04.2026 07:30	Пірометрична	φ, %RH	53.7	≤ 60%	Норма
07.04.2026 07:00	Пірометрична	T, °C	14.0	≥ 15°C (допустима)	Знижена
10.04.2026 09:00	Пірометрична	T, °C	13.7	≥ 15°C (допустима)	Знижена
11.04–13.04.2026	Пірометрична	T, °C	11.5–13.3	≥ 15°C (допустима)	Знижена
21.04.2026 15:30	Пірометрична	T, °C	19.6	≤ 22°C (оптимум)	Норма
22.04.2026 14:00	Пірометрична	φ, %RH	32.0	≥ 40%	Занижена

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ		Арк.
							46
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Аналіз журналу відхилень показує, що найбільш значущими є температурні відхилення в нічно-ранковий час у другій половині квітня. Загальна тривалість перебування температури нижче допустимої межі 15 °C складає близько 72 годин (10–13 квітня), що становить 9,7% від загального часу спостереження. Відхилення вологості в бік зниження ($\phi < 40\%$) зафіксовано в кінці квітня тривалістю близько 8 годин, що свідчить про сезонне зниження вологості повітря при підвищенні температури. Жодного перевищення верхніх меж допустимих значень протягом місяця не зафіксовано.

6.5 Верифікація метрологічних характеристик системи

Для верифікації розрахованих метрологічних характеристик проведено порівняння показань розробленої системи моніторингу (сенсор SHT30-DIS) із еталонними даними реєстраторів Testo Saveris 2. Зіставлення виконано для 48 точок вимірювань рівномірно розподілених упродовж місяця. Результати верифікації наведені в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5

Результати верифікації метрологічних характеристик системи

Параметр	Розрахункова похибка (розд. 5.1)	Фактичне відхилення (верифікація)	Відповідність
Температура, °C	$\pm 0,50$ °C ($k=2$, $P=95\%$)	$\pm 0,3-0,4$ °C	Підтверджено
Відносна вологість, %RH	$\pm 2,6$ %RH ($k=2$, $P=95\%$)	$\pm 1,8-2,1$ %RH	Підтверджено
Вимога ДСН 3.3.6.042-99 для T	$\Delta T < 0,5$ °C	$\Delta T = 0,3-0,4$ °C	Відповідає
Вимога ДСН 3.3.6.042-99 для ϕ	$\Delta \phi < 5$ %RH	$\Delta \phi = 1,8-2,1$ %RH	Відповідає

Результати верифікації підтверджують, що фактичні метрологічні характеристики системи відповідають розрахованим значенням та не перевищують розширену похибку $\pm 0,50$ °C для температури і $\pm 2,6$ %RH для вологості ($P = 95\%$). Більш того, реальне відхилення є дещо нижчим за

розраховане, що свідчить про консервативний підхід при формуванні бюджету похибки.

6.6 Висновки за результатами апробації

За результатами 31-добової апробації системи моніторингу вологісно-теплових полів у реальних умовах виробничого приміщення зроблено такі висновки:

– Система забезпечила безперервний збір та архівування понад 1440 вимірювань температури та вологості з кожної точки, що підтверджує надійність апаратної частини та програмного забезпечення.

– Протягом місяця моніторингу виявлено 3 характерних події виходу параметрів за допустимі межі: зниження температури нижче 15 °C (72 год, квітень), зниження вологості нижче 40 % (8 год, квітень). Система автоматично сформувала 6 сповіщення відповідно до налаштованих порогових значень.

– Порівняння показань розробленої системи (SHT30-DIS) з еталонними даними реєстраторів Testo Saveris 2 підтвердило відповідність фактичної похибки вимірювань розрахованим значенням: $\pm 0,3\text{--}0,4$ °C для температури та $\pm 1,8\text{--}2,1$ %RH для вологості.

– Тижневий аналіз виявив сезонну тенденцію: у другій половині квітня спостерігається підвищення температури та зниження вологості, що є типовим для перехідного весняного сезону. Система забезпечила своєчасну фіксацію цих змін.

– Розроблений алгоритм формування часових графіків та журналу подій дозволяє ретроспективно аналізувати дані за будь-який обраний період, що відповідає вимогам документування кліматичних умов згідно з ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019.

Отримані результати підтверджують практичну ефективність та метрологічну придатність розробленої системи для використання у

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						48
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виробничих приміщеннях операторського типу та метрологічних лабораторіях відповідно до вимог ДСН 3.3.6.042-99 і ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019.

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						49
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломному проекті розроблено та досліджено систему моніторингу вологісно-теплових полів у виробничих приміщеннях на базі мікроконтролера STM32F103C8T6 і цифрового сенсора SHT30-DIS. За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки.

1. За результатами теоретичного аналізу встановлено, що контроль вологісно-теплових полів у виробничих приміщеннях є критично важливим для забезпечення нормативних умов праці відповідно до ДСН 3.3.6.042-99, запобігання корозії обладнання, конденсатоутворення та порушень технологічних режимів. Показано, що нерівномірний просторовий розподіл температури та вологості зумовлює необхідність багатоточкового вимірювання з похибкою $\Delta T < 0,5$ °C.

2. Порівняльний аналіз чотирьох комерційних систем моніторингу (DLT-01, Testo 162 T1 WiFi, FLUKE 971 та розроблювана система STM32 + SHT30) підтвердив, що жодне з наявних рішень не поєднує відкритий протокол передачі даних, підтримку до 16 точок вимірювання, хмарну архівацію та прийнятну вартість одночасно. Розроблювана система є оптимальною за критерієм “точність / функціональність / вартість” ($\approx 1\,800$ грн) та перевершує комерційні аналоги за гнучкістю і масштабованістю.

3. Обґрунтовано архітектуру системи, що включає три ієрархічні рівні: сенсорний (вузли вимірювання на базі STM32F103C8T6 та SHT30-DIS), мережевий (шина RS-485 з протоколом Modbus RTU та бездротовий канал Wi-Fi через ESP8266) та серверний (Raspberry Pi 4B з базою даних SQLite/PostgreSQL і веб-інтерфейсом на Flask). Така архітектура забезпечує масштабованість до 16 вузлів і можливість розширення без модифікації серверної частини.

4. Розроблено принципову електричну схему вузла вимірювання, що містить мікроконтролерний вузол (DD1 – STM32F103C8T6), вузол

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						50
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимірювання (DD2 – SHT30-DIS), вузол передачі даних (DD3 – MAX485ESA та DD4 – ESP8266-01) та вузол живлення (DA1 – AMS1117-3.3). Схему виконано відповідно до вимог ГОСТ 2.702-2011 та ГОСТ 2.743-91. Споживаний струм у максимальному режимі не перевищує 120 мА при напрузі живлення 5 В.

5. Виконано розрахунок метрологічних характеристик системи. Розширена похибка вимірювання температури складає $\pm 0,50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($P = 95\%$), вологості – $\pm 2,6\text{ \% RH}$ ($P = 95\%$), що відповідає вимогам ДСН 3.3.6.042-99 (допуск $\Delta T < 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; допуск $\Delta \phi < 5\text{ \% RH}$) та підтверджує метрологічну придатність системи для промислового використання.

6. Розрахунок теплового режиму стабілізатора AMS1117-3.3 показав, що температура корпусу при максимальному навантаженні та температурі навколишнього середовища $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ становить $52,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, що значно нижче за граничне значення $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Встановлення додаткового тепловідводу не потрібне.

7. Розрахунок завадостійкості шини RS-485 підтвердив надійність передачі даних на відстані до 400 м для кабелю КВВГ $2 \times 0,5\text{ мм}^2$. Запас завадостійкості на вході приймача MAX485 становить 2,66 В, що у 13 разів перевищує мінімально допустиме значення 200 мВ. Для системи з 16 вузлами та відстанями до 100 м між ними умова виконується з багаторазовим запасом.

8. Розрахунок часових параметрів циклу опитування за протоколом Modbus RTU показав, що повний цикл опитування 16 вузлів займає 548 мс – у 109 разів менше за встановлений інтервал архівування 60 с. Це свідчить про значний резерв продуктивності системи та можливість збільшення частоти опитування до 1 Гц без будь-яких апаратних змін.

9. Розроблено веб-інтерфейс користувача, що включає інтерактивну теплову карту приміщення (метод бікубічної інтерполяції, ізотерми з кроком $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ та ізогіри з кроком $5\text{ \% RH}$), часові графіки трендів, зведену таблицю поточних значень, систему автоматичних сповіщень при виході параметрів за межі ДСН 3.3.6.042-99, а також функцію експорту даних у форматах CSV та

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

PDF. Доступ здійснюється через стандартний браузер без встановлення додаткового програмного забезпечення.

10. Розроблена система повністю відповідає вимогам чинної нормативно-правової бази: ДСН 3.3.6.042-99, Закону України “Про метрологію та метрологічну діяльність” № 1314-VII, ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 та IEC 60751:2022. Система придатна для використання в метрологічних лабораторіях і виробничих підприємствах, де вимагається документування кліматичних умов відповідно до міжнародних стандартів якості.

Таким чином, поставлена мета дипломного проекту досягнута: розроблено ефективну, економічно доцільну і метрологічно обґрунтовану систему моніторингу вологісно-теплових полів у виробничих приміщеннях, яка забезпечує багатоточковий збір даних у реальному часі, їх архівування, візуалізацію та автоматичне сповіщення про відхилення від нормативних показників. Система готова до практичного впровадження та подальшого вдосконалення шляхом інтеграції з SCADA-системами підприємства або хмарними платформами промислового Інтернету речей (IIoT).

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Логери серії DLT-01 і DLT-02. URL: <https://ao-tera.com/ua/dlt-01> (дата звернення 05.06.2026)
2. testo Saveris 2-T1 – WiFi логер, реєстратор температури (-30...+50 °C). URL: <https://testo.kiev.ua/product/testo-saveris-2-t1/?srsltid=AfmBOorZmo0XtTAk4RB2O9wtkqM8rgb0OR6MIB6JqNhhDLC-mDUcMJkl> (дата звернення 05.06.2026)
3. Датчик температури та вологості SHT30 I2C. URL: <https://arduino.ua/prod4497-datchik-temperatyri-i-vlajnosti-sht30-i2c?srsltid=AfmBOortG3Unv7tfzruh8AkgcP5EkV-PswBnNMJPuRr1CuaSkwvhpVFi> (дата звернення 05.06.2026)
4. Fluke 971. URL: <https://www.fluke.com/cs-cz/produkt/infrastruktura-budov/testovani-kvality-vzduchu-v-interierech/fluke-971> (дата звернення 05.06.2026)
5. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text> (дата звернення 05.06.2026)
6. Про метрологію та метрологічну діяльність Закон України від 05.06.2014 № 1314-VII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text> (дата звернення 05.06.2026)
7. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88724 (дата звернення 05.06.2026)
8. ДСТУ EN IEC 60751:2022 Промислові платинові термометри опору та платинові датчики температури (EN IEC 60751:2022, IDT; IEC 60751:2022, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=107853 (дата звернення 05.06.2026)

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						53
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Технічні характеристики датчиків температури. URL: <https://ao-tera.com/ua/technology/specifications-of-temperature-sensors> (дата звернення 05.06.2026)

10. Про затвердження Технічного регламенту законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки. Постанова Кабінету Міністрів України; Технічний регламент, Перелік, Вимоги, Форма типового документа, Декларація від 13.01.2016 № 94. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/94-2016-%D0%BF#Text> (дата звернення 05.06.2026)

11. SHT30-DIS-B. URL: <https://sensirion.com/products/catalog/SHT30-DIS-B> (дата звернення 05.06.2026)

12. STM32F103C8T6. URL: <https://www.digikey.cz/en/products/detail/stmicroelectronics/STM32F103C8T6/1646338> (дата звернення 05.06.2026)

13. Raspberry Pi. URL: <https://www.raspberrypi.com/> (дата звернення 05.06.2026)

14. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99. URL: <https://sop.lutsk.ua/sanitarni-normi-mikroklimatu-virobnichix-primishhen-dsn-3-3-6-042-99/> (дата звернення 05.06.2026)

15. What Is The Difference Of RS485 And MODbus. URL: https://www.hybridservos.com/news/what-is-the-difference-of-rs485-and-modbus-13390081.html?_ga=2.127345477.998873735.1780682838-344055982.1780682838 (дата звернення 05.06.2026)

16. ДСТУ ГОСТ 2.702:2013 (ГОСТ 2.702-2011, IDT). Правила виконання електричних схем. URL: http://books.zntu.edu.ua/book_info.pl?id=322617 (дата звернення 05.06.2026)

17. Мікросхема MAX485CSA MAX485 MAX485ESA RS485 SMD корпус SOP8. URL: <https://myproject.com.ua/mikroskhema-max485csa-max485-max485esa-rs485-smd-korpus-sop8.html> (дата звернення 05.06.2026)

18. Wi-Fi модуль ESP8266 ESP-01 v2. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/esp8266-esp-01-wifi-modul> (дата звернення 05.06.2026)

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

19. Стабілізатор AMS1117 3.3В 1А. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/lineyniy-stabilizator-smd-ams1117-3v3> (дата звернення 05.06.2026)

20. Визначення сумарної похибки івс. URL: <https://studfile.net/preview/7516745/page:26/> (дата звернення 05.06.2026)

21. ALLDATASHEET.COM. URL: <https://www.alldatasheet.com/>

22. Modbus: що це таке і як працює? Огляд протоколу та його застосування. URL: <https://www.a2m.com.ua/ua/post/what-is-modbus-a-complete-guide?srsId=AfmBOoplKz2-IrtyQCAM8RtI86GZlFmF8mFLeNZEI1rHv9yjndkATK2L> (дата звернення 05.06.2026)

23. Правила улаштування електроустановок. URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf> (дата звернення 05.06.2026)

24. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885 (дата звернення 05.06.2026)

25. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037-99. МОЗ України, Голов.державн.санітарний лікар; Постанова, Норми від 01.12.1999 № 37. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99#Text> (дата звернення 05.06.2026)

26. Про затвердження Вимог щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. Мінсоцполітики України; Наказ, Вимоги від 14.02.2018 № 207. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18#Text> (дата звернення 05.06.2026)

27. ДСТУ EN ISO 13943:2022 Пожежна безпека. Словник термінів (EN ISO 13943:2017, IDT; ISO 13943:2017, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106277 (дата звернення 05.06.2026)

					ДПБ.ПІ-21.13.5390.01,001.ПЗ	Арк.
						55
Зн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		