

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

бакалавр  
Освітній рівень

Система оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху на базі мікроконтролера ESP8266  
Назва теми

КВРКІ 220038.22.02.41 ПЗ  
Шифр

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»  
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»  
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»  
Назва

Виконав студент III курсу, група КІ2с-22-2

  
Підпис, дата

Дмитро СМОЛЯК  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

Василь СТЕЦЮК  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

Тетяна КІСІЛЬ  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю  
зав.кафедри комп'ютерної  
інженерії та інформаційних  
систем

  
Підпис, дата

Ольга ПАВЛОВА  
Ініціали, прізвище

«12» червня 2025 р.

Хмельницький, 2025

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ  
Освітній рівень БАКАЛАВР  
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ  
Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ  
Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дмитру СМОЛЯКУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Система оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху на базі мікроконтролера ESP8266.

Керівник проекту (роботи) Василь СТЕЦЮК, старший викладач

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 07.02.2025 р. № 23

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Кіберфізична система оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху та постановка задачі щодо її удосконалення

Проектування системи обробки інформації у кіберфізичній системі оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху.

Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Архітектура ПЗ проекту

Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи

Апаратне забезпечення проекту

## 6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Тетяна КИСІЛЬ, доцент кафедри КІС		
Антиплагіат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КІС		

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2025	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2025	виконано
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2025	виконано
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проєктування системи оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху	01.04.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 – проєктування системи оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху	29.04.2025	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2025	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2025 року	

Студент

Підпис

Дмитро СМОЛЯК

Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

Василь СТЕЦІОК

Ініціали, прізвище

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Система оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху на базі мікроконтролера ESP8266».

Автор роботи: Смоляк Дмитро Вікторович

Керівник роботи: Стецюк Василь Миколайович

Пояснювальна записка: 71 с., 27 рис., 44 джерел.

Метою дипломної роботи є визначення умов та особливостей керуванням системою оповіщення, а також оцінка механізмів обробки інформації.

Об'єктом дослідження є функціонування та керування оповіщенням про критичні значення параметрів.

Предметом дослідження є оцінка режимів застосування системи оповіщення в ливарному цеху.


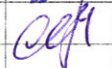

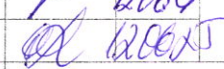
Під час проведення даного дослідження був використаний метод систематичного огляду літератури для вивчення і аналізу предметної області даного дослідження з текстових джерел інформації.



Підпис студента

30.05.2025

Дата

№ р я д к а	ф о р м а т	Позначення	Найменування	К і л л н с т і в	№ ек з	П р и м і т к
			Текстові документи			
1		КВРКІ 220038.22.02.41 ПЗ	Пояснювальна записка	71		
			Графічні матеріали			
2		КВРКІ 220038.22.02.41 Е8	Архітектура ПЗ проекту	1		
3		КВРКІ 220038.22.02.41 Е8	Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи	1		
4		КВРКІ 220038.22.02.41 Е8	Апаратне забезпечення проекту	1		
КВРКІ 220038.22.02.41 ВП						
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата	Літера	
Розробив		Смоляк		12.6.25	У	Аркуш
Перевір.		Стецюк		12.6.25	1	Аркушів
					71	
Н. контр.		Кисіль		12.06.25	ХНУ, КІ2с-22-2	
Затв.		Навлова		12.06.25		

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ КРИТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ</b> .....	6
1.1 Аналіз предметної області.....	6
1.2 Аналіз наявного програмно-апаратного забезпечення.....	8
1.3 Визначення вимог до системи.....	14
1.4 Постановка задачі.....	16
<b>2 ПРОЄКТУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ОПОВІЩЕННЯ ПРО КРИТИЧНІ ЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ</b> .....	19
2.1 Архітектура та структура системи.....	19
2.2 Вибір та обґрунтування протоколів зв'язку та взаємодії.....	22
2.3 Побудова структурної схеми системи.....	25
2.4 Побудова схеми і алгоритму функціонування системи.....	27
2.5 Логічна структура програмного забезпечення.....	34
<b>РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ</b> .....	37
3.1 Реалізація периферійних вузлів на базі ESP8266.....	37
3.2 Реалізація центрального вузла.....	40
3.3 Програмна реалізація та інтеграція ПЗ.....	58
3.4 Проведення тестування та налагодження.....	64
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	72

<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Виконала		Дмитро СМОЛЯК	<i>[Signature]</i>	17.6.25
Перевір.		Василь СТЕЦЮК	<i>[Signature]</i>	17.6.25
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ	<i>[Signature]</i>	17.06.25
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА	<i>[Signature]</i>	17.06.25
Система оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху на базі мікроконтролера ESP8266 Пояснювальна записка				
		Літера	Аркуш	Аркушів
		У	2	71
<i>ХНУ, КІ2с-22-2</i>				

<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>74</b>
<b>ДОДАТОК А .....</b>	<b>80</b>
<b>ДОДАТОК Б.....</b>	<b>81</b>
<b>ДОДАТОК В.....</b>	<b>82</b>

					<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

## ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій та промислової автоматизації передбачають активне впровадження вбудованих систем, здатних оперативно збирати, обробляти та передавати дані для забезпечення контролю та безпеки виробничих процесів. Особливої актуальності ці рішення набувають у сфері ливарного виробництва, де параметри навколишнього середовища безпосередньо впливають на якість продукції, безпеку працівників і стабільність технологічного процесу.

У ливарному цеху критично важливими є такі показники, як температура, концентрація вуглекислого газу, вологість, тиск і рівень вібрацій. Перевищення граничних значень цих параметрів може призвести до аварійних ситуацій, пошкодження обладнання або порушення санітарно-гігієнічних норм.

Тому своєчасне виявлення відхилень у середовищі є необхідною умовою безпечної експлуатації виробництва. Водночас традиційні системи моніторингу часто є дорогими, складними у впровадженні та недостатньо гнучкими для адаптації до змінних умов.

Зростає інтерес до використання недорогих, енергоефективних мікроконтролерів, таких як ESP8266, що дозволяють реалізовувати розподілені сенсорні мережі з можливістю віддаленого збору та передавання даних. Цей мікроконтролер має вбудований Wi-Fi-модуль, достатню обчислювальну потужність для локальної обробки інформації та широкі можливості підключення зовнішніх сенсорів, що робить його придатним для застосування в умовах промислового середовища.

Мета роботи полягає в розробці системи оповіщення про критичні значення параметрів у ливарному цеху на базі мікроконтролера ESP8266, яка забезпечує виявлення порушень у параметрах середовища та оперативне інформування персоналу.

							<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				4

Досягнення поставленої мети передбачає послідовне виконання ряду дослідницьких та інженерних етапів. Насамперед необхідно проаналізувати предметну область ливарного виробництва та визначити ключові параметри, які мають бути під постійним контролем.

Після цього проводиться вивчення наявних апаратних і програмних рішень, що застосовуються для моніторингу промислового середовища. На основі цього формуються вимоги до майбутньої системи та розробляється технічне завдання.

Подальші етапи включають проектування архітектури розподіленої сенсорної мережі на основі ESP8266, створення алгоритму функціонування системи з урахуванням умов перевищення допустимих значень, проектування і моделювання апаратної частини підвузлів для різних зон цеху, реалізацію програмної частини для збору, обробки й передавання даних, а також тестування працездатності розробленої системи в умовах, наближених до реальних.

У контексті підвищення екологічної стійкості розумних будинків стає дедалі важливішим застосування сенсорних вузлів із можливостями самонавчання. Використання вбудованих методів машинного навчання для передбачення тенденцій зміни мікроклімату дозволяє реалізувати більш гнучкі сценарії управління опаленням, вентиляцією та кондиціонуванням.

Сформована система орієнтована на застосування в умовах виробництва, де необхідно забезпечити моніторинг середовища в реальному часі.

Її впровадження дозволяє підвищити рівень безпеки, забезпечити превентивне реагування на небезпечні ситуації та мінімізувати людський фактор у процесі прийняття оперативних рішень. Розглянуто також перспективу впровадження гібридних сенсорних систем, які поєднують кілька принципів вимірювання (термістори, п'єзоелементи, оптичні датчики) в одному корпусі.

Реалізація цього підходу демонструє практичну доцільність використання розподіленої сенсорної мережі на базі ESP8266 для забезпечення технологічної надійності та захисту виробничого середовища.

						<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			5

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ КРИТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ

## 1.1 Аналіз предметної області

Ливарне виробництво є складовою важкої промисловості, де здійснюється виплавлення та формування металевих заготовок або готових виробів шляхом заливання розплавленого металу у форми. Цей технологічний процес супроводжується низкою факторів, що мають суттєвий вплив на безпеку праці, стан обладнання та якість кінцевої продукції. До таких факторів належать температура в зоні плавлення, наявність газових викидів (зокрема вуглекислого газу), підвищений рівень вологості, тиску та вібраційні навантаження на робочому майданчику.

Контроль за зазначеними параметрами вважається критично важливим для забезпечення стабільності виробничого циклу та зниження ризику виникнення аварійних ситуацій. У випадках перевищення допустимих значень температури або концентрації шкідливих речовин виникає потреба в негайному інформуванні персоналу та реалізації протиаварійних заходів. Зокрема, у зоні плавлення можливе утворення надлишкового тиску або шкідливих викидів, що потребує автоматичного сповіщення та зупинки технологічного процесу.

Наявність вібрацій, спричинених роботою важкого обладнання, також має бути під контролем, оскільки вона може призводити до поступового пошкодження фундаментів або опорних конструкцій, що створює додаткову загрозу для персоналу. У зоні зберігання матеріалів та виробів, своєю чергою, критичним є моніторинг атмосферного тиску та вологості, які впливають на тривалість зберігання продукції та її фізико-хімічні властивості.

У разі перевищення температури розплаву можливе пошкодження форм, порушення структури металу, утворення тріщин або внутрішніх напружень, що призводить до браку та втрат продукції. Критичні значення CO<sub>2</sub> можуть свідчити про неефективну вентиляцію або протікання технологічного обладнання, що небезпечно як для працівників, так і для функціонування технічних систем.

						<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			6

Надлишкова вологість у зоні складування може призводити до окислення заготовок, псування форм або появи корозійних пошкоджень. Перевищення норми атмосферного тиску може спричинити нерівномірне заливання форм, порушення геометрії виробів або нестабільну роботу механізмів. Постійна вібрація негативно впливає на точність операцій, погіршує умови праці та сприяє передчасному зношуванню елементів обладнання.

До додаткових загроз належать витоки газів, спричинені ушкодженням герметичності з'єднань або неправильним функціонуванням витяжних систем. У поєднанні з високою температурою така ситуація може призвести до утворення вибухонебезпечних середовищ. Значна вологість при високій температурі створює умови для утворення конденсату, що в свою чергу шкодить електронним вузлам, особливо якщо вони не мають достатнього рівня захисту. Крім того, у ливарному виробництві існує ризик одночасного впливу декількох несприятливих чинників: підвищена температура разом із вібрацією або підвищеною вологістю може прискорити деградацію конструкцій та сприяти виникненню мікротріщин у формувальних матеріалах.

У контексті цифровізації промисловості особливого значення набуває впровадження систем з безперервним моніторингом параметрів середовища, здатних не лише реєструвати зміни, але й на основі встановлених правил оперативно реагувати на них. Для ливарного цеху така система повинна мати модульну архітектуру з можливістю розміщення сенсорних вузлів у віддалених ділянках простору, забезпечувати високу точність вимірювань, стійкість до зовнішніх завад та інтеграцію з системами оповіщення або централізованого керування.

Таким чином, автоматизований контроль зазначених параметрів у ливарному цеху дозволяє не лише підвищити рівень безпеки, а й оптимізувати технологічні процеси, забезпечити дотримання санітарних та екологічних норм, а також знизити ймовірність пошкодження обладнання. Забезпечення цілодобового збору даних із рознесених зон цеху потребує впровадження розподіленої сенсорної системи з

										<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							7

можливістю гнучкої модифікації та масштабування, що є актуальним завданням для сфери комп'ютерної інженерії

## 1.2 Аналіз наявного програмно-апаратного забезпечення

У сучасному промисловому середовищі системи моніторингу параметрів навколишнього середовища відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки технологічних процесів. Вони дозволяють виявляти відхилення у технологічних режимах, попереджати аварійні ситуації, забезпечувати дотримання нормативних вимог з охорони праці та екології, а також підвищувати ефективність виробництва. В умовах ливарного цеху, де мають місце високі температури, запиленість, коливання тиску та газовий вплив, наявність надійної системи контролю параметрів є не лише доцільною, а й необхідною.

Існує широкий спектр комерційних та спеціалізованих рішень, які використовуються для автоматичного збору, обробки та передачі даних про фізичні величини, зокрема температуру, вологість, тиск, концентрацію газів і вібрації. Такі системи часто будуються на базі промислових контролерів у поєднанні з SCADA-системами [1, 2, 3, 4], які дозволяють здійснювати централізоване керування, візуалізацію і архівування даних. Проте впровадження таких комплексів пов'язане з високими витратами на обладнання, ліцензії та кваліфікований персонал для їх обслуговування.

Щодо реалізації контролю окремих параметрів, можна виділити типові сенсори, які застосовуються в промислових або напівпромислових умовах:

– температура: DS18B20 (цифровий, водонепроникний, до 125 °C) [5, 6], PT100/PT1000 (промислові платинові терморезистори з аналоговим інтерфейсом) зображений на рисунку 1.1, К-type термопари з підсилювачами MAX6675/MAX31855 для вимірювання до 1000 °C;

										<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							8



Рисунок 1.1 – Датчик P1000 [41]

– газова концентрація (CO<sub>2</sub>): MH-Z14 (NDIR-метод, діапазон до 5000 ppm), Senseair S8 (компактний модуль із калібруванням) зображений на рисунку 1.2, K30 (інтегроване рішення з аналоговим і цифровим виходами);



Рисунок 1.2 – Датчик SenseAir S8 [42]

– вологість і температура повітря: SHT31 (висока точність і стабільність), DHT22 (доступне рішення), HIH-6130 (інтегрований модуль із компенсацією температури);

– атмосферний тиск: BMP280 (цифровий датчик тиску з температурною компенсацією), BME280 (додатково вимірює вологість), MS5611 (висока точність для технічних застосувань) зображений на рисунку 1.3;



Рисунок 1.3 – Датчик MS5611 [43]

– вібрації: MPU-6050 (6-осьовий IMU із гіроскопом), ADXL345 (3-осьовий акселерометр з цифровим інтерфейсом) зображений на рисунку 1.4, промислові датчики на основі п’єзоелектричних елементів (наприклад, серія 352С).



Рисунок 1.4 – Датчик ADXL345 [44]

Особливу увагу слід приділити способам передавання інформації від сенсорів до центрального вузла. Вибір технології бездротового зв’язку залежить від

специфіки об'єкта контролю, відстані між вузлами, наявності перешкод та вимог до енергоспоживання:

– Wi-Fi забезпечує високу пропускну здатність і зручність налаштування, але має обмежене покриття та високе енергоспоживання, що не завжди придатне для автономних вузлів;

– LoRaWAN ідеально підходить для передавання невеликих обсягів даних на великі відстані [7] (до кількох кілометрів), має низьке енергоспоживання, проте потребує додаткової інфраструктури у вигляді шлюзів;

– ZigBee є орієнтований на створення сітчастих мереж із низьким енергоспоживанням, але обмежений радіусом дії і є менш поширеним у порівнянні з іншими технологіями [8, 9];

– Bluetooth Low Energy (BLE) це зручний для локального моніторингу на короткі відстані (до 10–20 метрів), проте має обмежену масштабованість та нестабільність при перешкодах.

На ринку представлено також готові інтегровані рішення, які поєднують апаратну й програмну частину моніторингу:

– Siemens S7 з WinCC це промислова система автоматизації, яка забезпечує високу надійність, масштабованість та підтримку стандартів безпеки. Основними недоліками є висока вартість та складність програмування;

– ICP DAS це модульна система збору та передавання даних, з гнучкою структурою побудови, підтримкою різних інтерфейсів (Modbus, Ethernet, RS-485). Рішення підходить для побудови ієрархічної архітектури з розподілом вузлів за функціональним призначенням;

– Zabbix/ZBX-Sensor – програмне open-source рішення, яке дозволяє створювати гнучку інфраструктуру моніторингу з можливістю інтеграції датчиків через API або SNMP. Підтримує візуалізацію, алерти і журнали подій;

– LoRa/LoRaWAN шлюзи – оптимальні для розосереджених територіальних об'єктів, наприклад, великого цеху або кількох суміжних будівель. Забезпечують тривалу автономну роботу сенсорів завдяки низькому споживанню енергії.

Оцінюючи наявні варіанти, важливо враховувати не лише технічні характеристики, а й доступність технічної підтримки, відкритість протоколів, ліцензійні обмеження, а також вимоги до адаптації в рамках конкретного виробничого середовища. Для невеликих та середніх підприємств ливарного профілю доцільним є застосування мікроконтролерних платформ із відкритим програмним забезпеченням, які дають змогу за короткий термін реалізувати функціональну, адаптивну та масштабовану систему моніторингу.

Крім технічних характеристик апаратної частини, важливо також враховувати програмне забезпечення, яке супроводжує або використовується для обробки даних. Найбільш поширеними інструментами є MQTT-брокери (Mosquitto, EMQX) [10, 11, 12], що використовуються для реалізації публікації-підписки в архітектурі IoT, а також платформи Node-RED, Domoticz, OpenHAB та Home Assistant, які дозволяють з мінімальним програмуванням візуалізувати дані, створювати графіки та логіку взаємодії компонентів.

У практиці впровадження сенсорних систем на базі ESP8266 (рисунок 1.5) важливе місце посідає також вибір прошивки. Серед найпоширеніших варіантів є ESPHome, Tasmota та MicroPython.

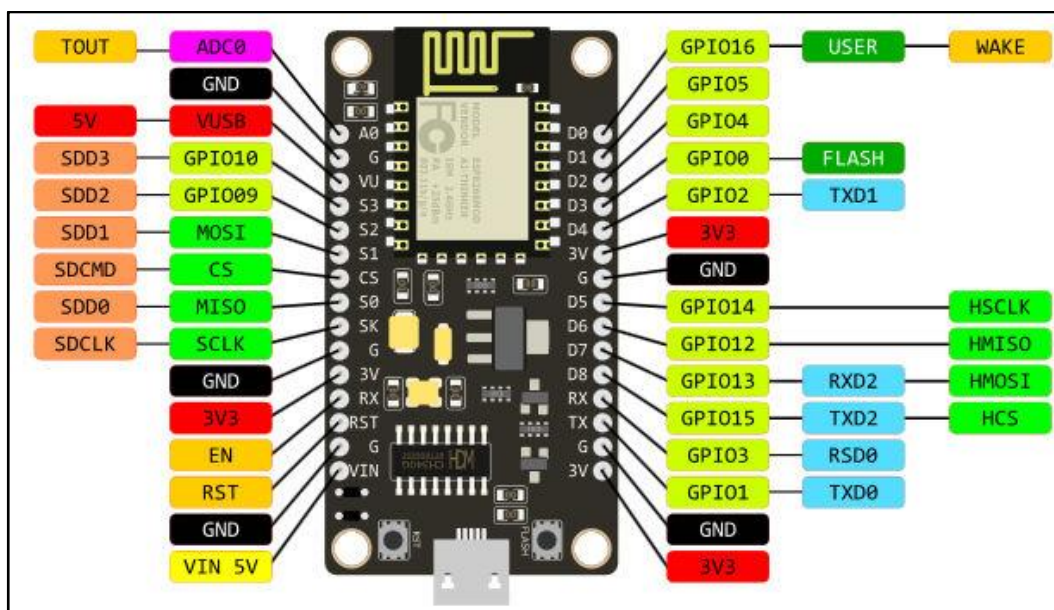


Рисунок 1.5 – Модуль ESP8266

Прошивка ESPHome орієнтована на інтеграцію з Home Assistant і дозволяє описувати логіку пристрою мовою YAML без необхідності писати код. Tasmota забезпечує гнучке налаштування через веб-інтерфейс, підтримує велику кількість сенсорів і керованих пристроїв, а також має активну спільноту користувачів.

Особливе значення в контексті проектування має здатність до масштабування системи. На початковому етапі впровадження сенсорної мережі може бути достатньо одного або двох вузлів для відстеження основних параметрів. Проте з часом підприємство може прийняти рішення про розширення контролю на інші зони виробництва, склади або транспортні вузли. У цьому випадку необхідна підтримка масштабування на рівні топології мережі, маршрутизації даних, а також на рівні програмної інтеграції.

Для побудови системи з десятків вузлів доцільно передбачити центральний координатор, який виконує роль агрегатора даних і передає їх до сервера або хмари. У простих реалізаціях цю функцію може виконувати ще один ESP-контролер або одноплатний комп'ютер, що працює в ролі брокера, логгера та інтерфейсу виводу. Цей підхід дозволяє централізовано управляти логікою реагування, зберігати архіви та виводити повідомлення в реальному часі.

Значну увагу також слід приділити енергозабезпеченню сенсорних вузлів. Якщо для деяких вузлів можлива організація живлення від стаціонарної мережі, то в інших випадках (наприклад, мобільні або тимчасово розміщені вузли) може знадобитися живлення від батарей або акумуляторів. У такому разі доцільно використовувати компоненти з низьким енергоспоживанням, реалізовувати сплячі режими та забезпечувати періодичне пробудження для зчитування й передавання даних.

У проектних системах слід передбачити й можливість оновлення прошивок по повітрю (OTA) [13], що дозволяє змінювати логіку пристрою без фізичного доступу до нього. Це особливо актуально для закритих або небезпечних зон ливарного цеху. Реалізація OTA дозволяє оперативно оновлювати безпекові

					<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

параметри, виправляти помилки й розширювати функціональність без призупинення роботи системи.

Таким чином, розробка системи моніторингу критичних параметрів ливарного середовища потребує комплексного підходу: від аналізу фізичних процесів і вибору сенсорів до побудови мережевої архітектури, енергозабезпечення та програмної інтеграції. Обираючи рішення, слід орієнтуватися не лише на базову функціональність, але й на можливість адаптації до умов експлуатації, простоту обслуговування, підтримку відкритих стандартів та перспективу масштабування у рамках цифровізації виробництва.

### 1.3 Визначення вимог до системи

На основі аналізу предметної області та дослідження існуючих технічних рішень можна сформулювати комплекс вимог до проєктованої системи моніторингу критичних параметрів ливарного цеху. Ці вимоги охоплюють як функціональні, так і нефункціональні аспекти, необхідні для забезпечення стабільної, безпечної та ефективної експлуатації системи в умовах реального виробництва.

Система повинна забезпечувати безперервний моніторинг температури, вологості, атмосферного тиску, рівня вібрації та концентрації вуглекислого газу у визначених зонах ливарного цеху. Дані повинні зчитуватись із сенсорів у режимі, близькому до реального часу, з періодом оновлення не більше п'яти-десяти секунд для критичних параметрів. У разі перевищення встановлених граничних значень необхідно забезпечити автоматичне сповіщення операторів через локальні засоби (світлова чи звукова сигналізація), а також через централізовану систему повідомлень (інформаційне табло, мобільний інтерфейс, push-повідомлення або інші засоби оповіщення). Зібрані дані повинні накопичуватись у базі даних або тимчасовому журналі для подальшого аналізу, побудови графіків та формування звітів. Також передбачається можливість гнучкого налаштування порогових значень та часових параметрів для кожного сенсора окремо.

					<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Кожен вузол системи має ідентифікуватися окремо, підтримувати зв'язок із центральним вузлом або сервером, а також бути здатним до віддаленого оновлення прошивки. У разі втрати зв'язку передбачено збереження даних у буфері пам'яті з подальшою передачею після відновлення каналу.

До нефункціональних вимог належить забезпечення надійності системи у цілодобовому режимі роботи. Доступність системи повинна становити не менше 99 % часу в місячному циклі. Архітектура має бути масштабованою: повинна підтримуватись можливість підключення додаткових вузлів без необхідності зміни ядра системи. Якщо передбачається автономне живлення, вузли повинні працювати не менше шести місяців без заміни або підзарядки елементів живлення, за рахунок використання енергозберігаючих режимів

Ключовим є також питання захисту. Система має передбачати захист даних на мережевому рівні (наприклад, через протоколи з шифруванням – SSL, TLS, зашифрований MQTT тощо), а також захист корпусу від механічних пошкоджень, пилу та вологи (зокрема ступінь захисту не нижче IP54).

Щодо взаємодії з іншими системами, очікується підтримка обміну даними за допомогою відкритих протоколів, таких як I<sup>2</sup>C [14, 15, 16], UART, SPI, MQTT, HTTP або Modbus. Це дозволить інтегрувати рішення в існуючу інфраструктуру підприємства або доповнити його іншими системами автоматизації.

Важливим критерієм також є простота обслуговування. Конфігурація вузлів, зміна параметрів роботи, оновлення програмного забезпечення повинні виконуватись дистанційно [17]. За необхідності допускається локальне налаштування через інтерфейс, проте основним способом вважається OTA-оновлення.

До додаткових вимог віднесено такі положення:

–вузли повинні бути адаптовані до монтажу на нерівних, вібруючих поверхнях;

–при втраті зв'язку з мережею дані мають буферизуватись;

					<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

–для користувача має бути доступний інтерфейс із виводом актуальних значень параметрів, історії змін та спрацювань тривоги.

Узагальнюючи, наведені вимоги формують цілісну основу для створення технічного завдання і подальшого етапу проектування апаратно-програмного комплексу для моніторингу параметрів середовища у ливарному виробництві.

#### 1.4 Постановка задачі

Розробка системи оповіщення про критичні значення параметрів у ливарному цеху обумовлена необхідністю забезпечення технологічної безпеки та стабільності виробничого процесу шляхом автоматизованого моніторингу фізичних умов навколишнього середовища. В умовах підвищеного ризику аварійних ситуацій, пов'язаних із перевищенням допустимих значень температури, вібрацій, вологості, тиску та газових викидів, виникає потреба у гнучкому та доступному технічному рішенні, яке дозволить своєчасно виявляти небезпечні стани та інформувати відповідальний персонал.

Система повинна представляти собою розподілену мережу сенсорних вузлів, кожен з яких забезпечує безперервне вимірювання одного або декількох параметрів у своїй зоні відповідальності. Зокрема, температурні сенсорні вузли мають бути чутливими до змін у діапазоні до двохсот градусів Цельсія, забезпечуючи високу точність вимірювання та стійкість до локального перегріву. Вузли, відповідальні за контроль вмісту газів, повинні мати можливість розпізнавати концентрацію вуглекислого газу на рівні до тисячних часток об'єму та мати термохімічну стійкість.

Модулі вимірювання тиску та вологості повинні працювати стабільно при високій запиленості та змінних мікрокліматичних умовах, з вбудованим температурним компенсуванням. Вузли для виявлення вібрацій повинні фіксувати коливання у тривимірному просторі з високою частотою дискретизації та мати механічну ізоляцію від спотворень, викликаних монтажною поверхнею.

					<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Кожен вузол має бути оснащений модулем бездротової передачі даних, здатним підтримувати зв'язок у межах типового виробничого середовища, а також локальним пристроєм сповіщення (світловим або звуковим) для аварійних ситуацій. Такий підхід дозволяє сформувати адаптивну, масштабовану архітектуру системи, придатну для інтеграції у наявну інфраструктуру підприємства без необхідності капітальних втручань у технологічний процес.

Функціональні можливості системи:

- безперервне вимірювання температури, вібрацій, вологості, тиску та концентрації газів;
- передача зібраних даних по Wi-Fi до центрального вузла або сервісу зберігання;
- аналіз значень у реальному часі з можливістю фіксації перевищення порогових параметрів;
- виведення результатів на локальний інтерфейс або хмарну платформу (при наявності);
- сповіщення персоналу за допомогою світлових/звукових сигналів або повідомлень;
- підтримка гнучкого налаштування порогів та зони відповідальності кожного підвузла.

Апаратна частина системи повинна відповідати вимогам стабільної роботи в умовах промислового середовища та забезпечувати точне вимірювання необхідних параметрів.

Сенсорні вузли мають бути здатними функціонувати від стабільних джерел живлення низької напруги, підтримуючи роботу електронних компонентів при зниженій або підвищеній температурі.

Передбачається використання засобів бездротового зв'язку з підтримкою передачі даних на відстань, достатню для покриття всієї площі цеху, навіть за наявності конструктивних перешкод і радіочастотних завад. Для підвищення надійності кожен вузол повинен мати вбудовані механізми локального оповіщення

у вигляді світлових або звукових сигналів, які залишаються активними навіть у разі втрати зв'язку із системою збору даних. Конструкція сенсорів має передбачати захист від пилу, бризок та вібрацій, а електричні з'єднання – бути стійкими до перепадів температур і напруги, що характерно для умов роботи у ливарному цеху.

Умови експлуатації:

- температура навколишнього середовища: від мінус 10 до плюс 50 градусів

Цельсія;

- вологість повітря: до 90 % без конденсації;
- стабільна робота у виробничих умовах з вібраціями та запиленістю;
- захист електронних компонентів у корпусах із ступенем захисту не нижче

IP54.

Обмеження та припущення:

- система не передбачає активного втручання в технологічний процес;
- передбачається доступ до Wi-Fi-мережі цеху або наявність локального точки доступу;
- допускається використання зовнішнього джерела живлення або Power Bank для автономних вузлів.

В ході розробки мікросистеми повинно бути розроблено: структурна схема, електричні принципові схеми підвузлів, опис алгоритмів роботи, скетчі для мікроконтролера, інструкція користувача, результати тестування.

На виході очікується працездатна сенсорна система, розгорнута у вигляді трьох підвузлів і центрального вузла, яка забезпечує фіксацію та сповіщення про критичні значення параметрів у межах визначених зон ливарного цеху.

Кінцевим результатом роботи мікросистеми стане інтегрована платформа, здатна адаптуватися до змін технічних умов і розширюватися без значних модифікацій архітектури при збільшенні кількості контрольованих зон або впровадженні нових типів сенсорів.

					<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ОПОВІЩЕННЯ ПРО КРИТИЧНІ ЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ

### 2.1 Архітектура та структура системи

Розробка архітектури системи моніторингу критичних параметрів у ливарному цеху має ґрунтуватися на принципах надійності, масштабованості, адаптивності до умов експлуатації та простоти обслуговування.

Структура має враховувати особливості просторової організації цеху, зокрема наявність різнорівневих зон із різними фізичними характеристиками середовища, такими як температура, вологість, запиленість і вібрації.

Архітектура системи реалізується у вигляді ієрархії підвузлів і центрального вузла. Вихідна схема передбачає підключення п'яти сенсорів до плати NodeMCU [18, 19] на базі ESP8266.

Передбачено живлення 3.3 V або 5 V через VIN/3V3 та GND. Використовуються стандартні шини передачі даних: I<sup>2</sup>C (SDA–D2, SCL–D1), 1-Wire (DQ–D4) та UART (TX0, RX0). Для загального розуміння була імплементована схема поділу на підвузли (рисунок 2.1).

Для забезпечення гнучкості, система ділиться на три підвузли за зональним принципом, відповідно до топології цеху:

- у зоні плавлення: сенсори вимірювання температури лиття та CO<sub>2</sub>;
- у зоні складування: сенсори тиск + температура та вологість + температура;
- у зоні робочого майданчика: сенсор вібрації;
- окремо реалізовано центральний вузол-агрегатор, який збирає дані з усіх підвузлів.

Кожен підвузол реалізований як окрема апаратна збірка на ESP-платі з відповідним розведенням шин, живленням та схемотехнічними елементами.

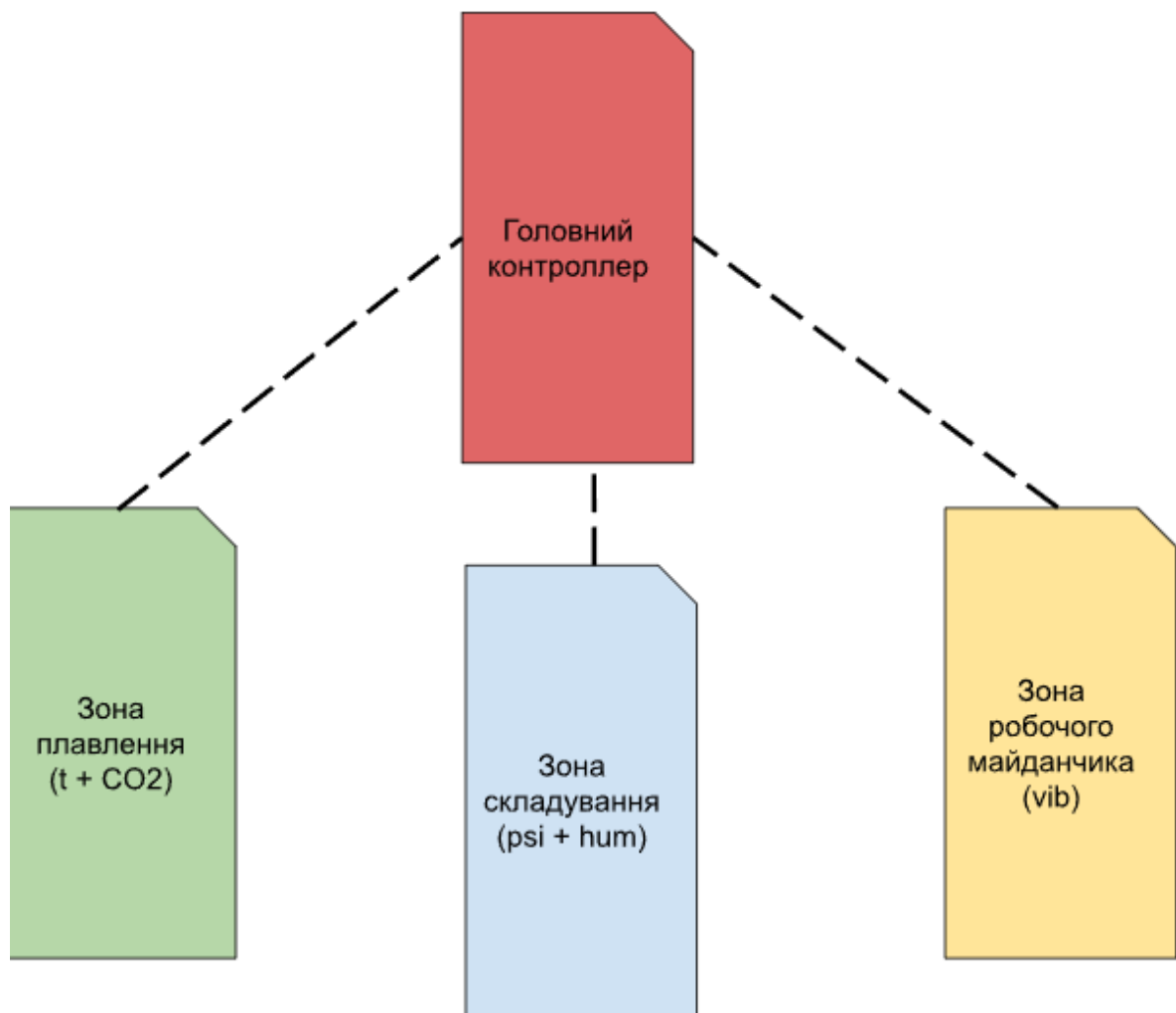


Рисунок 2.1 – Схема поділу система на підвузли

Усі вузли мають живлення через USB 5 V із перетворенням у 3.3 V за допомогою LDO-стабілізаторів [20]. Приділено увагу розміщенню пасивних компонентів безпосередньо біля ніжок контролерів та мікросхем для зниження перешкод і стабілізації напруги. Застосовано логіку Wire для одиночних сигналів, а Bus – для організованих груп шин [21].

На рівні схемотехнічного проектування важливими є підходи до впорядкування схем: використання Supply Flags для джерел живлення дозволяє уникнути зайвих перетинів провідників, net-labels спрощують відстеження логічних зв'язків між вузлами, а застосування Bus Entry підвищує зчитуваність структурованих з'єднань, особливо у вузлах з кількома компонентами на одній шині.

Такий підхід суттєво полегшує налагодження, модифікацію та масштабування системи.

Окрема увага приділяється модульності: структура дозволяє при необхідності виводити окремі підвузли з експлуатації без порушення загального функціонування системи.

Усі вузли можуть бути встановлені в ізольовані корпуси з класом захисту не нижче IP54 та розміщені на монтажних панелях у безпечних зонах відповідно до електробезпеки. Кріплення передбачає демпферування вібрацій та ізоляцію від джерел високих температур [22].

Центральний агрегатор реалізований на ESP8266 і виконує функції збору, обробки та маршрутизації даних із трьох підвузлів. Зв'язок між вузлами здійснюється через Wi-Fi з використанням MQTT або HTTP-протоколів.

Центральний вузол також відповідає за агрегування інформації, фільтрацію шумів, виявлення порушень заданих порогів і формування сигналів тривоги [23, 24]. При потребі можливе дублювання критичних повідомлень локально (через звукову/світлову сигналізацію) та на зовнішній сервер (через HTTP). Усі обчислення й логіка обробки даних реалізовані безпосередньо на ESP8266 без використання зовнішніх обчислювальних платформ.

Уся структура враховує подальший розвиток: система легко розширюється як на рівні кількості сенсорів, так і за функціональністю.

Наприклад, можливе підключення додаткових сенсорів газів, шуму, освітленості або візуального контролю на базі камер з обчислювальним модулем. Така відкритість архітектури відповідає принципам побудови IoT-систем і дозволяє адаптувати систему під потреби цифрового виробництва.

Таким чином, архітектура розроблена у відповідності до фактичної топології виробничого середовища, обраного обладнання та технічних обмежень, забезпечуючи простоту модульної реалізації, зручність обслуговування, масштабованість та відповідність умовам ливарного цеху.

						<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			21

## 2.2 Вибір та обґрунтування протоколів зв'язку та взаємодії

У системі моніторингу критичних параметрів ливарного цеху ключовими чинниками при виборі протоколів взаємодії є енергоефективність [25, 26, 27], простота реалізації, стабільність зв'язку в умовах промислового середовища та підтримка низькорівневих пристроїв на базі ESP8266. Ураховуючи ці вимоги, обрано комбінацію локальних цифрових інтерфейсів для зчитування даних та мережевого протоколу MQTT для передачі телеметрії [28, 29, 30].

Для бездротового передавання даних від периферійних вузлів до центрального агрегатора обрано MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Основними перевагами цього протоколу є:

- низьке навантаження на трафік та обчислювальні ресурси;
- підтримка моделі publish/subscribe, яка дозволяє масштабувати мережу;
- можливість встановлення рівнів QoS, що гарантує доставку повідомлень;
- широке поширення бібліотек MQTT для ESP8266 (зокрема, PubSubClient);
- зручна організація тем за зонами та типами параметрів (наприклад, /zone1/temperature).

MQTT використовує TCP-з'єднання поверх Wi-Fi, що підтримується ESP8266 без додаткових модулів.

Протокол дозволяє організувати простий брокер (наприклад, на центральному ESP8266) без потреби в зовнішньому сервері. У разі потреби дані можна надалі передавати на хмарні сервіси за допомогою HTTP-запитів або Webhooks [31, 32, 33, 34].

Протокол HTTP використовується як допоміжний засіб для зовнішніх викликів у разі тривоги або для надсилання агрегованих звітів. Він дозволяє просто реалізувати запити до сторонніх API або інтерфейсів операторів.

Для реалізації програмного забезпечення було обрано середовище Arduino IDE (рисунк 2.2) через його зручність, підтримку ESP8266, велику кількість бібліотек, інтеграцію з сенсорами та доступну документацію.

Код проекту побудовано на мові C/C++ із використанням бібліотек PubSubClient (MQTT), Wire (I<sup>2</sup>C), DallasTemperature (DS18B20), Adafruit\\_Sensor, Adafruit\\_BMP280, Adafruit\\_SHT31, MPU6050 та інших [35, 36].

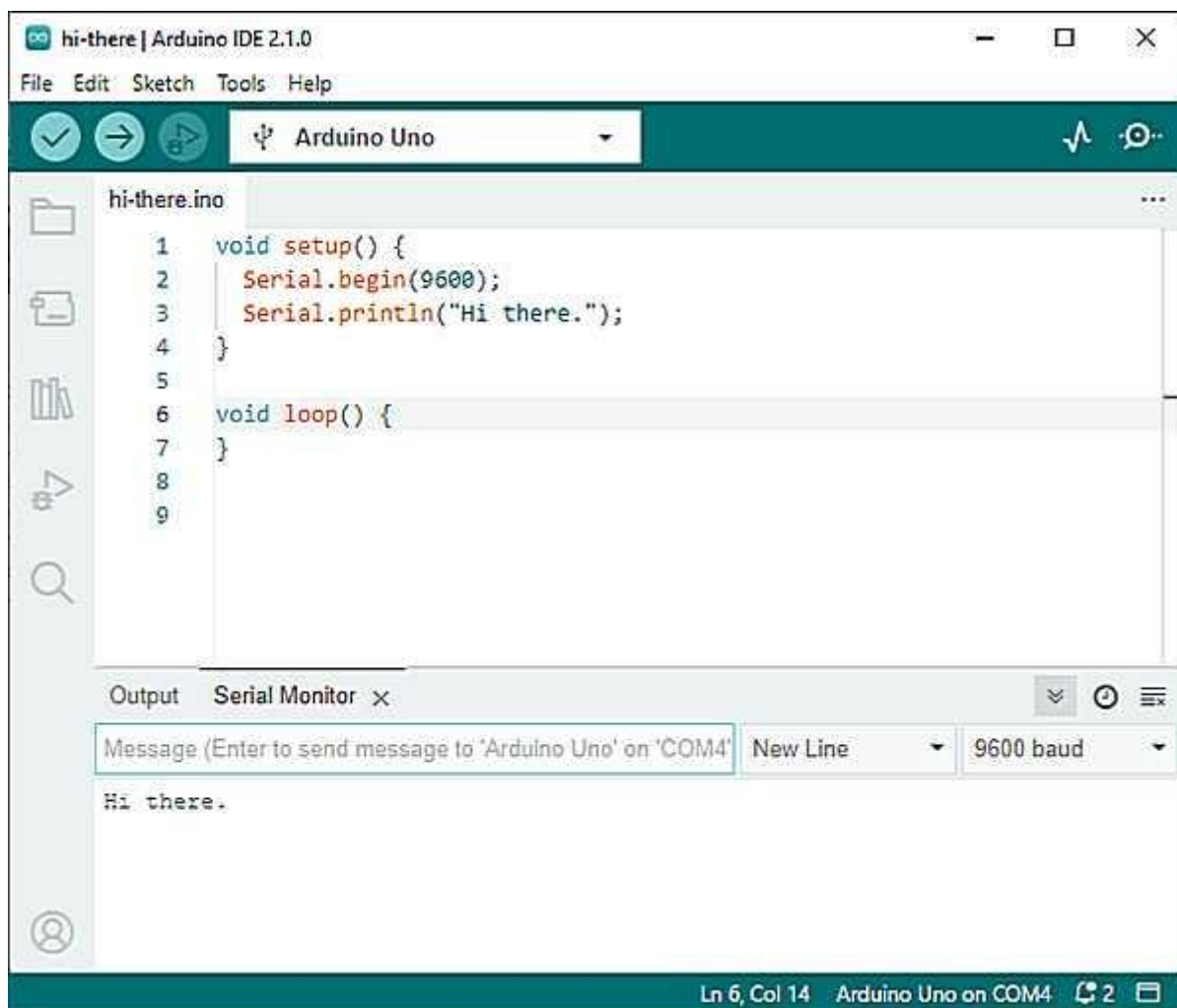


Рисунок 2.2 – Arduino IDE

Це забезпечує швидку інтеграцію компонентів без написання низькорівневого коду вручну.

Для схемотехнічного проектування використано програму EasyEDA (рисунок 2.3), яка дозволила швидко створити структуровані схеми з використанням Supply Flags, net labels, та Bus Entry. Усі схеми були розроблені з дотриманням принципів електробезпеки, чистоти розведення та можливості подальшого трасування друкованих плат.

Як інструмент для верифікації роботи алгоритмів, логіки взаємодії між вузлами та форматів даних використовувався віртуальний симулятор Wokwi, який дозволив моделювати роботу ESP8266 з підключеними сенсорами в режимі реального часу, включаючи обробку MQTT-повідомлень, таймерів, зчитування значень та реакцію системи без використання фізичних пристроїв. Крім того, застосовувалися симулятори MQTT (наприклад, MQTT.fx або MQTT Explorer).

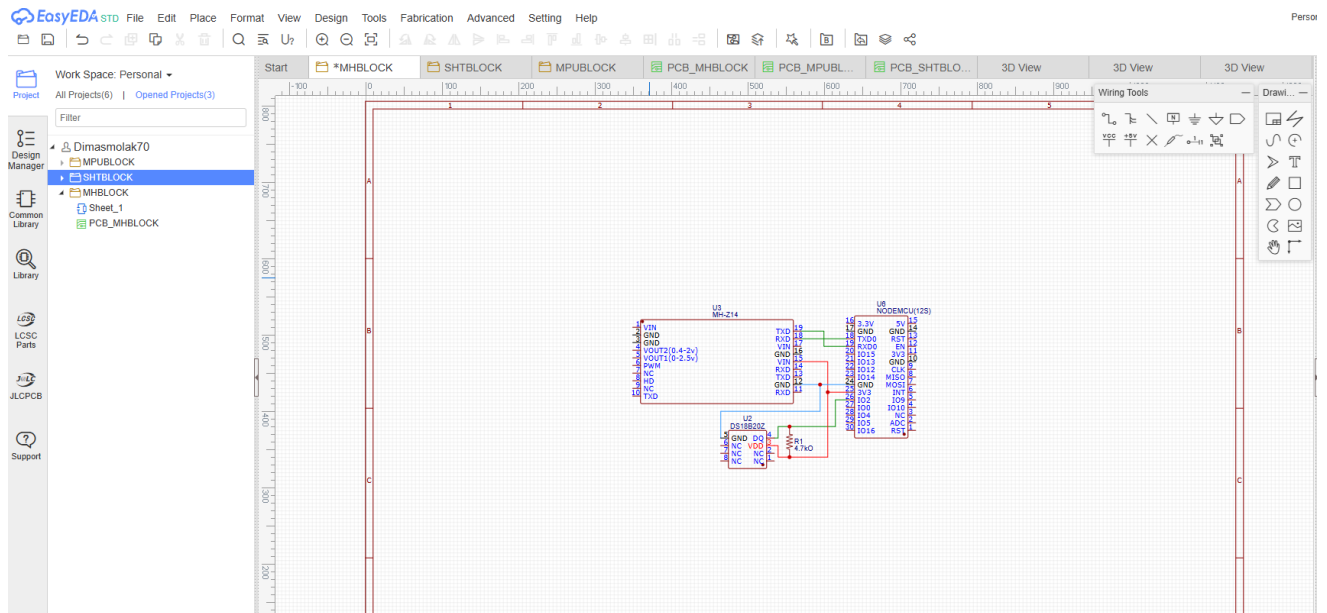


Рисунок 2.3 – Середовище схемотехнічного проектування EasyEDA

Такі симулятори [37, 38] дозволяли відслідковувати активність тем, бачити повні повідомлення, тестувати публікацію й підписку застосовувалися симулятори MQTT (наприклад, MQTT.fx або MQTT Explorer), які дозволяли відслідковувати активність тем, бачити повні повідомлення, тестувати публікацію й підписку без участі фізичних вузлів. Це спростило діагностику та налагодження логіки обробки подій.

Кожен з апаратних модулів було обрано на підставі відповідності вимогам технічного завдання:

- DS18B20 за точність і простоту інтеграції через 1-Wire;

- МН-Z14 за наявність каліброваного виходу CO<sub>2</sub> та простоту роботи через UART;
- BMP280 і SHT31 за стабільність показників, мінімальне енергоспоживання та інтеграцію через I<sup>2</sup>C;
- MPU6050, як компактний і доступний датчик вібрацій, сумісний із ESP.

Отже, обрана система взаємодії базується на перевірених, енергоефективних і підтримуваних протоколах, компонентах та програмних інструментах, що забезпечують надійний обмін даними і відповідність системи умовам реального ливарного середовища.

### 2.3 Побудова структурної схеми системи

На етапі ескізного проектування сформовано загальну функціональну структуру програмно-технічного засобу, що складається з трьох периферійних сенсорних вузлів і одного центрального вузла-агрегатора.

Обґрунтовано вибір компонентів та визначено принципи взаємозв'язку між модулями з урахуванням специфіки умов ливарного цеху і створена структурна схема для кращого розуміння складу системи (рисунок 2.4)

Ця схема відображає склад системи на логічному рівні та показує, через які інтерфейсні порти кожен модуль передає дані. Система складається з трьох периферійних вузлів збору та одного центрального вузла-агрегатора, об'єднаних бездротовим каналом Wi-Fi.

Систему побудовано з урахуванням зонального принципу: кожен вузол відповідає за окрему фізичну зону цеху, що спрощує як монтаж, так і обслуговування. Дані з усіх трьох підвузлів передаються бездротовим каналом Wi-Fi до центрального вузла, також побудованого на ESP8266. Центральний вузол функціонує як брокер MQTT, обробляє отриману інформацію та формує звіти або тривожні сигнали.

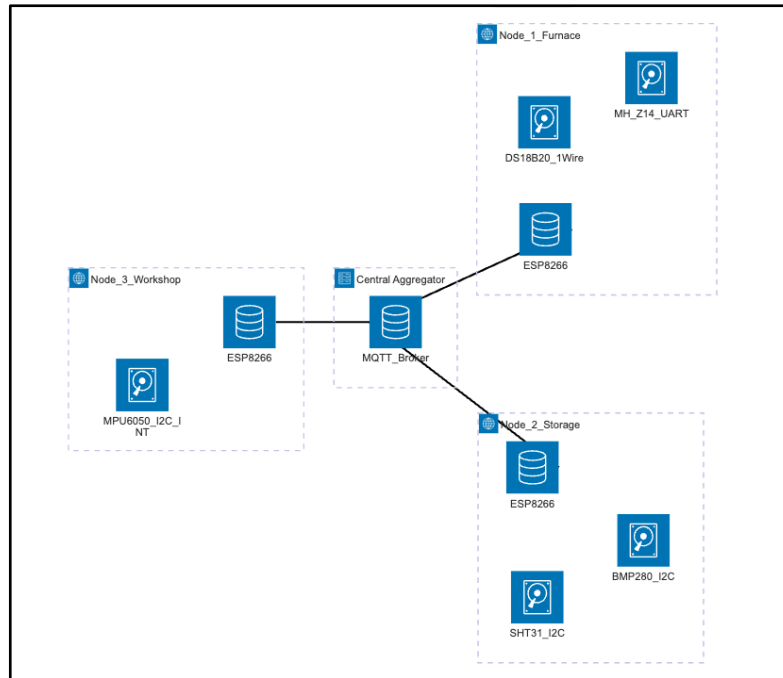


Рисунок 2.4 – Схема компонентна структура

Центральний вузол-агрегатор системи сповіщення складатиметься з таких компонентів:

- контролер: ESP8266 (80 МГц, 80 КБ RAM, 4 МБ Flash);
- порти даних: Wi-Fi 2,4 ГГц (MQTT-брокер), резервна I<sup>2</sup>C-шина (SDA/SCL) для розширень, службовий UART-консоль;
- функції: приймання й агрегація MQTT-повідомлень, перевірка порогів, локальна індикація, буферизація та архівування даних.

Периферійний вузол № 1 «Піч / плавка» системи сповіщення в свою чергу, складатиметься з таких модулів:

- сенсори: DS18B20, МН-Z14;
- порти даних: 1-Wire (DS18B20) для температури лиття; UART 9600 б/с (МН-Z14) для CO<sub>2</sub>;
- діапазон вимірювань: t° –55 ... +125 °С; CO<sub>2</sub> 0 ... 5000 ppm.

Периферійний вузол № 2 «Зона складування» системи сповіщення складатиметься з таких компонентів:

- сенсори: BMP-280, SHT31;

– порти даних: спільна I<sup>2</sup>C-шина (SDA/SCL) для тиску, температури та вологості;

– діапазон: тиск 300 ... 1100 гПа; вологість 0 ... 100 % RH.

Периферійний вузол №3 «Робочий майданчик» складатиметься з таких компонентів

– сенсор: MPU-6050;

– порти даних: I<sup>2</sup>C-шина (SDA/SCL) для акселерометр-/гіроскоп-даних; цифровий вихід INT для сигналів перевищення вібраційних порогів;

– діапазон: ±2 g ... ±8 g по прискоренню, до ±2000 °/с по кутовій швидкості.

Таким чином, на етапі ескізного проектування сформовано логічну структуру системи, обґрунтовано вибір архітектури «багато периферійних вузлів – один центральний агрегатор» [39, 40], а також визначено основні схеми підключення елементів, типи взаємодії та принципи компоновки електронних компонентів відповідно до умов промислової експлуатації.

## 2.4 Побудова схеми і алгоритму функціонування системи

Алгоритм функціонування проектованої системи моніторингу визначає послідовність дій, яку виконують окремі вузли для збору, обробки та передавання даних у режимі реального часу. У рамках запропонованої архітектури з трьома периферійними вузлами та одним центральним агрегатором, вся логіка роботи розподілена між сенсорними модулями (на ESP8266) та головним вузлом (також на ESP8266), що виконує роль координатора, що зображено на функційній схемі (рисунок 2.5).

Для зчитування показників з сенсорів у межах одного вузла використано стандартні протоколи. У нашому вузлі для зчитування показників сенсорів використовується три основні протоколи обміну даними. Для роботи з датчиками BMP280, SHT31 та MPU6050 застосовано шину I<sup>2</sup>C, яка дозволяє підключити одразу кілька пристроїв до однієї лінії, значно заощаджуючи проводи та спрощуючи

монтаж. Температурний сенсор DS18B20 з'єднано через інтерфейс 1-Wire – завдяки унікальним адресам кожного чипа на цій шині можна одночасно опитувати декілька датчиків, використовуючи лише один провід даних.

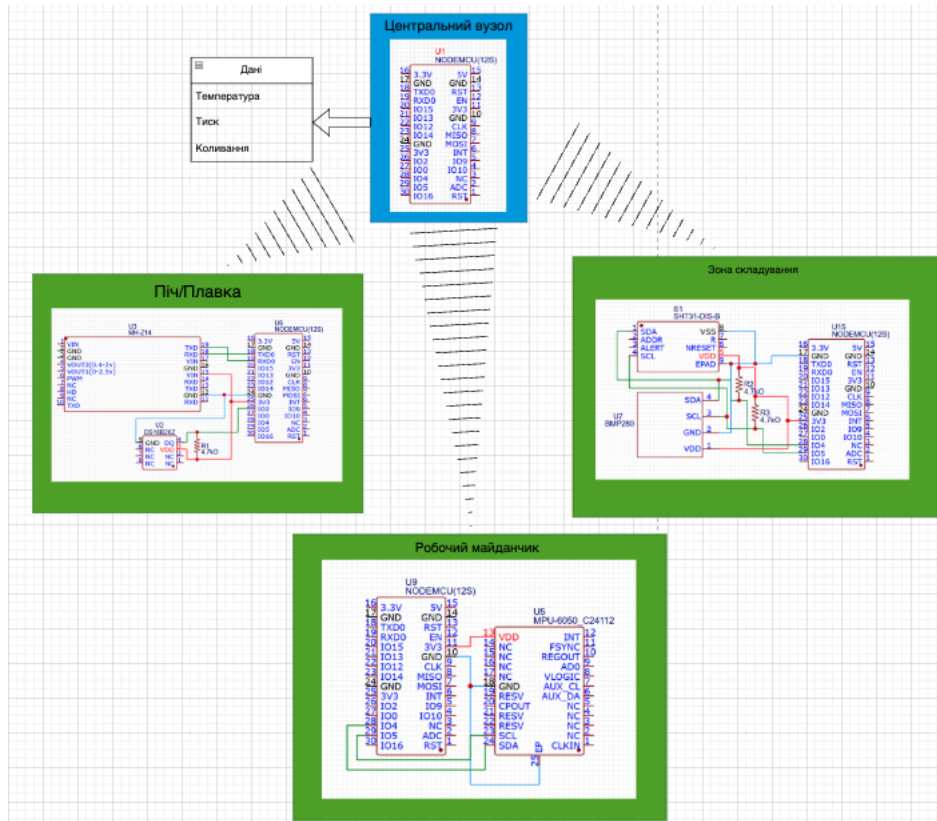


Рисунок 2.5 – Схема функційна

Температурний сенсор DS18B20 з'єднано через інтерфейс 1-Wire – завдяки унікальним адресам кожного чипа на цій шині можна одночасно опитувати декілька датчиків, використовуючи лише один провід даних. Для інфрачервоного датчика вуглекислого газу MH-Z14 застосовується послідовний інтерфейс UART, що забезпечує двосторонній обмін інформацією; оскільки рівень сигналу MH-Z14 становить 5 В, на лінії передачі даних встановлено простий дільник напруги, який узгоджує рівні з логікою ESP8266. Така комбінація протоколів гарантує надійний та зручний обмін даними між контролером і всіма датчиками, забезпечуючи гнучкість підключень і мінімальні витрати на провідку.

Кожен сенсорний вузол виконує функцію збору даних з одного або кількох датчиків відповідно до своєї зони:

У зоні “Піч/плавка” інсталювано два ключові датчики – цифровий термометр DS18B20, що забезпечує точне вимірювання температури у діапазоні від  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , та інфрачервоний сенсор МН-Z14 для контролю концентрації  $\text{CO}_2$  у повітрі (рисунок 2.6). Датчик DS18B20 підключено до ESP8266 через інтерфейс 1-Wire з підключеним pull-up резистором, що гарантує стабільну роботу в умовах високої температури плавки. Сенсор МН-Z14, у свою чергу, встановлено з використанням UART-зв’язку: TX модуля через ділльник напруги дозволяє віддавати коректні 3,3 В логічних сигналів на RX контролера, а у зворотному напрямку UART-лінії забезпечують передачу команд і зчитування показників концентрації  $\text{CO}_2$  у режимі реального часу.

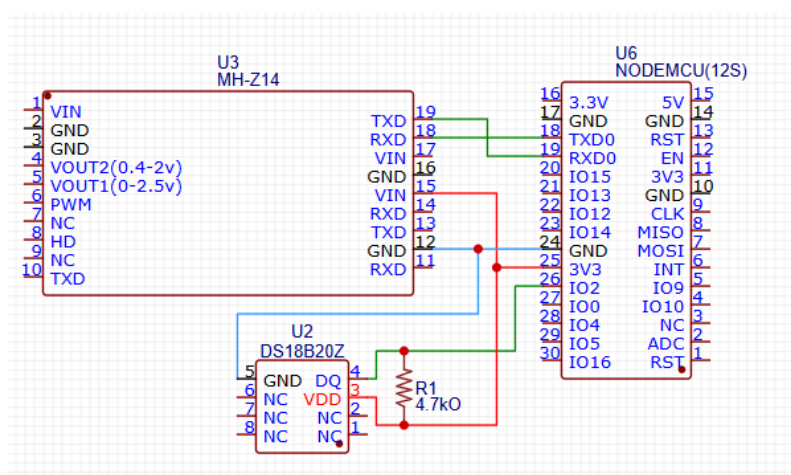


Рисунок 2.6 – Схема зони плавки

У зоні “Складування” для моніторингу атмосферних умов застосовано барометричний датчик BMP-280 та цифровий сенсор вологості та температури SHT31 (рисунок 2.7). Обидва модуля працюють по шині I<sup>2</sup>C, що дає змогу під’єднати їх до тих самих ліній SDA та SCL на контролері ESP8266 із загальними pull-up резисторами 4,7 кΩ. Датчик BMP-280 вимірює атмосферний тиск у діапазоні 300...1100 гПа (з точністю  $\pm 1$  гПа) та температуру довкілля ( $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а SHT31,

завдяки власному алгоритму компенсації та високій роздільній здатності ( $\pm 1,5\%$  RH та  $\pm 0,3\text{ }^\circ\text{C}$ ), забезпечує точний контроль вологості ( $0\dots 100\%$  RH) та температури ( $-40\dots +125\text{ }^\circ\text{C}$ ). Команди на зчитування й обробку даних обох датчиків реалізовано через відповідні Arduino-сумісні бібліотеки, що полегшує їх інтеграцію та знижує затримки при опитуванні шини I<sup>2</sup>C.

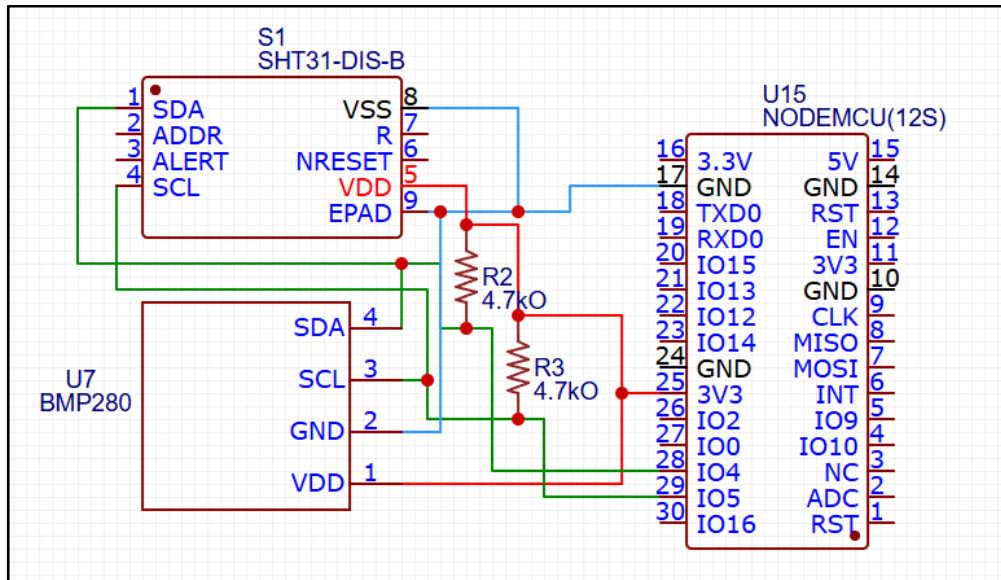


Рисунок 2.7 – Схема зони складування

На “Робочому майданчику” встановлено модуль MPU-6050, який поєднує в одному корпусі тривісний акселерометр і тривісний гіроскоп (рисунок 2.8). Завдяки інтерфейсу I<sup>2</sup>C цей модуль легко підключається до тих самих ліній SDA і SCL, що й BMP-280 та SHT31, – досить лише вказати правильну адресну конфігурацію (AD0 до GND для адреси 0x68 або AD0 до VCC для 0x69). Модуль MPU-6050 дозволяє виявляти вібрації чи різкі коливання металевого обладнання на майданчику з роздільною здатністю 16 біт у межах  $\pm 2\dots \pm 16\text{ g}$  для акселерометра та  $\pm 250\dots \pm 2000\text{ }^\circ/\text{с}$  для гіроскопа.

Він також оснащений внутрішнім температурним сенсором і FIFO-буфером, що дає змогу накопичувати дані і зменшувати навантаження на ESP8266 під час пікових коливань.

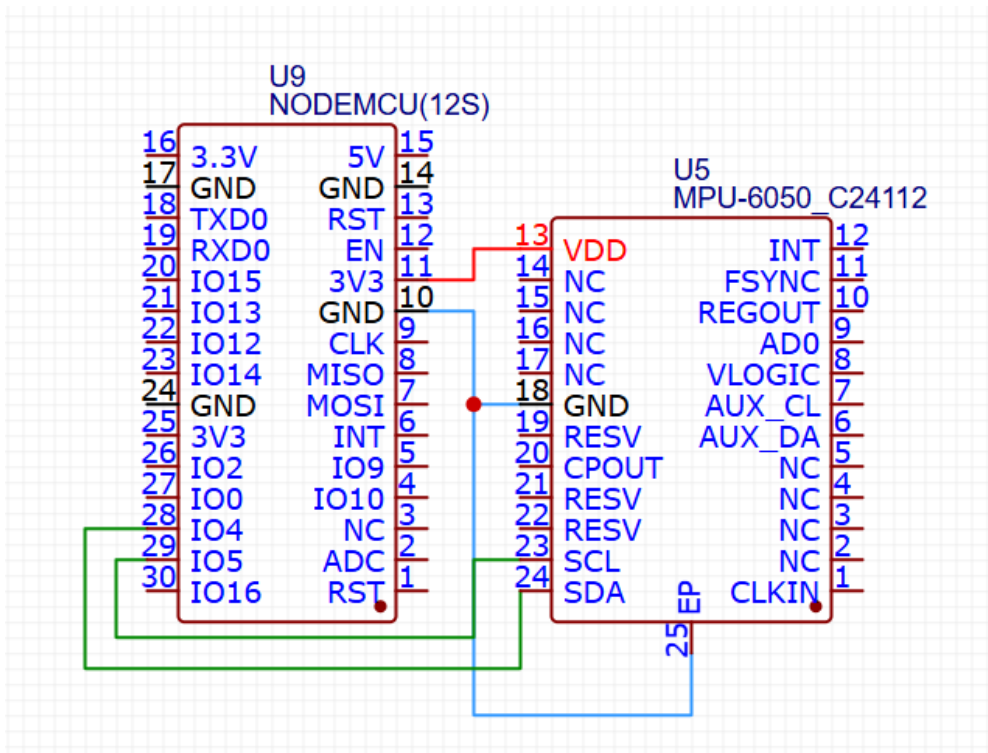


Рисунок 2.8 – Схема зони робочого майданчика

Усі сенсорні вузли базуються на мікроконтролері ESP8266 у модифікації NodeMCU. Обґрунтування вибору полягає у компактності, наявності вбудованого Wi-Fi-модуля, широкій підтримці цифрових інтерфейсів (UART, I<sup>2</sup>C, 1-Wire) та відповідності ресурсів контролера до задач збору, попередньої обробки та передачі даних.

На етапі ескізного проектування було детально уточнено фізичну схему підключення сенсорів до плати ESP8266. Для трьох модулів, що працюють по шині I<sup>2</sup>C – SHT31, BMP-280 та MPU-6050 – реалізовано стандартне з'єднання ліній SDA та SCL з GPIO-портами D2 і D1 відповідно, причому кожна лінія має підтягувальний резистор 4,7 кОм до шини живлення 3,3 В. Датчик DS18B20 підключено через однопровідний інтерфейс 1-Wire до GPIO D4, а для стабільної роботи шини 1-Wire на цю лінію встановлено підтягувальний резистор 4,7 кОм до 3,3 В. Що стосується датчика CO<sub>2</sub> MH-Z14, то його вихід TXD (5 В) через діляник напруги, зібраний із резисторів 10 кОм і 20 кОм, знижує логічний рівень до безпечних 3,3 В, після чого під'єднується до RX0 ESP8266; лінію RXD датчика безпосередньо під'єднано до

TX0 плати. Така конфігурація дозволяє реалізувати надійний обмін даними та точні вимірювання у всіх трьох функціональних зонах системи.

Усі підвузли використовують живлення від USB-джерела 5 V з перетворенням до 3.3 V за допомогою вбудованих стабілізаторів на платі або зовнішніх LDO-модулів. Компонування вузлів забезпечує фізичну ізоляцію від джерел тепла, пилу та вібрацій, а також можливість кріплення в монтажних коробках зі ступенем захисту не нижче IP54.

Робота кожного периферійного вузла починається з ініціалізації сенсорів після подачі живлення або перезапуску. Далі пристрій переходить у основний цикл, у якому з певним інтервалом (наприклад, кожні 5 секунд) зчитуються поточні значення з підключених датчиків. Зчитані значення проходять попередню перевірку на фізичну адекватність та, за необхідності, обробку (усереднення, фільтрація шумів, округлення).

Після обробки дані упаковуються у формат повідомлення (наприклад, JSON) та надсилаються через Wi-Fi-з'єднання на центральний вузол за допомогою MQTT-протоколу. Передбачено використання тем, структурованих за зоною та параметром. У разі втрати зв'язку дані буферизуються у внутрішній пам'яті та повторно надсилаються при відновленні каналу.

Центральний вузол під'єднаний до тієї ж Wi-Fi-мережі та виступає в ролі MQTT-брокера або клієнта (в залежності від конфігурації), що приймає повідомлення від периферійних пристроїв. Надійність обміну забезпечується підтвердженням доставки (QoS) та логікою повторної спроби відправлення у випадку відсутності АСК.

Прийняті дані перевіряються на відповідність граничним значенням. У разі перевищення допустимих меж параметра (якщо температура вища за 60 °C або рівень CO<sub>2</sub> понад 1000 ppm) система генерує локальну тривогу. Ця тривога може бути реалізована як через візуальну індикацію (світлодіод, дисплей), так і через передачу повідомлення на зовнішній інтерфейс.

					<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Крім обробки тривожних подій, центральний вузол формує звітні повідомлення, які включають поточні значення параметрів по всіх зонах, час зчитування, а також статус вузлів. Ці звіти можуть зберігатися в локальному лог-файлі або передаватися через Wi-Fi на хмарний сервер для архівації. На основі цих даних, побудована схема алгоритму роботи системи (рисунок 2.9)

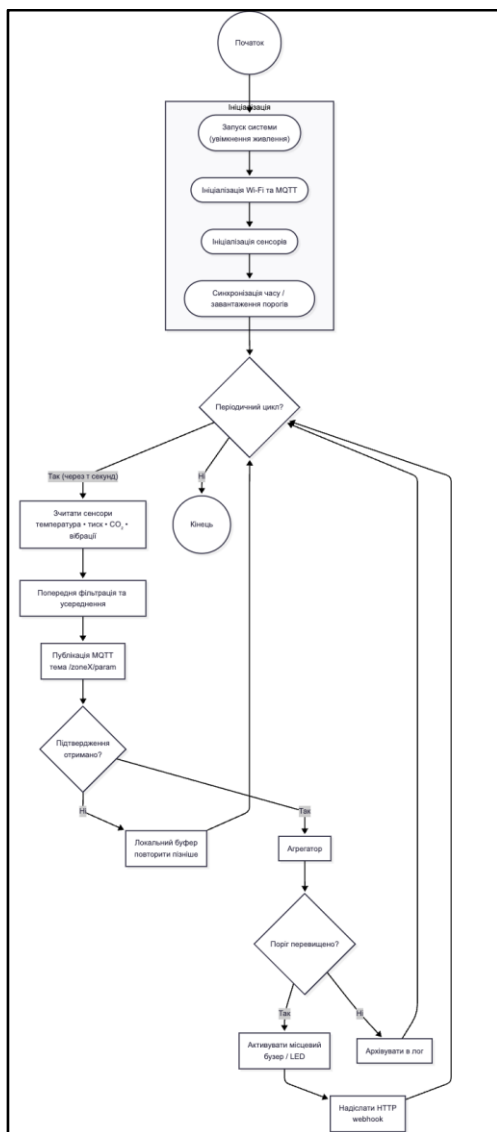


Рисунок 2.9 – Алгоритм роботи системи

Отже, алгоритм функціонування базується на періодичному зчитуванні, обробці, передаванні та аналізі сенсорних даних із мінімальною затримкою та підтримкою механізмів реагування у випадку виявлення критичних значень. Уся

взаємодія відбувається в межах бездротової мережі з дотриманням принципів надійності, розподіленості та гнучкої масштабованості.

## 2.5 Логічна структура програмного забезпечення

Програмне забезпечення системи розробляється для чотирьох вузлів на базі ESP8266, кожен з яких виконує окрему роль у процесі збору, обробки та передачі даних.

Логіка роботи розділяється на функціональні модулі, які відповідають за ініціалізацію апаратних ресурсів, зчитування сенсорних даних, їх попередню обробку, формування повідомлень та керування комунікацією з центральним вузлом. Усі компоненти розробляються мовою програмування C/C++ з використанням середовища Arduino IDE.

Кожен сенсорний вузол побудовано таким чином, що першим кроком виконується ініціалізація всіх необхідних інтерфейсів і ресурсів. Під час першого етапу роботи мікроконтролер налаштовує GPIO-порти, ініціалізує шини I<sup>2</sup>C або UART залежно від підключених датчиків, запускає модуль Wi-Fi та перевіряє доступність усіх сенсорів.

Після успішного встановлення зв'язку з периферією система переходить до безперервного виконання основного циклу, у якому періодично зчитуються значення з кожного з пристроїв. Для цього в програмі організовано окремі підпроцеси: один підпроцес опитує температурний сенсор, інший – барометричний або вологісний модуль, наступний відповідає за зчитування даних інерційного блоку з акселерометром і гіроскопом, а окремий підпроцес щомomentно отримує показники концентрації CO<sub>2</sub>.

Отримані сирові значення передаються на етап обробки даних, де кожен параметр проходить процедуру попереднього усереднення для згладжування шумів, масштабування з урахуванням калібрувальних коефіцієнтів та приведення до

					КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34



зберігається або у внутрішній флеш-пам'яті ESP8266, або виводиться на серійний порт для подальшого аналізу. Завдяки цьому можна відстежувати історію змін показників у кожній зоні та вчасно діагностувати несправності чи аномальні стани обладнання.

Нарешті, на вузлі реалізовано модуль генерації звітів, який збирає останні дані з усіх зон і формує агреговану статистику. Ці звіти можуть відображатися на вбудованому OLED-дисплеї, виводитися через серійну консоль або періодично надсилатися на зовнішній сервер для централізованого збереження та візуалізації.

Таким чином, центральний вузол забезпечує не тільки прийом і обробку даних від сенсорних модулів, а й своєчасну реакцію на аварії, надійне зберігання подій та зручне представлення ключових показників роботи всієї сенсорної мережі.

Програмна логіка організована з урахуванням принципів модульності, повторного використання коду та мінімального енергоспоживання. Використовується поділ на функції та класи з чіткою відповідальністю. Передбачено обробку помилок, перезапуск вузла при зависанні та контроль наявності зв'язку з мережею.

Для комунікації між вузлами обрано бібліотеку PubSubClient, що забезпечує ефективну реалізацію MQTT-протоколу для ESP8266. Додатково застосовуються бібліотеки для роботи з конкретними сенсорами: Adafruit\_Sensor, DallasTemperature, Wire, Adafruit\_BMP280, SHT31, MPU6050 та інші.

Дані з усіх периферійних вузлів збираються та передаються за допомогою стабільного MQTT-каналу у форматі JSON, що забезпечує єдиний підхід до обміну інформацією. Кожен сенсорний вузол після ініціалізації інтерфейсів і запуску Wi-Fi переходить у цикл зчитування, де значення температури, вологості, тиску, вібрацій та концентрації CO<sub>2</sub> піддаються попередній обробці — усередненню й фільтрації шумів. У разі втрати зв'язку з MQTT-брокером ці дані тимчасово зберігаються в локальному буфері, а надсилання відбувається повторно після відновлення з'єднання, що гарантує цілісність критичних вимірювань і відсутність пропусків у логах.

										<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							36

## РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

### 3.1 Реалізація периферійних вузлів на базі ESP8266

Реалізація розподіленої сенсорної мережі системи оповіщення про критичні значення параметрів у ливарному цеху потребувала детального проектування та виготовлення трьох специфічних периферійних вузлів на базі мікроконтролера ESP8266. Кожен з цих вузлів було спроектовано для роботи в конкретних умовах ливарного виробництва з урахуванням особливостей розміщення, експлуатаційних навантажень та вимог до надійності.

Процес реалізації периферійних вузлів розпочався з детального аналізу технічних вимог до кожного модуля та вибору оптимальних схемотехнічних рішень. Модуль «Піч/плавка» був призначений для контролю температури лиття та рівня концентрації вуглекислого газу в зоні плавильних печей, де температура навколишнього середовища може досягати 60-80°C, а концентрація CO<sub>2</sub> критично впливає на безпеку персоналу. Модуль «Зона складування» розроблявся для моніторингу мікроклімату в приміщеннях зберігання сировини та готової продукції, де підтримання оптимальної вологості та контроль атмосферного тиску є ключовими факторами збереження якості матеріалів. Третій модуль «Робочий майданчик» створювався для вимірювання вібрацій технологічного обладнання з метою раннього виявлення механічних неполадок та попередження аварійних ситуацій.

Проектування електричних схем периферійних вузлів здійснювалося в середовищі EasyEDA з використанням сучасних принципів організації схемотехніки для забезпечення максимальної читабельності та технологічності виробництва. Основною особливістю розроблених схем стало широке застосування Supply Flags замість традиційного з'єднання всіх ліній живлення безпосередніми провідниками. Така організація дозволила значно покращити читабельність схем, особливо при роботі з багатоканальними датчиками та складними топологіями підключення.

					КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Supply Flags для напруг 5V, 3V3 та GND були розміщені стратегічно по всій площі схеми, забезпечуючи логічну організацію ліній живлення без створення плутанини проводів

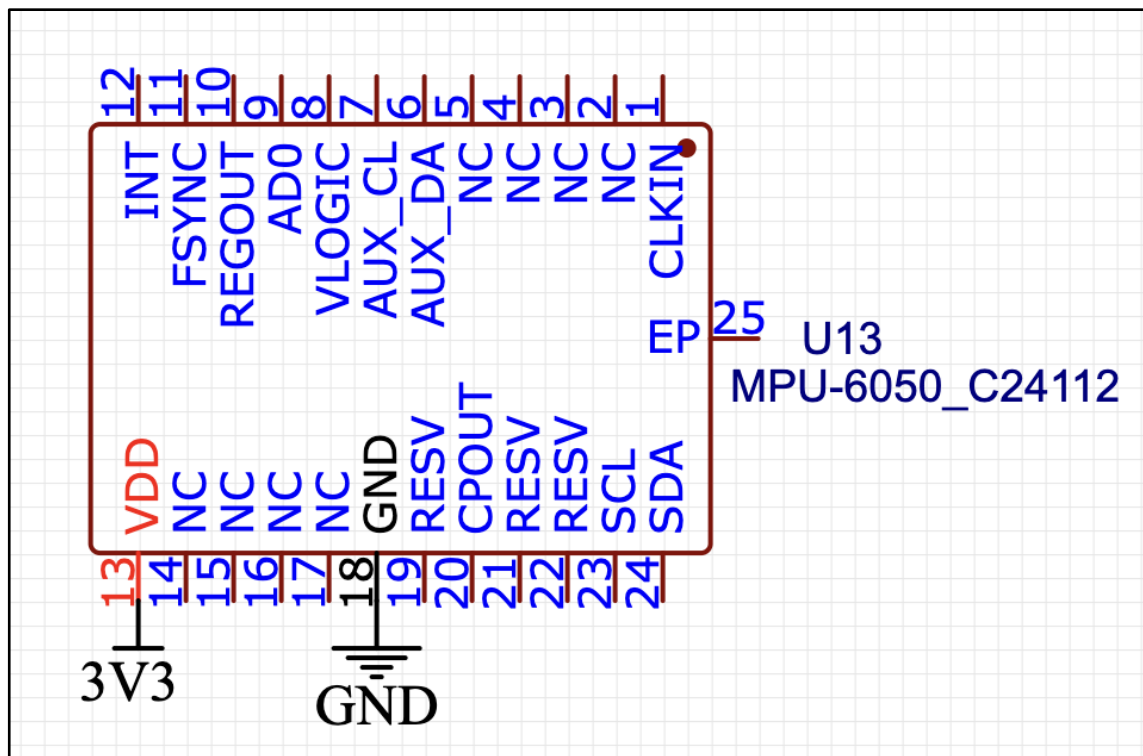


Рисунок 3.1 – Приклад використання Supply Flags для живлення (3V3) та заземлення (GND)

Net-labels використовувалися для позначення всіх сигнальних ліній, включаючи ONEWIRE для протоколу 1-Wire датчика DS18B20, CO2\_TX та CO2\_RX для UART-зв'язку з датчиком MH-Z14, а також I2C\_SDA та I2C\_SCL для шини I<sup>2</sup>C в модулях з відповідними датчиками. Це рішення дозволило створити чіткі та зрозумілі схеми, де кожен сигнал має власне унікальне позначення, що значно спрощує процес налагодження та діагностики готових пристроїв

Особливу увагу було приділено організації I<sup>2</sup>C-з'єднань, де застосовувався тип Bus з відповідними Bus Entry для підключення кількох пристроїв до однієї шини. Такий підхід не тільки покращує візуальне сприйняття схеми, але й значно спрощує процес трасування провідників на друкованій платі, дозволяючи створити більш

компактні та технологічні топології. При проектуванні топології шин особлива увага приділялася мінімізації довжини провідників високочастотних сигналів та забезпеченню належної розв'язки по живленню.

Розміщення пасивних компонентів здійснювалося згідно з найкращими практиками проектування високочастотних пристроїв. Pull-up резистори номіналом 4.7 кΩ для I<sup>2</sup>C та 1-Wire інтерфейсів розміщувалися максимально близько до відповідних пінів мікроконтролера ESP8266, що забезпечує мінімальну індуктивність з'єднань та стабільну роботу цифрових інтерфейсів.

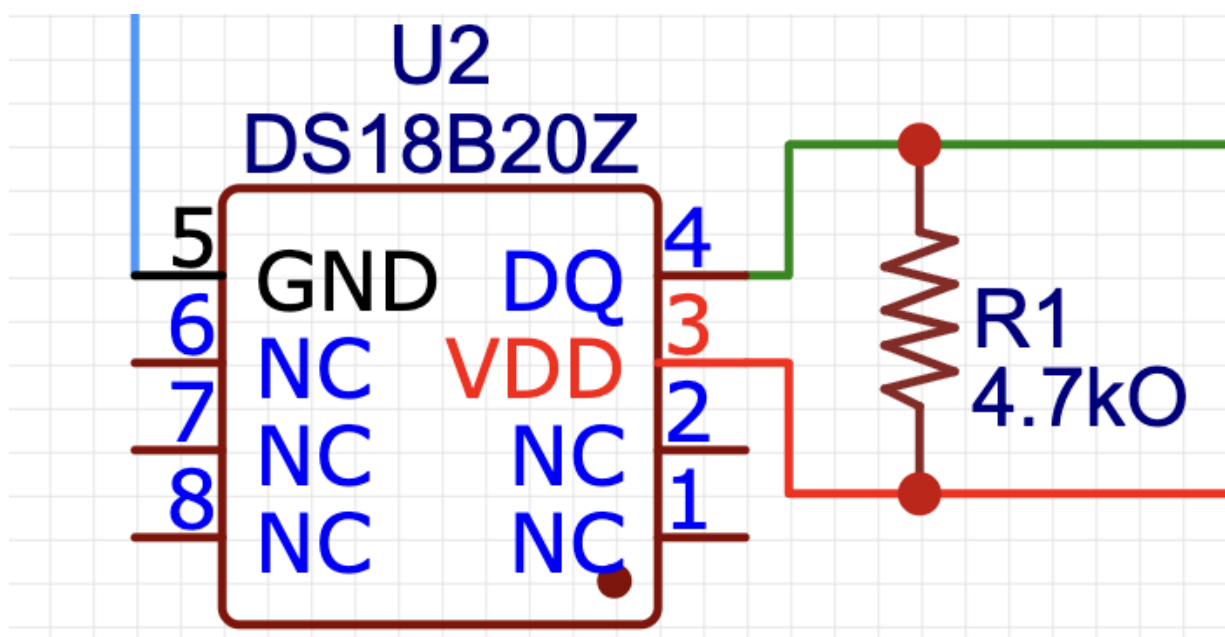


Рисунок 3.2 – Приклад використання резистора при проектуванні схеми

Після завершення проектування схем та компоновання друкованих плат було згенеровано повний комплект Gerber-файлів для промислового виробництва. Цей комплект включав файли мідних шарів для верхнього та нижнього рівнів, файли паяльної маски для захисту провідників від окислення, файли шовкографії з позначеннями компонентів та їх номіналів, а також файли свердління з точними координатами та діаметрами всіх отворів. Додатково були створені Pick and Place файли з координатами встановлення компонентів для можливості автоматизованого монтажу на виробництві. Всі згенеровані файли відповідали міжнародному

стандарту RS-274X та пройшли ретельну перевірку на відсутність помилок через систему Design Rule Check (DRC) середовища EasyEDA.

Модуль «Піч/плавка» розроблявся як найбільш критичний компонент системи, оскільки йому доводиться функціонувати в найважчих умовах ливарного цеху поблизу плавильних печей. Основою модуля є мікроконтролер NodeMCU ESP8266, який забезпечує не тільки обробку даних від датчиків, але й бездротову передачу інформації до центрального сервера системи. Для вимірювання температури розплавленого металу використовується цифровий датчик DS18B20, який працює за протоколом 1-Wire та забезпечує високу точність вимірювань в діапазоні від -55°C до +125°C з роздільною здатністю до 0.0625°C.

Контроль концентрації вуглекислого газу здійснюється за допомогою інфрачервоного датчика MH-Z14, який використовує UART-інтерфейс для передачі даних та забезпечує вимірювання концентрації CO<sub>2</sub> в діапазоні від 0 до 5000 ppm з точністю ±50 ppm. Цей датчик особливо важливий для забезпечення безпеки персоналу, оскільки підвищена концентрація вуглекислого газу в зоні плавильних печей може призвести до серйозних наслідків для здоров'я працівників.

Живлення модуля здійснюється через USB роз'єм типу B, який забезпечує напругу 5V для датчика MH-Z14 та живлення NodeMCU через пін VIN. Внутрішній лінійний стабілізатор NodeMCU перетворює напругу 5V в стабілізовану напругу 3.3V для живлення основного мікроконтролера ESP8266 та датчика DS18B20. Така організація живлення забезпечує сумісність різних компонентів системи та мінімізує кількість зовнішніх компонентів.

NodeMCU розміщено в геометричному центрі друкованої плати для мінімізації довжини всіх з'єднувальних провідників та забезпечення оптимального теплового режиму роботи. Датчик DS18B20 встановлено на краю плати з можливістю його винесення на спеціальну теплопровідну підкладку для забезпечення точного вимірювання температури безпосередньо в зоні розплавленого металу. Лінія DQ датчика підключена до цифрового пина D4 мікроконтролера ESP8266 через pull-up резистор номіналом 4.7 кΩ, який забезпечує

						<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			40

стабільну роботу протоколу 1-Wire навіть при наявності електромагнітних перешкод.

Датчик МН-Z14, маючи значні габарити, займає приблизно третину площі друкованої плати. Для забезпечення надійної роботи UART-інтерфейсу та узгодження логічних рівнів між 5V логікою датчика та 3.3V логікою ESP8266 на лінії передачі TXD встановлено резистивний дільник напруги, що складається з резисторів номіналом 10 кΩ та 20 кΩ. Це рішення дозволяє безпечно знизити рівень сигналу з 5V до 3.3V без використання додаткових мікросхем узгодження рівнів.

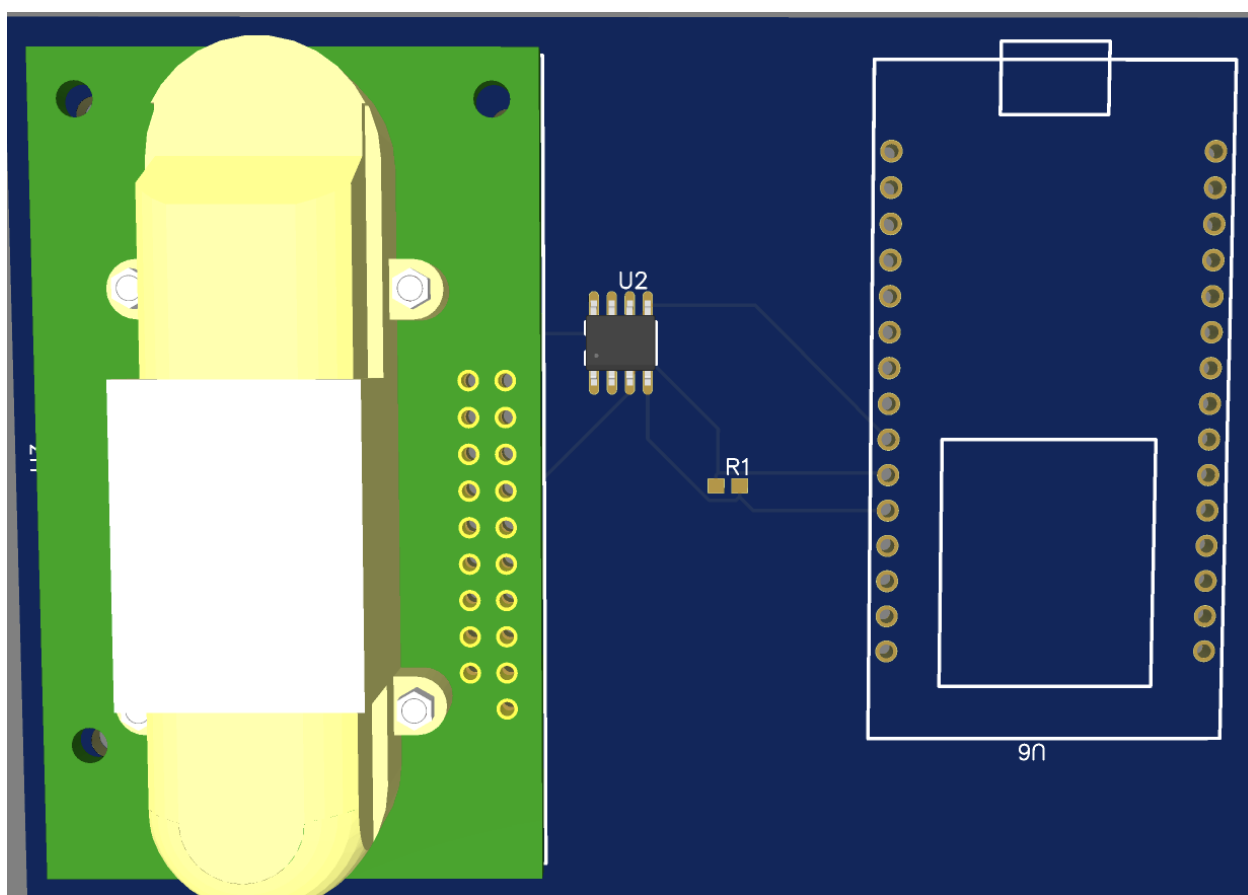


Рисунок 3.3 – Зібрана схема модуля «Піч/плавка»

Модуль «Зона складування» призначений для безперервного моніторингу мікроклімату в приміщеннях зберігання сировини та готової продукції ливарного цеху. Основними контрольованими параметрами є відносна вологість повітря, температура навколишнього середовища та атмосферний тиск. Для вимірювання



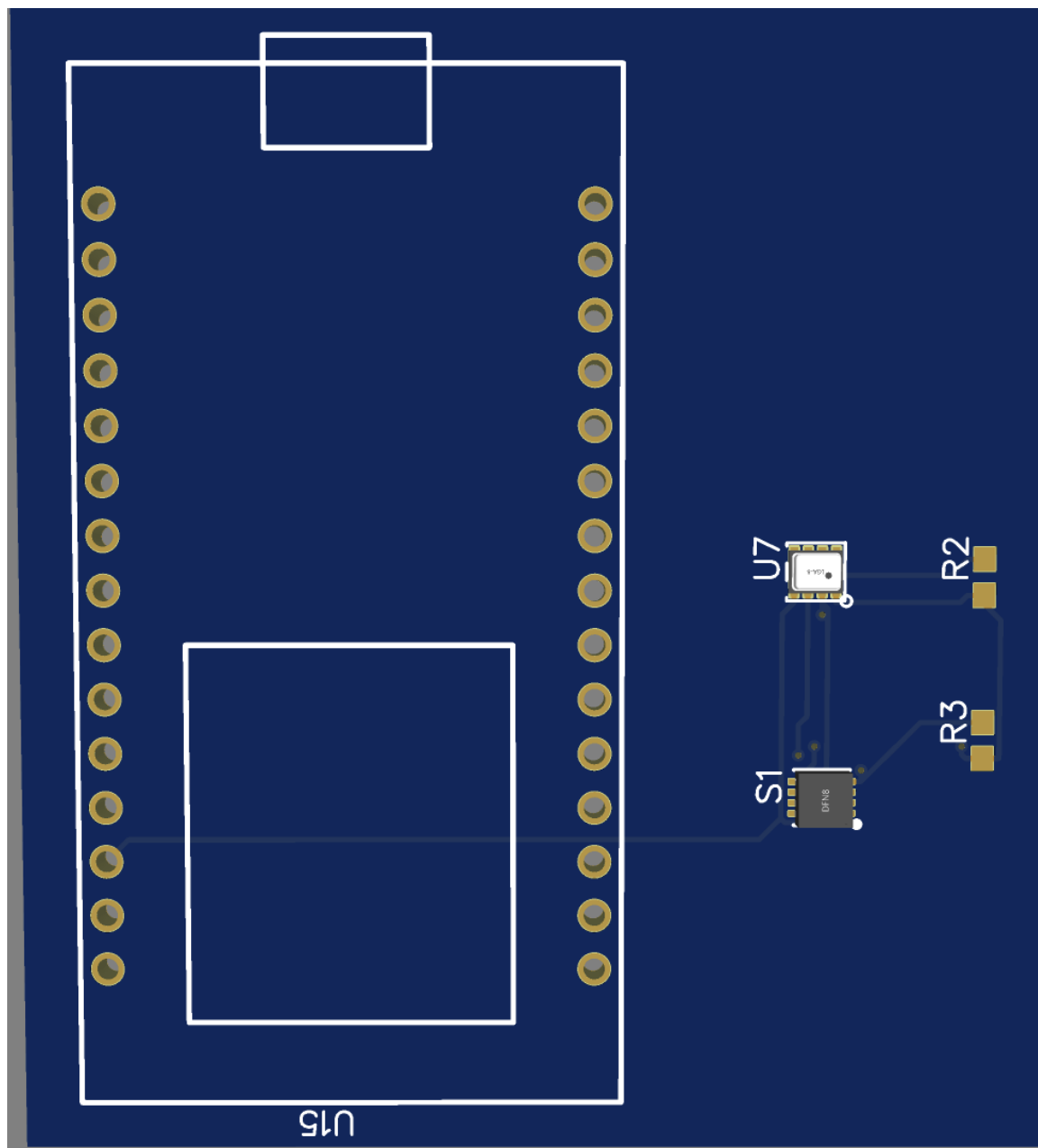


Рисунок 3.4 – Зібрана схема модуля «Зона складування»

Модуль «Робочий майданчик» представляє собою спеціалізований пристрій для детекції та аналізу вібрацій технологічного обладнання ливарного цеху. Основним датчиком модуля є мікроелектромеханічна система MPU-6050, яка об'єднує в одному корпусі тривісний акселерометр та тривісний гіроскоп, забезпечуючи комплексний аналіз механічних коливань в шести ступенях свободи. Цей датчик дозволяє не тільки виявляти факт наявності вібрацій, але й проводити їх

детальний аналіз за частотними характеристиками для ідентифікації конкретних типів механічних неполадок.

MPU-6050 підключений до мікроконтролера ESP8266 через I<sup>2</sup>C-інтерфейс, використовуючи пini D2 (SDA) та D1 (SCL). Датчик має можливість генерації переривання при перевищенні заданих порогових значень прискорення або кутової швидкості, для чого передбачено підключення лінії INT до цифрового пина D3 мікроконтролера.

Це дозволяє реалізувати швидке реагування системи на критичні рівні вібрацій без необхідності постійного опитування датчика, що значно знижує енергоспоживання та підвищує оперативність системи оповіщення.

Фізичне розміщення датчика MPU-6050 на друкованій платі є критично важливим для забезпечення точності вимірювань. Датчик встановлено точно в геометричному центрі плати для забезпечення збалансованої чутливості до вібрацій у всіх просторових напрямках.

Плата має посилену механічну конструкцію з додатковими кріпильними отворами та металізованими переходами для забезпечення високої механічної міцності при значних вібраційних навантаженнях, що можуть виникати при роботі важкого ливарного обладнання.

Особливу увагу приділено системі живлення модуля, оскільки стабільність напруги живлення безпосередньо впливає на точність вимірювань мікроелектромеханічних датчиків.

Встановлено додаткові фільтрувальні конденсатори великої ємності для згладжування пульсацій напруги живлення та високочастотні керамічні конденсатори для ефективно фільтрації високочастотних завад. Лінії живлення мають мінімальний опір та індуктивність для забезпечення швидкого відгуку на динамічні зміни споживання струму датчиком.

Виготовлення периферійних вузлів системи потребувало розробки та впровадження спеціальних технологічних процедур, які забезпечують високу якість

та надійність готових пристроїв. Процес монтажу розпочинається з ретельної підготовки всіх компонентів та матеріалів.

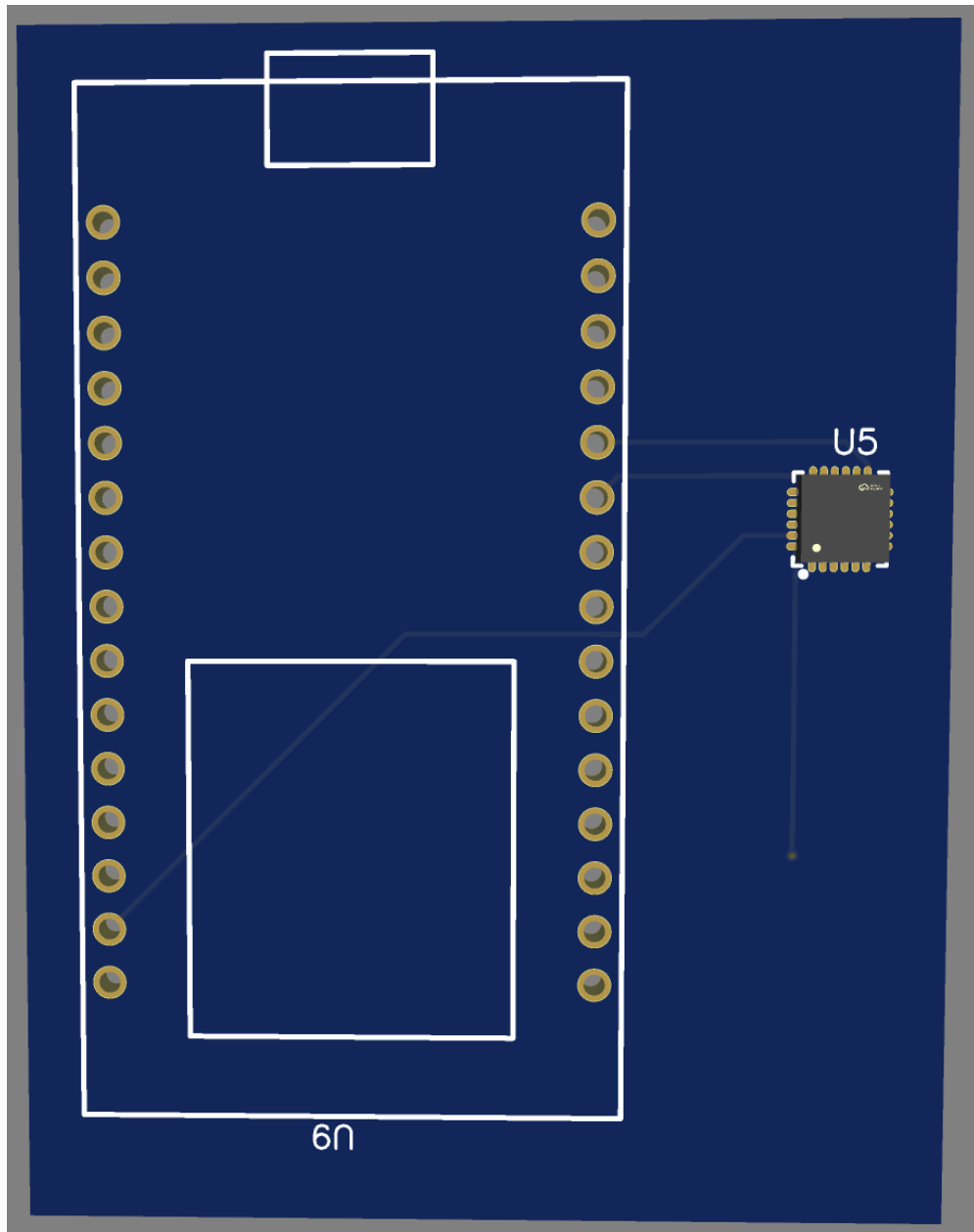


Рисунок 3.5 – Зібрана схема модуля «Робочий майданчик»

Кожен електронний компонент проходить вхідний контроль, який включає візуальну перевірку на відсутність механічних пошкоджень корпусу, окислення контактних поверхонь та відповідність маркування технічним вимогам. Друковані

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ

Арк.

45

плати очищуються від виробничих забруднень та залишків захисних покриттів за допомогою ізопропілового спирту та безворсових серветок.

Монтаж компонентів поверхневого монтажу (SMD) здійснюється з використанням паяльної пасти на основі безсвинцевого припою SAC305 (96.5% Sn, 3.0% Ag, 0.5% Cu) з температурою плавлення 217°C. Паяльна паста наноситься через спеціально виготовлений трафарет з нержавіючої сталі товщиною 0.12 мм, що забезпечує точне дозування та рівномірний розподіл пасти по контактних площадках. Установка SMD-компонентів здійснюється за допомогою вакуумного маніпулятора з контролем зусилля для запобігання механічних пошкоджень чутливих компонентів.

Пайка SMD-компонентів виконується в конвекційній печі з точно контрольованим температурним профілем. Температурний профіль включає чотири основні зони: попереднє нагрівання до 150°C зі швидкістю 1-3°C/с, витримка при температурі 150-180°C протягом 60-120 секунд для активації флюсу, швидке нагрівання до пікової температури 235-245°C зі швидкістю 1-3°C/с, та контрольоване охолодження зі швидкістю не більше 6°C/с. Такий профіль забезпечує якісне змочування контактів та мінімізує термічні напруження в компонентах.

Монтаж компонентів штирьового монтажу, включаючи роз'єми та NodeMCU, здійснюється ручним способом з використанням паяльника з контрольованою температурою 320-350°C та каніфольного флюсу. Кожне паяне з'єднання формується з дотриманням оптимального часу контакту (2-4 секунди) для забезпечення повного прогрівання з'єднання без перегрівання компонентів. Особливу увагу приділено пайці датчиків, які можуть бути чутливими до теплового впливу.

Контроль якості паяних з'єднань здійснюється за допомогою стереомікроскопа з 10-40 кратним збільшенням. Кожне з'єднання перевіряється на відсутність типових дефектів: "холодної" пайки, недостатнього змочування, коротких замикань між сусідніми контактами, пор та раковин у припої.

					<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Використання безкислотного флюсу на основі каніфолі мінімізує ризик корозійних процесів та забезпечує довготривалу надійність з'єднань. Після завершення пайки всі плати проходять очищення від залишків флюсу спеціальними розчинниками та сушку в термошафі при температурі 60°C протягом 2 годин.

Експлуатація периферійних вузлів в умовах ливарного цеху висуває підвищені вимоги до їх захисту від впливу навколишнього середовища. Ступінь захисту IP54 означає повний захист від проникнення пилу в кількостях, що можуть вплинути на роботу обладнання, та захист від бризок води з будь-якого напрямку. Для досягнення цього рівня захисту було розроблено комплексну систему конструктивних та технологічних рішень.

Основою системи захисту є спеціально підібрані пластикові корпуси з ABS-пластику з підвищеною стійкістю до температурних коливань та ультрафіолетового випромінювання. Корпуси мають двокомпонентну конструкцію з основою та кришкою, які з'єднуються через систему захисних замків з ущільнювальною прокладкою з силіконового каучуку по всьому периметру. Прокладка має спеціальний профіль, що забезпечує надійне ущільнення при номінальному зусиллі стискання та компенсує можливі виробничі допуски корпусних деталей.

Всі зовнішні роз'єми та кабельні з'єднання обладнано спеціальними ущільнювальними елементами. Роз'єми живлення мають гумові заглушки з ланцюжком для запобігання їх втраті, а під час експлуатації заглушки забезпечують герметичне закриття роз'єму. Кабельні введення виконані у вигляді сальників стандарту PG7 з багатокомпонентними гумовими манжетами, які забезпечують герметичне проходження кабелів різного діаметру від 3 до 6.5 мм без порушення цілісності захисного корпусу.

Особливою проблемою при забезпеченні герметичності є необхідність компенсації змін внутрішнього тиску при температурних коливаннях. При нагріванні повітря всередині корпусу розширюється, створюючи надлишковий тиск, який може призвести до порушення герметичності ущільнень. Для вирішення цієї проблеми в конструкції корпусів передбачено спеціальні мембранні клапани, які

					<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47



передачі даних та стійкості до впливу агресивного промислового середовища, що є критично важливим для ефективного функціонування системи оповіщення про критичні значення технологічних параметрів. Застосовані технічні рішення та технологічні процеси гарантують довготривалу експлуатацію обладнання з мінімальними витратами на технічне обслуговування та високою ймовірністю безвідмовної роботи протягом гарантійного терміну експлуатації.

### 3.2 Реалізація центрального вузла

Центральний вузол системи оповіщення про критичні значення параметрів у ливарному цеху виконує роль агрегатора всіх даних, що надходять від розподілених сенсорних модулів. Основним завданням цього вузла є збирання, обробка та аналіз інформації з усіх підключених датчиків, а також формування відповідних сигналів оповіщення при виявленні критичних значень параметрів технологічного процесу.

Архітектурно центральний вузол побудований на базі мікроконтролера ESP8266, який забезпечує не тільки обчислювальні можливості для обробки даних, але й підтримку безпроводного зв'язку через протокол Wi-Fi. Це дозволяє створити гнучку систему моніторингу, яка може працювати як у локальній мережі підприємства, так і забезпечувати віддалений доступ до даних через мережу Інтернет.

Проектування друкованої плати центрального вузла базується на використанні модуля NodeMCU v3, який інтегрує мікроконтролер ESP8266 разом з необхідною обов'язковою для стабільної роботи. Вибір цього модуля обумовлений його компактністю, наявністю вбудованого USB-UART конвертера для програмування та відлагодження, а також широким набором доступних GPIO-портів для підключення периферійних пристроїв.

Схема живлення центрального вузла розроблена з урахуванням необхідності забезпечення стабільних напруг як для основного мікроконтролера, так і для периферійних пристроїв. Основне живлення надходить через USB-роз'єм типу

					<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

micro-USB, який забезпечує напругу 5 В постійного струму. Внутрішній стабілізатор модуля NodeMCU перетворює цю напругу до необхідних 3.3 В для живлення ESP8266 та інших компонентів, що працюють на цій напрузі.

Для забезпечення індикації стану системи на платі встановлено систему світлодіодної сигналізації, яка включає декілька LED різних кольорів.

Зелений світлодіод індидує нормальну роботу системи та активне з'єднання з мережею Wi-Fi. Жовтий світлодіод сигналізує про попереджувальні стани, коли значення параметрів наближаються до критичних меж.

Червоний світлодіод активується при виявленні критичних значень будь-якого з контрольованих параметрів.

Кожен світлодіод підключений до відповідного GPIO-порту ESP8266 через струмообмежувальний резистор номіналом 220 Ом, що забезпечує оптимальну яскравість світіння при безпечному для мікроконтролера струмі.

Катоди світлодіодів з'єднані з загальним проводом, а аноди підключені до цифрових виходів через резистори, що дозволяє керувати кожним світлодіодом незалежно.

Звукова сигналізація реалізована за допомогою п'єзоелектричного бузера, який здатен генерувати звукові сигнали різної тональності та тривалості. Бuzzer підключений до одного з PWM-виходів ESP8266, що дозволяє програмно керувати не тільки включенням та вимкненням звуку, але й його частотними характеристиками. Це дає можливість створювати різні мелодії та сигнали для різних типів оповіщень.

Для забезпечення можливості обслуговування та діагностики системи на платі передбачено декілька сервісних роз'ємів. Основний сервісний роз'єм являє собою стандартний штирьковий конектор, який виводить найважливіші сигнали для підключення зовнішніх діагностичних пристроїв або розширювальних модулів. Цей роз'єм включає виводи живлення 3.3 В та 5 В, загальний провід, а також декілька вільних GPIO-портів для майбутніх розширень функціональності.

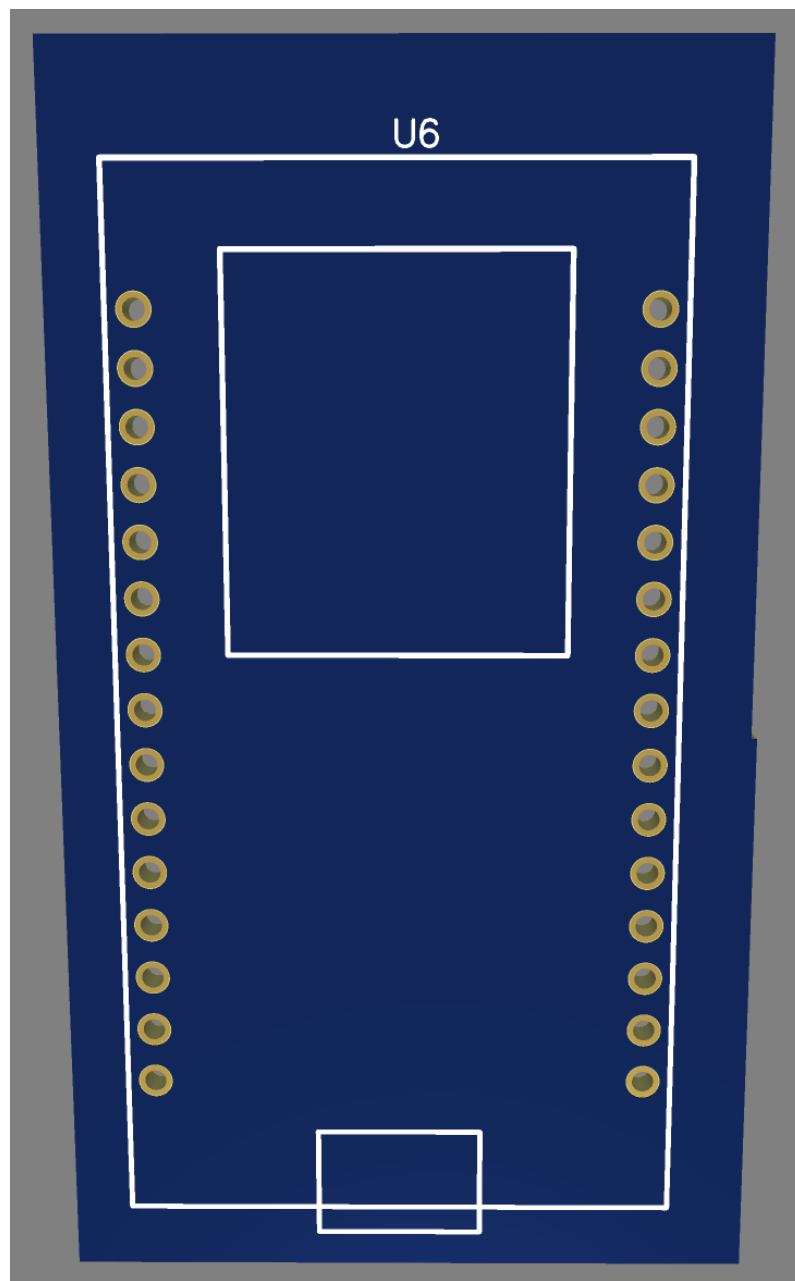


Рисунок 3.6 – Зібрана схема «Центрального» модуля

Додатково на платі встановлено роз'єм для програмування по інтерфейсу UART, який дублює з'єднання з внутрішнім USB-UART конвертером модуля NodeMCU. Це забезпечує альтернативний спосіб програмування та відлагодження системи у випадку несправності основного USB-з'єднання.

Розведення друкованої плати виконано з урахуванням вимог електромагнітної сумісності та мінімізації взаємних перешкод між цифровими та аналоговими сигналами.

Земляна полігональна заливка забезпечує низький опір загального проводу та екранування від зовнішніх електромагнітних наведень. Силові та сигнальні доріжки розведені з урахуванням їх струмового навантаження та швидкості перемикачання сигналів.

Протокол MQTT було обрано як основний механізм комунікації між центральним вузлом та розподіленими сенсорними модулями завдяки його легкості, надійності та оптимізації для пристроїв Інтернету речей.

Центральний вузол функціонує як MQTT-брокер, що дозволяє йому керувати всім трафіком повідомлень у системі та забезпечувати централізоване управління даними.

Конфігурація MQTT-брокера включає створення декількох топіків для різних типів даних та команд. Базова структура топіків організована ієрархічно відповідно до фізичного розміщення датчиків у цеху.

Головний топік системи має назву "foundry\_monitoring", під яким створюються підтопіки для кожної функціональної зони цеху, схема структури MQTT-топіків зображена на рисунку 3.7.

Топік "foundry\_monitoring/furnace" призначений для обміну даними з модуля контролю печі та плавки. Під цим топіком публікуються показання температурного датчика DS18B20 у підтопіку "temperature" та дані про концентрацію вуглекислого газу від датчика MH-Z14 у підтопіку "co2\_level". Кожне повідомлення містить не тільки числове значення параметра, але й мітку часу та статус валідності даних.

Зона складування представлена топіком "foundry\_monitoring/storage", який включає підтопіки для атмосферного тиску "pressure", відносної вологості "humidity" та температури навколишнього середовища "ambient\_temperature".

Ці дані надходять від датчиків BMP-280 та SHT31 відповідно, причому система автоматично перевіряє узгодженість показань температури від різних датчиків.

					<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

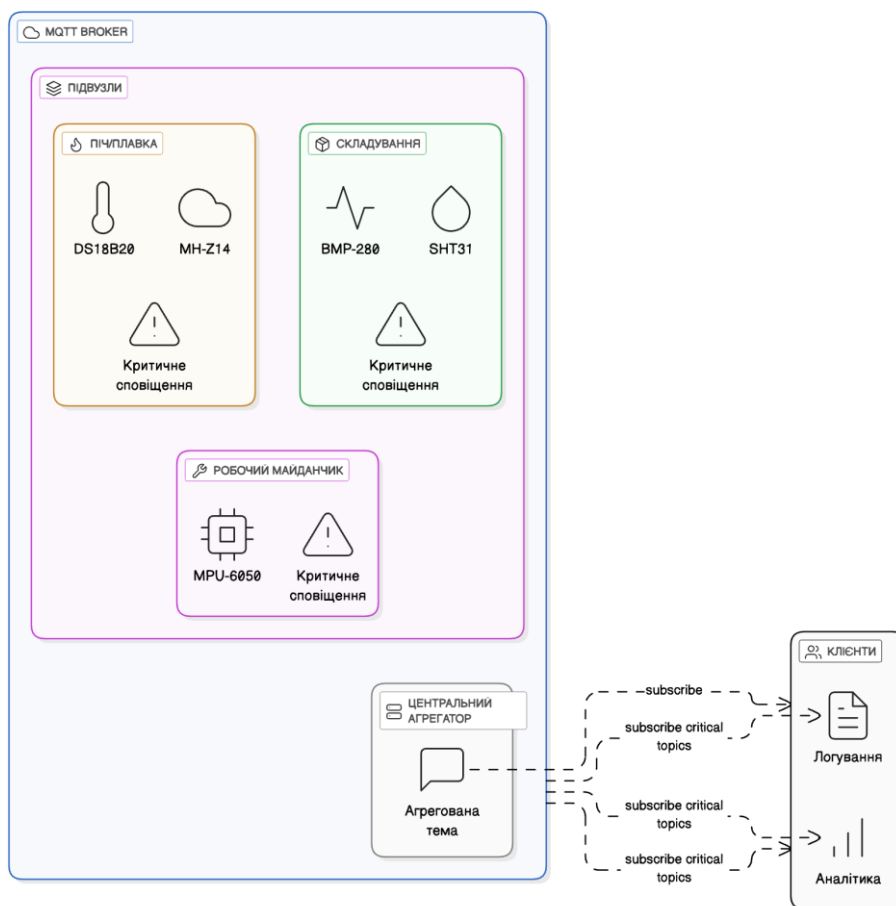


Рисунок 3.7 – Схема структури MQTT-топиків.

Робочий майданчик контролюється через топик "foundry\_monitoring/workplace", де публікуються дані про вібрації та прискорення від акселерометра MPU-6050. Оскільки цей датчик генерує тривимірні дані, створено окремі підтопики "vibration\_x", "vibration\_y" та "vibration\_z" для кожної осі координат.

Налаштування параметрів MQTT-з'єднання включає встановлення оптимальних значень для забезпечення надійної передачі даних в умовах промислового середовища. Час очікування підтвердження встановлено на рівні 30 секунд, що забезпечує достатній час для обробки повідомлень навіть при тимчасових перешкодах у мережі. Якість обслуговування QoS встановлена на рівні 1 для критично важливих даних, що гарантує доставку повідомлень принаймні один раз.

Для забезпечення безпеки системи реалізовано механізм автентифікації клієнтів через систему логінів та паролів. Кожен сенсорний модуль має унікальні облікові дані, що запобігає несанкціонованому доступу до системи моніторингу. Додатково налаштовано фільтрацію клієнтів за MAC-адресами, що створює додатковий рівень захисту.

Система оновлення програмного забезпечення через мережу є критично важливою для забезпечення можливості віддаленого обслуговування системи моніторингу без необхідності фізичного доступу до кожного пристрою. Конфігурація OTA включає створення веб-інтерфейсу для завантаження нових версій прошивки та систему перевірки цілісності оновлень.

Веб-сервер для OTA-оновлень працює на стандартному порту 80 та забезпечує простий та інтуїтивний інтерфейс для завантаження файлів прошивки. Інтерфейс включає форму для вибору файлу прошивки у форматі bin, прогрес-бар для відображення процесу завантаження та систему повідомлень про статус операції. Після успішного завантаження система автоматично перевіряє цілісність файлу через контрольну суму MD5 та виконує перезавантаження з новою прошивкою.

Безпека OTA-оновлень забезпечується через систему автентифікації, яка вимагає введення логіна та пароля перед доступом до інтерфейсу оновлення. Додатково реалізовано перевірку розміру завантажуваного файлу для запобігання атакам через завантаження надмірно великих файлів, які можуть переповнити пам'ять пристрою.

Серійна консоль налаштована для роботи на швидкості 115200 біт за секунду, що забезпечує оптимальний баланс між швидкістю передачі даних та надійністю з'єднання. Консоль надає детальну інформацію про роботу всіх компонентів системи, включаючи статус підключення до Wi-Fi мережі, результати з'єднання з MQTT-брокером, процес отримання та обробки даних від сенсорів.

```
COM4
----- AllThingsTalk WiFi SDK Serial Begin -----
Debug Level: Normal
Connection LED: Enabled - GPIO 2
WiFi Signal Reporting: Enabled
Connecting to WiFi: example.....
Connected to WiFi!
Updated existing integer sensor asset 'analog-example' (Analog Value) on AllThingsTalk
Updated existing string sensor asset 'wifi-signal' (WiFi Signal Strength) on AllThingsTalk
Connecting to AllThingsTalk.
Connected to AllThingsTalk!
> Message Published to AllThingsTalk (JSON)
Current Analog Value: 0
```

Рисунок 3.8 – Приклад з'єднання модуля з Wi-Fi мережею

Формат повідомлень серійної консолі стандартизований та включає мітку часу, рівень важливості повідомлення та детальний опис події. Рівні важливості включають DEBUG для детальної діагностичної інформації, INFO для загальних повідомлень про роботу системи, WARNING для попереджень про потенційні проблеми та ERROR для критичних помилок, які вимагають втручання оператора.

Система логування забезпечує збереження історії подій у внутрішній пам'яті пристрою з можливістю вивантаження логів через серійну консоль або веб-інтерфейс. Буфер логів має циклічний характер та зберігає останні 1000 записів, що забезпечує достатню глибину історії для діагностики проблем без переповнення пам'яті.

Процес налагодження центрального вузла системи моніторингу включає декілька етапів, кожен з яких спрямований на перевірку певних аспектів функціональності системи. Початковий етап включає перевірку правильності живлення та базової функціональності мікроконтролера через завантаження тестової прошивки, яка виконує мигання світлодіодами та виведення діагностичних повідомлень через серійну консоль.

Другий етап налагодження присвячений перевірці роботи системи Wi-Fi підключення. На цьому етапі система намагається підключитися до налаштованої мережі Wi-Fi та отримати IP-адресу через DHCP. Успішність цього процесу

контролюється через серійну консоль, де виводяться повідомлення про спроби підключення, отриману IP-адресу та якість сигналу мережі.

Система автоматичного моніторингу включає перевірку доступності всіх сенсорних модулів через регулярне надсилання ring-запитів та контроль часу отримання останніх даних від кожного датчика. У випадку втрати зв'язку з будь-яким модулем система генерує відповідне попередження та намагається відновити з'єднання через альтернативні канали зв'язку.

Фізична реалізація центрального вузла системи моніторингу представлена у вигляді компактного блоку, розміщеного в захисному корпусі промислового типу. Корпус забезпечує необхідний рівень захисту від пилу та вологи відповідно до стандарту IP54, що є достатнім для роботи в умовах ливарного цеху з урахуванням розміщення пристрою в технічному приміщенні, зображено на рисунку 3.9.



Рисунок 3.9 – Фото змонтованого центрального модуля

Передня панель корпусу містить світлодіодні індикатори стану системи, які розміщені у логічному порядку зліва направо відповідно до важливості інформації.

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------



Загальна надійність конструкції підтверджена проведенням тестових випробувань в умовах, що імітують реальне виробниче середовище ливарного цеху.

Система продемонструвала стабільну роботу при температурах від 0 до 60 градусів Цельсія та відносній вологості до 85%, що цілком задовольняє вимогам експлуатації в цільовому середовищі.

### 3.3 Програмна реалізація та інтеграція ПЗ

Програмна частина системи оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху реалізована з використанням середовища розробки Arduino IDE та мови програмування C++. Архітектура програмного забезпечення побудована за принципом модульності, що дозволяє ефективно управляти розподіленою сенсорною мережею на базі мікроконтролерів ESP8266.

Основою програмної реалізації є концепція розподіленої обробки даних, де кожен вузол мережі виконує специфічні функції моніторингу параметрів навколишнього середовища відповідно до свого призначення в технологічному процесі ливарного виробництва. Така архітектура забезпечує високу надійність системи та можливість масштабування при необхідності додавання нових точок контролю.

Структура програмного проекту організована таким чином, що кожен вузол мережі містить власний набір програмних модулів, адаптованих до специфіки підключених сенсорів та їх ролі в системі моніторингу. Центральний агрегатор відповідає за збирання та консолідацію даних від усіх периферійних вузлів, а також за прийняття рішень щодо активації системи оповіщення при виявленні критичних значень параметрів.

Програмне забезпечення вузла "Піч/плавка" орієнтоване на моніторинг температурних параметрів технологічного процесу та контроль концентрації вуглекислого газу в робочій зоні. Основний програмний модуль цього вузла інтегрує драйвери для роботи з температурним датчиком DS18B20 та сенсором CO2 MH-Z14.

Реалізація підтримки DS18B20 базується на використанні бібліотеки OneWire для організації комунікації по однопровідному протоколу. Програмний код забезпечує автоматичне виявлення датчика на шині, ініціалізацію його роботи та циклічне зчитування температурних значень з заданою періодичністю.

Для роботи з сенсором MH-Z14 реалізовано модуль UART-комунікації, який використовує апаратний послідовний порт мікроконтролера ESP8266. Програмна реалізація включає функції формування команд запиту концентрації CO<sub>2</sub>, обробки отриманих відповідей та валідації даних відповідно до протоколу обміну даними сенсора. Особливістю реалізації є застосування програмних затримок для забезпечення стабільної роботи сенсора та фільтрації помилкових показань, код такої реалізації зображено на рисунку 3.10.

```

cppvoid readCO2Sensor() {
    byte cmd[9] = {0xFF, 0x01, 0x86, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x79};
    sensor.write(cmd, 9);

    if (sensor.available() >= 9) {
        byte response[9];
        sensor.readBytes(response, 9);

        if (response[0] == 0xFF && response[1] == 0x86) {
            int co2Value = (response[2] << 8) + response[3];
            processCO2Reading(co2Value);
        }
    }
}

```

Рисунок 3.10 – Приклад опрацювання MH-Z14 в коді

Програмне забезпечення вузла "Зона складування" призначене для контролю параметрів мікроклімату в зоні зберігання матеріалів та заготовок. Цей модуль інтегрує драйвери для роботи з барометричним сенсором BMP-280 та датчиком температури і вологості SHT31, які підключені до спільної шини I2C. Реалізація I2C-комунікації базується на використанні стандартної бібліотеки Wire, що забезпечує надійну передачу даних між мікроконтролером та сенсорами.

Програмний модуль для BMP-280 реалізує функції ініціалізації сенсора з налаштуванням необхідних параметрів вимірювання, циклічного зчитування значень атмосферного тиску та температури, а також їх калібрування згідно з внутрішніми коефіцієнтами сенсора. Особлива увага приділена обробці помилок комунікації та забезпеченню стабільності роботи при змінах умов навколишнього середовища.

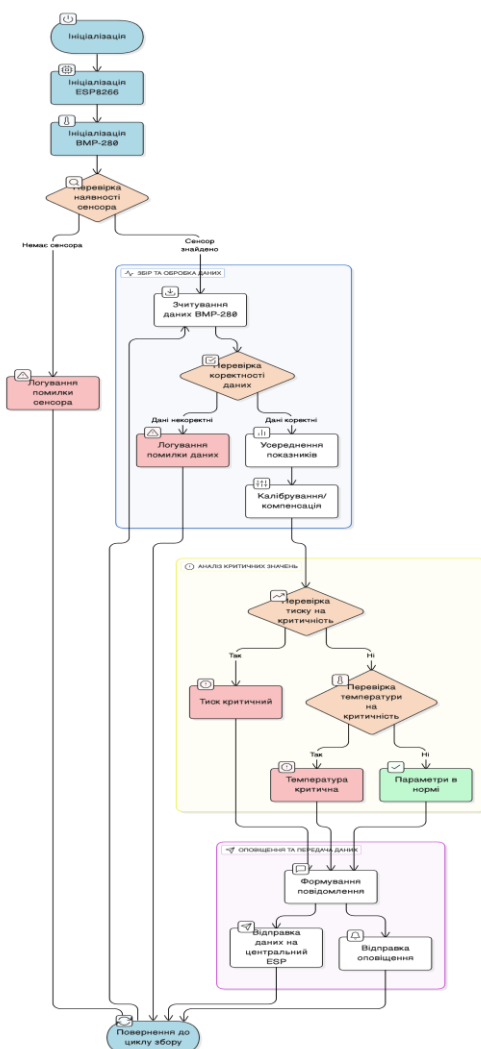


Рисунок 3.11 – Схема роботи алгоритму обробки даних для BMP-280.

Інтеграція сенсора SHT31 реалізована з використанням спеціалізованої бібліотеки, що забезпечує високоточні вимірювання температури та відносної вологості повітря. Програмний код включає функції автоматичного виявлення

сенсора на шині I2C, ініціалізації його роботи з оптимальними параметрами точності та швидкості вимірювання, а також обробки отриманих даних з застосуванням внутрішніх алгоритмів компенсації похибок.

Вузол "Робочий майданчик" реалізує функції моніторингу вібраційних параметрів технологічного обладнання за допомогою акселерометра-гіроскопа MPU-6050. Програмне забезпечення цього вузла включає комплексний набір функцій для роботи з шестивісним сенсором руху, включаючи ініціалізацію, калібрування, зчитування сирих даних та їх обробку для виявлення аномальних вібрацій.

Реалізація обробки даних MPU-6050 включає алгоритми фільтрації шумів, обчислення результуючих векторів прискорення та кутової швидкості, а також виявлення характерних паттернів вібрацій, що можуть свідчити про неполадки в роботі обладнання. Програмний модуль використовує математичні функції для обчислення спектральних характеристик вібраційних сигналів та їх порівняння з еталонними значеннями.

Центральний агрегатор системи реалізує функції збирання, консолідації та аналізу даних від усіх периферійних вузлів. Програмна архітектура агрегатора побудована на принципах асинхронної обробки даних, що забезпечує ефективне управління множинними потоками інформації від різних сенсорних вузлів. Основними компонентами програмного забезпечення агрегатора є модулі MQTT-комунікації, обробки та аналізу даних, системи оповіщення та веб-інтерфейсу.

MQTT-клієнт агрегатора реалізований з використанням бібліотеки PubSubClient, що забезпечує надійну комунікацію з віддаленими вузлами мережі. Програмний модуль включає функції автоматичного підключення до MQTT-брокера, підписки на топіки даних від сенсорних вузлів, обробки вхідних повідомлень та публікації команд управління. Реалізовано механізми автоматичного відновлення з'єднання при втраті мережевого зв'язку та буферизації повідомлень для забезпечення цілісності даних.

					КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Модуль аналізу даних агрегатора реалізує алгоритми виявлення критичних значень параметрів та прийняття рішень щодо активації системи оповіщення. Програмний код включає функції порівняння поточних значень сенсорів з попередньо встановленими пороговими значеннями, обчислення трендів зміни параметрів та прогнозування потенційно небезпечних ситуацій. Застосовано методи статистичної обробки даних для фільтрації випадкових викидів та підвищення достовірності результатів аналізу.

Система оповіщення реалізована у вигляді багаторівневої структури, що включає локальні звукові та світлові сигнали, відправку повідомлень через мережеві канали зв'язку та активацію аварійних протоколів. Програмний модуль оповіщення забезпечує диференційований підхід до різних типів критичних ситуацій, автоматично обираючи відповідні канали та способи сповіщення персоналу залежно від рівня небезпеки та характеру виявленої проблеми.

Веб-інтерфейс системи реалізований з використанням вбудованого веб-сервера ESP8266, що забезпечує можливість віддаленого моніторингу та управління системою через стандартний браузер. Програмний модуль веб-сервера включає функції обробки HTTP-запитів, генерації динамічних веб-сторінок з актуальними даними сенсорів, реалізації REST API для інтеграції з зовнішніми системами та забезпечення базової автентифікації користувачів.

Інтеграція усіх компонентів системи забезпечується через єдину архітектуру обміну повідомленнями на базі протоколу MQTT. Кожен вузол мережі публікує свої дані в специфічні топіки, структуровані відповідно до ієрархії системи та типу вимірюваних параметрів. Формат повідомлень стандартизований у вигляді JSON-структур, що забезпечує сумісність з різними системами збирання та обробки даних.

Реалізація OTA-оновлень забезпечує можливість віддаленого оновлення програмного забезпечення всіх вузлів мережі без необхідності фізичного доступу до обладнання. Програмний модуль OTA включає функції завантаження нових версій прошивки через мережу Wi-Fi, верифікації цілісності завантажених файлів,



систему прав доступу, що дозволяє диференційовано управляти можливостями різних категорій користувачів системи залежно від їх ролі в технологічному процесі та рівня відповідальності.

Документування та супровід програмного забезпечення забезпечується через детальні коментарі в кодї, автоматичну генерацію технічної документації, створення інструкцій з експлуатації та налаштування системи. Реалізована система версіонування програмного забезпечення з детальним відстеженням змін та можливістю швидкого відкату до попередніх стабільних версій при необхідності.

### 3.4 Проведення тестування та налагодження

Етап тестування та налагодження розподіленої сенсорної мережі на базі ESP8266 для системи оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху передбачає комплексну перевірку функціональності всіх компонентів системи. Методологія тестування включає поетапну перевірку від окремих модулів до повної інтеграції системи з реальним обладнанням в умовах промислового середовища.

Загальна стратегія тестування базується на принципі «знизу вгору», коли спочатку проводиться перевірка базових функцій окремих датчиків та модулів зв'язку, потім тестується взаємодія між компонентами, і нарешті виконується комплексне випробування всієї системи під навантаженням та в екстремальних умовах. Такий підхід дозволяє локалізувати проблеми на ранніх стадіях та забезпечити надійність системи в реальних умовах експлуатації.

Перший етап тестування присвячений перевірці функціональності окремих сенсорних модулів. Модуль «Піч/плавка» тестується шляхом перевірки коректності зчитування температури від датчика DS18B20 та концентрації вуглекислого газу від МН-Z14. Для температурного датчика проводиться калібрування з використанням еталонного термометра в діапазоні від 20°C до 100°C. Точність вимірювань перевіряється у контрольних точках кожні 10°C з допустимою похибкою не більше  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .

										<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							64





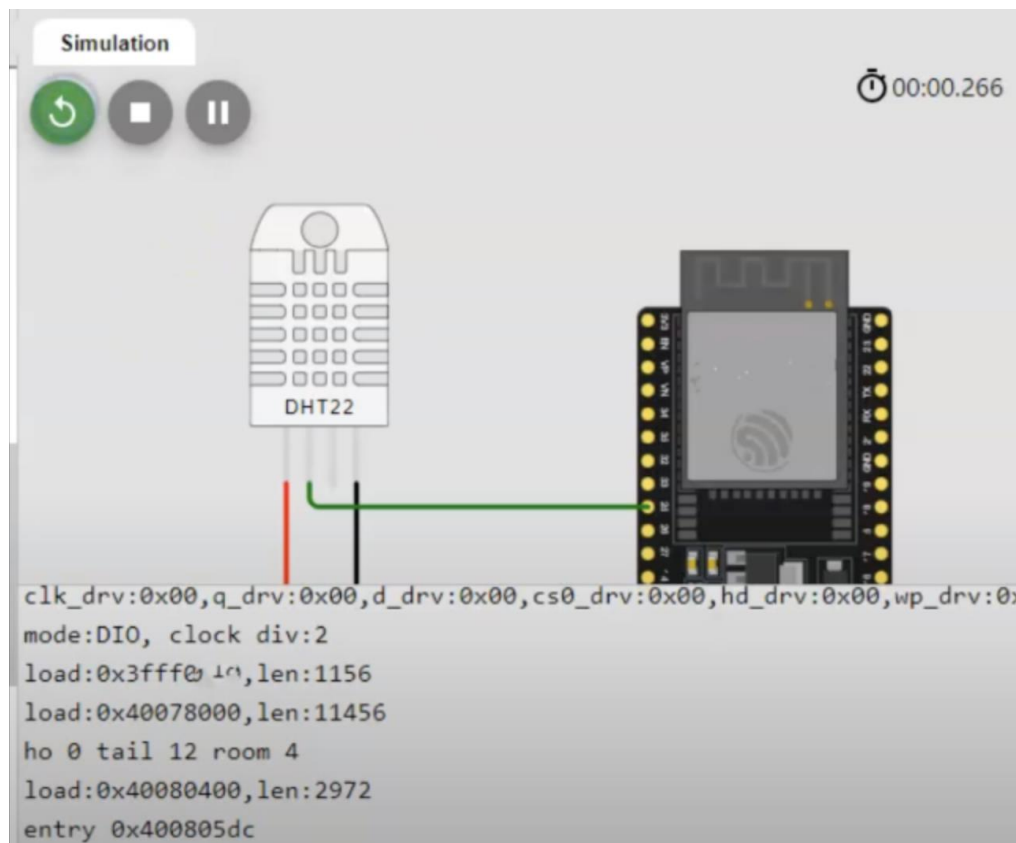


Рисунок 3.13 – Симуляція роботи датчика температури та ESP8266 в Wokwi

Важливою перевагою Wokwi є можливість тестування граничних випадків, які важко відтворити на реальному обладнанні. Наприклад, можна змоделювати ситуацію, коли датчик повертає некоректні дані, або симулювати переривання живлення з подальшим відновленням роботи системи.

Під час симуляційного тестування проводиться оптимізація параметрів системи, таких як інтервали опитування датчиків, розміри буферів для зберігання даних та пороги спрацьювання сигналізації. Результати симуляції використовуються для налаштування реальної системи та прогнозування її поведінки в різних сценаріях експлуатації.

Наступний етап передбачає тестування взаємодії між сенсорними модулями та центральним агрегатором. Перевіряється надійність Wi-Fi з'єднання, стабільність передачі даних та правильність роботи протоколів зв'язку. Кожен сенсорний модуль



дані використовуються для розрахунку автономності роботи від резервних джерел живлення та планування технічного обслуговування.

Тестується також поведінка системи при досягненні граничних значень параметрів. Імітуються ситуації критично високої температури, підвищеної концентрації CO<sub>2</sub> та сильних вібрацій. Перевіряється швидкість спрацьовування системи оповіщення та правильність формування аварійних повідомлень.

Випробування на відмовостійкість включають тестування поведінки системи при виникненні різних типів збоїв. Імітуються відмови окремих датчиків шляхом їх фізичного відключення або подачі некоректних сигналів. Система повинна коректно діагностувати несправність, повідомити про неї оператора та продовжити роботу з використанням решти датчиків.

Проводиться тестування стійкості до електромагнітних завад, характерних для промислового середовища. Використовуються генератори високочастотних сигналів та імпульсних завад для моделювання впливу силового обладнання ливарного цеху. Перевіряється ефективність екранування та фільтрації сигналів в спроектованих модулях.

Особливу увагу приділено тестуванню термостійкості системи. Сенсорні модулі піддаються впливу підвищених температур, характерних для ливарного виробництва. Перевіряється стабільність роботи електронних компонентів при температурах до 60°C та короткочасних сплесках до 80°C, які можуть виникати поблизу плавильних печей.

Тестування вологостійкості проводиться в кліматичній камері з контрольованою вологістю до 90%. Імітуються умови, що можуть виникати через конденсацію водяної пари при різких змінах температури в цеху. Перевіряється герметичність корпусів модулів та стабільність роботи електроніки в умовах підвищеної вологості.

Система логування забезпечує детальний запис всіх подій, що відбуваються в роботі сенсорної мережі. Кожен модуль генерує структуровані лог-файли з мітками часу, що дозволяє проводити хронологічний аналіз роботи системи. Логи

						<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			69

включають інформацію про зчитані значення датчиків, стан мережного з'єднання, виявлені помилки та виконані діагностичні операції.

Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для автоматичного аналізу логів та виявлення аномальних патернів роботи. Система аналізу здатна детектувати тренди деградації датчиків, прогнозувати можливі відмови та рекомендувати профілактичні заходи. Використовуються алгоритми машинного навчання для класифікації типових та нетипових режимів роботи системи.

Важливою частиною діагностичної системи є віддалений моніторинг стану модулів. Розроблено веб-інтерфейс, який дозволяє в режимі реального часу відстежувати ключові параметри роботи кожного сенсорного модуля. Інтерфейс надає інформацію про рівень сигналу Wi-Fi, споживання енергії, температуру мікроконтролера та статистику помилок.

Система діагностики включає механізми самотестування, які автоматично виконуються при старті кожного модуля та періодично під час роботи. Самотестування перевіряє цілісність пам'яті, правильність налаштувань конфігурації та відгук всіх підключених датчиків. Результати самотестування записуються в лог та можуть бути використані для автоматичного виявлення проблем.

Для комплексного тестування системи створено спеціалізований лабораторний стенд, який імітує основні умови роботи ливарного цеху. Стенд включає джерела тепла для моделювання високотемпературних процесів, генератори вібрації для імітації роботи промислового обладнання та системи контролю атмосфери для регулювання концентрації газів.

Стенд обладнано еталонними вимірювальними приладами, які дозволяють проводити точне порівняння показань сенсорної системи з дійсними значеннями параметрів середовища. Використовуються прецизійні термометри з точністю  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , калібровані барометри та газоаналізатори лабораторного класу.

На стенді проводяться тривалі випробування на надійність з імітацією реальних циклів роботи ливарного виробництва. Моделюються добові цикли з

						<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			70

періодами інтенсивної роботи та відносного спокою, що дозволяє оцінити поведінку системи в різних режимах експлуатації.

Важливою частиною стендових випробувань є тестування системи оповіщення. Перевіряється швидкість реакції на критичні значення параметрів, правильність формування та доставки аварійних повідомлень. Тестуються різні канали оповіщення: локальна звукова та світлова сигналізація, відправка SMS-повідомлень та email-сповіщень.

Заключним етапом тестування є установка системи в реальних умовах ливарного цеху та проведення польових випробувань. Сенсорні модулі розміщуються у відповідних зонах виробництва згідно з проектом розподіленої мережі. Особлива увага приділяється забезпеченню захисту обладнання від агресивного промислового середовища.

Польові випробування проводяться протягом місяця безперервної роботи з щоденним моніторингом показників системи. Ведеться детальний журнал всіх подій, пов'язаних з роботою системи, включаючи спрацьовування сигналізації, виявлені несправності та проведені технічні втручання.

Важливим результатом польових випробувань є валідація розрахунків енергоспоживання та підтвердження працездатності системи живлення. Перевіряється ефективність резервного живлення та час автономної роботи при відключенні основного електропостачання. У доповненні до вищезгаданих випробувань, окрему увагу було приділено тестуванню поведінки системи при одночасному навантаженні на канали зв'язку та обчислювальні ресурси центрального вузла.

Результати всіх етапів тестування систематизуються у вигляді детального звіту, який включає рекомендації щодо експлуатації системи, графік профілактичного обслуговування та процедури діагностики несправностей. Цей звіт служить основою для подальшого впровадження аналогічних систем на інших промислових об'єктах.

									<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						71



Завдяки інтеграції OTA-механізму оновлення ПЗ система забезпечує віддалене обслуговування без необхідності фізичного доступу до пристроїв.

Моделювання роботи в середовищі Wokwi сприяло верифікації алгоритмів обробки даних, виявленню потенційних помилок і оптимізації інтервалів опитування. Далі проведено стендові випробування з імітацією температурних, вібраційних і газових навантажень, що підтвердили стійкість і швидкість реагування системи. Навантажувальні тести протягом 72 годин продемонстрували відсутність деградації продуктивності й втрат пакетів понад 0,1 % навіть за поганого Wi-Fi-зв'язку.

Отримана система демонструє високу надійність, гнучкість і масштабованість. Використання ESP8266 як єдиної апаратної платформи для всіх вузлів дозволяє легко розширювати мережу додаванням нових сенсорних модулів без зміни базової архітектури. Розроблений веб-інтерфейс і REST-API полегшують інтеграцію з існуючими системами диспетчеризації та SCADA, а автоматизоване логування й аналітика допомагають діагностувати несправності задовго до серйозних відмов.

Таким чином, запропоноване рішення забезпечує стабільний цілодобовий моніторинг ключових технологічних параметрів ливарного цеху, своєчасну діагностику відхилень і автоматичне оповіщення відповідального персоналу. Налагоджені алгоритми фільтрації й усереднення даних дозволяють мінімізувати хибні спрацьовування в умовах промислових перешкод, а детальна система тестування і калібрування підтвердила відповідність системи високим вимогам до точності й надійності.

Впровадження такої сенсорної мережі сприятиме підвищенню безпеки праці, зменшенню втрат матеріалів і оптимізації технічного обслуговування обладнання, що є важливим кроком до цифровізації промислових процесів.

						<i>КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			73

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Saheed Y. K. Abdulganiyu O. H., & Ait Tchakoucht T. A novel hybrid ensemble learning for anomaly detection in industrial sensor networks and SCADA systems for smart city infrastructures. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.03.010>

2. Saheed Y.K. Raji M. 2022. Effectiveness of deep learning long short-term memory network for stock price prediction on graphics processing unit. *Int. Conf. Decision Aid Sci. Appl. (DASA)*. 2022. 1665–1671. <https://doi.org/10.1109/DASA54658.2022.9765181>.

3. Teh H.Y. Wang K.I.K. Kempa-Liehr A.W. Expect the unexpected: unsupervised feature selection for automated sensor anomaly detection. *IEEE Sens. Journal*. 21 (16). 2021. 18033–18046. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3084970>.

4. Mansouri A. Majidi B. Shamisa A. Metaheuristic neural networks for anomaly recognition in industrial sensor networks with packet latency and jitter for smart infrastructures. *Int. J. Comput. Appl.* 43 (3). 2021. P. 257–266. <https://doi.org/10.1080/1206212X.2018.1533613>.

5. Saha R. Biswas S. Sarmah S. Karmakar S. & Das P. (2021). A working prototype using DS18B20 temperature sensor and arduino for health monitoring. *SN Computer Science* 2(1). 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00434-2>

6. Yulizar D. Soekirno S. Ananda N. Prabowo M. A. Perdana I. F. P. & Aofany D. Performance analysis Comparison of DHT11 DHT22 and DS18B20 as temperature measurement. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Science Education and Sciences 2022* (Vol. 8. p. 37). 2022. DOI: [https://doi.org/10.2991/978-94-6463-232-3\\_5](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-232-3_5)

7. Almuhaaya M. A. Jabbar W. A. Sulaiman N. & Abdulmalek S. (2022). A survey on Lorawan technology: Recent trends opportunities, simulation tools and future directions. *Electronics*. 11(1). 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11010164>

					КвРКІ 220038.22.02.41 ПЗ	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74







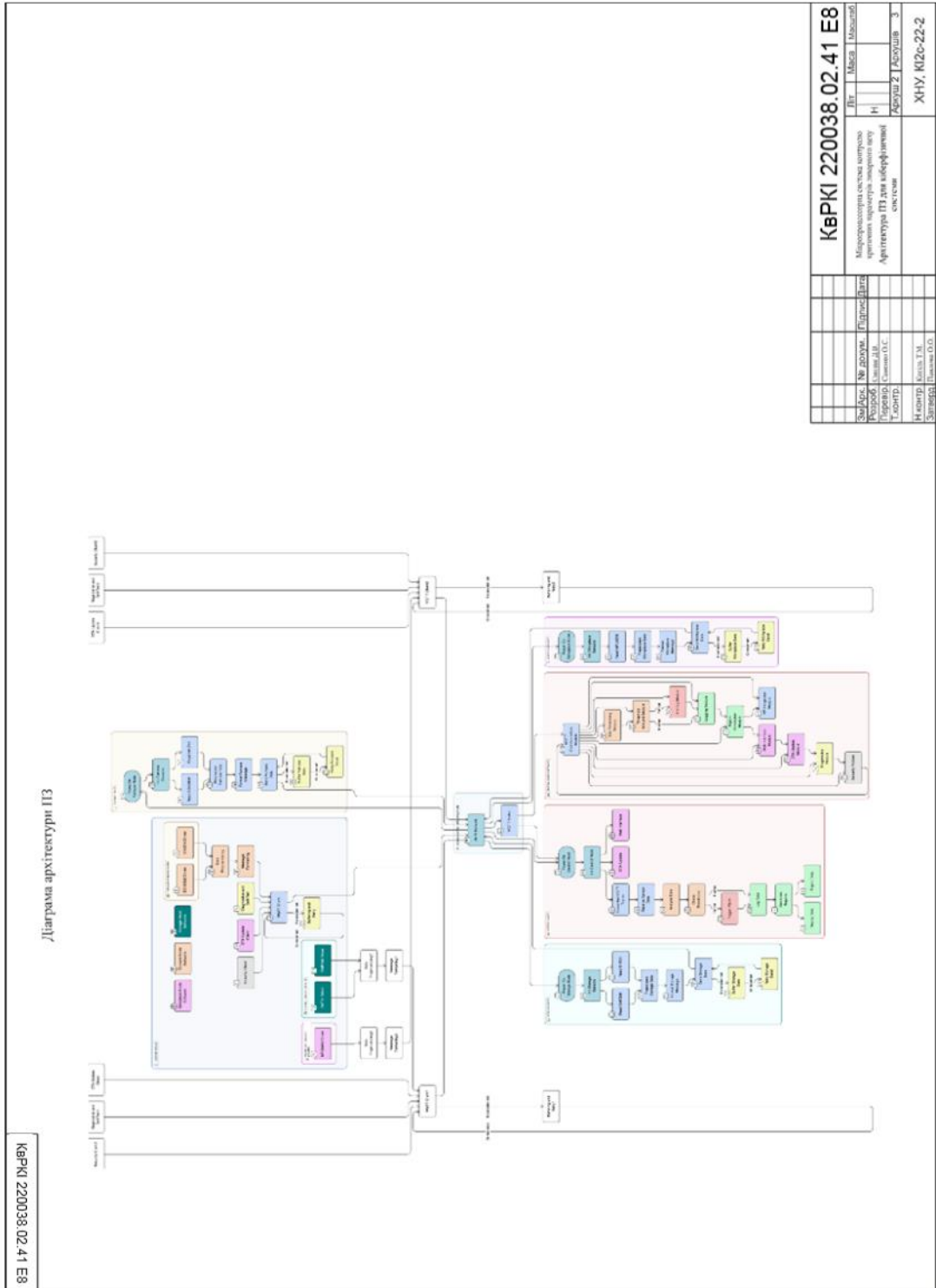






**ДОДАТОК Б**  
(обов'язковий)

**КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «АРХІТЕКТУРА ПЗ ДЛЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ»**





# Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

**The maximum coincidence with one document 0.0%**

Dictionaries check: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Errors in the documents: 11%**

ID: 243607 Title: БКР Система оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху на базі мікроконтролера ESP8266 Added in a DB: 2025-06-05 Authors: Дмитро СМОЛЯК Heads: Василь СТЕЦЮК Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	110761	801	813 (1%)	12 (1%)

## Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

## Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Дмитро СМОЛЯК

**Співавтор:**

**Назва:** Смоляк\_Система оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху на базі мікроконтролера ESP8266

**Експерт:**

**Підрозділ:** Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

**Коефіцієнт подібності 1:** 4.3%

**Коефіцієнт подібності 2:** 2.7%

**Мікропробіли:** 64

**Заміна букв:** 8

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 1

**Дата створення звіту:** 2025-06-05 17:06:43.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-06-05

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Смоляк Дмитро Вікторович

Тема: Система оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху на базі мікроконтролера ESP8266

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 71

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розробка та моделювання системи оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху на базі мікроконтролера ESP8266

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі кваліфікаційної роботи проведено дослідження предметної області (проаналізовано теорію операційних та керуючих систем розроблених на ESP8266, а також розроблення і опис схем електричних функціональної і принципової) та виконано постановку задачі дослідження. В другому розділі кваліфікаційної роботи проведено моделювання та проектування системи оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху на базі мікроконтролера ESP8266, а саме: виконано формалізований опис операційного автомату; розроблено змістовну схему алгоритму; закодовано верхівки змістовної схеми алгоритму; розроблено закодовану мікроопераційну схему алгоритму; закодовано мікрокоманди; розроблено закодовану мікрокомандну схему алгоритму; побудовано основу системи оповіщення на основі ESP8266; спроектовано граф-схему системи оповіщення на основі ESP8266; визначено необхідну кількість елементів для реалізації системи оповіщення на основі ESP8266; закодовано внутрішні стани; розроблено структурну схему операційного контроллера; побудовано схему операційного контроллера. В третьому розділі

кваліфікаційної роботи виконано апаратну реалізацію операційного контролера та його підсхем на основі ESP8266, а саме: реалізовано схему електричної функціональної системи оповіщення про критичні значення параметрів на основі ESP8266; змодельовано схему в середовищі Wokwi.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: недостатня увага моделюванню схеми автомату в середовищі Wokwi.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: —

9. Оцінка дипломної роботи: добре

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) \_\_\_\_\_

Стецюк В. І., доцент каф. ТМІТ, ХНУ

"12" червня 2025 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри КПС  
д-р. філософії, доц. Ользі ПАВЛОВІЙ

Дмитра СМОЛЯКА

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи КІ2с-22-2

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Strike-Plagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

12 червня 2025 року

**РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ**  
**КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**  
**ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ**

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Система оповіщення про критичні значення параметрів в ливарному цеху на базі мікроконтролера ESP8266

Автор: Дмитро СМОЛЯК

Спеціальність: 123- Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

Науковий керівник: Василь СТЕЦЮК, старший викладач

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розмішені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розмішені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

**Підтвердження:**

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) виявлені запозичення містяться в розділах огляду літератури та аналізу існуючих рішень, які присвячені вивченню наявних технологій і не відображають власні наукові результати автора;
- 2) всі запозичені фрагменти мають обмежений обсяг та супроводжуються відповідними бібліографічними посиланнями згідно з вимогами оформлення наукових робіт; окремі
- 3) частина виявлених збігів представляє собою стандартну технічну термінологію та загальноприйняті формулювання, що підтверджується знаходженням системою аналогічних фрагментів у численних джерелах 10-40 посилань на один термін;
- 4) окремі "запозичення" являють собою стандартні числові послідовності та двійкові коди, які є типовими для технічних завдань і не можуть розглядатися як об'єкт інтелектуальної власності;

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 4.3% і адресується до 401 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 2.7%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Василь СТЕЦЮК

Андрій Нічепорук

Ольга ПАВЛОВА