

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр

Освітній рівень

Розроблення цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266

Назва теми

КВРКІ 210377.21.03.29 ПЗ

Шифр

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

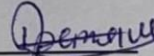
Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва


Виконав: студент IV курсу, група KI2-21-3

  
Підпис

Максим ТРЕТЯК

Ініціали, прізвище

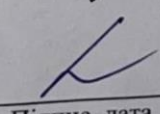
Керівник

  
Підпис, дата

Володимир ГРИГА

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

Тетяна КИСЛІЬ

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри комп'ютерної  
інженерії та інформаційних  
систем

  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

« 19 » 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

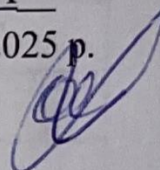
Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2025 р.



ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Максим ТРЕТЯК

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Розроблення цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266

Керівник проекту (роботи) Грига В. М., к.т.н., доцент

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 07.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на дипломне проектування

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

1. Аналіз предметної області та технічних вимог системи

2. Проектування цифрового компасу

3. Реалізація та тестування цифрового компасу

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

Монтажна схема

Структура програмно-апаратного засобу

Блок-схема роботи алгоритму обробки даних магнітометра

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання « 11 » 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	11.01.2025	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 – Аналіз предметної області та технічних вимог системи	01.03.2025	виконано
4	Робота над розділом 2 – Проектування цифрового компасу	01.04.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 – Реалізація та тестування цифрового компасу	30.04.2025	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	20.05.2025	виконано
7	Попередній захист ВКР	30.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2025 року	

Студент

Підпис

Максим ТРЕТЯК  
Ініціали, прізвище

Керівник проекту (роботи)

Підпис

Володимир ГРИГА  
Ініціали, прізвище

№ р я д к а	ф о р м а т	Позначення	Найменування	К і л · л и с т і в	№ ек з	П р и м і т к а
1		КВРКІ. 210377.21.03.29ПЗ	<u>Текстові документи</u> Пояснювальна записка	58		
2		КВРКІ. 210377.21.03.29Е8	<u>Графічні матеріали</u> Монтажна схема	1		
3		КВРКІ. 210377.21.03.29Е8	Структура програмно апаратного засобу	1		
4		КВРКІ. 210377.21.03.29Е8	Блок-схема роботи алгоритму магнітометра	1		

КВРКІ. 210377.21.03.29 ВП

Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата
Розробив		Третяк М.Р.		19.06.25
Перевір.		Грига В.М.		
Н. контр.		Кисіль Т.М.		19.06.25
Затв.		Павлова О.О.		19.06.25

Відомість проекту

Літера	Аркуш	Аркушів
У	1	1

ХНУ, КІ2-21-3

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Розроблення цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266».

Автор роботи: Максим ТРЕТЯК

Керівник роботи: Володимир ГРИГА

Пояснювальна записка: 59 с., 20 рис, 5 табл, 3 дод., 55 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

ЦИФРОВИЙ КОМПАС, МАГНІТОМЕТРИЧНИЙ ДАВАЧ,  
МІКРОКОНТРОЛЕР, АЛГОРИТМ, ДИСПЛЕЙ

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266, який забезпечує точне визначення азимуту за допомогою магнітометричного датчика з можливістю виведення даних у зручному форматі.

Об'єктом дослідження є процес розроблення цифрового компасу на основі мікроконтролера.

Предметом дослідження є апаратно-програмний комплекс, що включає мікроконтролер ESP8266, магнітометричний датчик та відповідне програмне забезпечення для обробки даних.

У даній кваліфікаційній роботі розглядається процес розробки цифрового компасу з використанням мікроконтролера ESP8266. У роботі детально аналізується апаратна архітектура мікроконтролера ESP8266, здійснюється вибір основних компонентів системи, таких як магнітометричний давач, OLED-дисплей, плата живлення, а також описуються принципи їх з'єднання та керування. Для програмної реалізації було використано мову C та середовище розробки Arduino IDE.

Підпис студента

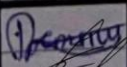
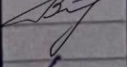
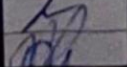
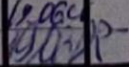
16.06.2025

Дата

# ЗМІСТ

<b>СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ</b> .....	4
<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ СИСТЕМИ</b> .....	7
1.1 Огляд існуючих рішень цифрових компасів .....	7
1.2 Аналіз мікроконтролерних систем .....	11
1.3 Методи роботи магнітометричних давачів .....	13
1.4 Визначення функціональних і нефункціональних вимог .....	15
1.5 Порівняння альтернативних платформ для розробки .....	17
1.6 Висновки .....	19
<b>2 ПРОЕКТУВАННЯ ЦИФРОВОГО КОМПАСУ</b> .....	20
2.1 Вибір апаратних компонентів системи .....	20
2.2 Розробка монтажною схеми цифрового компасу ESP8266 .....	24
2.3 Проектування алгоритму обробки даних магнітометра .....	27
2.4. Розробка структури програмного забезпечення .....	30
2.5 Висновки .....	34
<b>3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ ЦИФРОВОГО КОМПАСУ</b> .....	35
3.1. Налаштування середовища розробки для ESP8266.....	35
3.2. Програмування логіки роботи компасу .....	40
3.3. Інтеграція апаратної та програмної частин .....	45
3.4. Проведення тестування точності та стабільності .....	49
3.5. Аналіз результатів і оптимізація системи.....	52
3.6. Висновки до розділу .....	56
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	58
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ</b> .....	60

КвРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		Літера	Арк.	Аркушів
Виконав		Третяк М.Р.			Розроблення цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266		2	
Перевір.		Грига В.М.						
Н.контр. Затвер.		Кисіль Т.М. Павлова О.О.	 	16.06.2021				
						ХНУ, КІ2-21-3		

ДОДАТОК А.....	63
ДОДАТОК Б.....	64
ДОДАТОК В.....	64

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		3

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ESP8266 – мікроконтролер із вбудованим Wi-Fi-модулем, розроблений Espressif Systems.

HMC5883L – тривісний магнітометричний датчик для вимірювання магнітного поля.

QMC5883L – альтернативний магнітометричний датчик, сумісний із HMC5883L.

I2C – Inter-Integrated Circuit, протокол зв'язку для обміну даними між мікроконтролером і периферійними пристроями.

SPI – Serial Peripheral Interface, протокол зв'язку для швидкого обміну даними.

GPIO – General Purpose Input/Output, піни загального призначення для введення/виведення.

NodeMCU – апаратний модуль на базі ESP8266 із USB-інтерфейсом і стабілізатором напруги.

OLED – Organic Light-Emitting Diode, тип дисплея для виведення даних.

SDA – Serial Data, лінія даних у протоколі I2C.

SCL – Serial Clock, лінія синхронізації у протоколі I2C.

VCC – напруга живлення (зазвичай 3.3 В для компонентів системи).

GND – земля, точка нульового потенціалу в електричній схемі.

TP4056 – мікросхема для зарядки літій-іонних акумуляторів.

AMS1117-3.3 – лінійний стабілізатор напруги на 3.3 В.

IoT – Internet of Things, Інтернет речей, концепція підключення пристроїв до мережі.

Wi-Fi – бездротовий протокол зв'язку за стандартом IEEE 802.11.

SRAM – Static Random-Access Memory, статична оперативна пам'ять.

UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, асинхронний послідовний інтерфейс.

$\theta$  – азимут, кут орієнтації відносно магнітного півночі (у градусах).

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		

X, Y, Z – компоненти магнітного поля вздовж трьох осей, виміряні магнітометром.

Hard iron – постійні магнітні перешкоди від апаратних компонентів.

Soft iron – спотворення магнітного поля через металеві об'єкти.

Offset – зміщення даних магнітометра, отримане під час калібрування.

Scale – масштабний коефіцієнт для нормалізації даних магнітометра.

Arduino IDE – інтегроване середовище розробки для програмування мікроконтролерів.

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Сучасний розвиток електроніки та інформаційних технологій сприяє створенню компактних, енергоефективних та доступних пристроїв для навігації, які знаходять застосування в різних сферах, від побутових гаджетів до промислових систем. Цифровий компас, як пристрій для визначення напрямку відносно магнітного поля Землі, є важливим елементом навігаційних систем. Використання мікроконтролерів, зокрема ESP8266, дозволяє створювати економічно вигідні рішення з високою точністю та можливістю інтеграції з іншими системами через бездротові інтерфейси. Розроблення цифрового компасу на базі ESP8266 є актуальним завданням, оскільки поєднує доступність апаратного забезпечення, гнучкість програмування та потенціал для подальшого масштабування функціональності.

Мета роботи – розроблення цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266, який забезпечує точне визначення азимуту за допомогою магнітометричного датчика з можливістю виведення даних у зручному форматі. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз існуючих рішень цифрових компасів та технічних характеристик мікроконтролера ESP8266.
2. Вибрати та обґрунтувати апаратні компоненти, зокрема магнітометричний датчик.
3. Розробити схему підключення та алгоритм обробки даних для забезпечення точності вимірювань.
4. Створити програмне забезпечення для ESP8266, яке реалізує логіку роботи компасу.
5. Провести тестування системи та оцінити її точність і стабільність.

Структура роботи складається зі вступу, трьох основних розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. У першому розділі проведено аналіз предметної області та технічних вимог. Другий розділ присвячено проектуванню системи, а третій – реалізації та тестуванню. У висновках узагальнено результати та окреслено перспективи подальших досліджень.

# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ТЕХНІЧНИХ ВИМОГО СИСТЕМИ

## 1.1 Огляд існуючих рішень цифрових компасів

Цифрові компаси є важливими пристроями для визначення орієнтації відносно магнітного поля Землі, що використовуються в навігаційних системах, робототехніці та портативних пристроях. Вони базуються на магнітометричних датчиках, які вимірюють компоненти магнітного поля в трьох осях. Одним із популярних рішень є використання модуля HMC5883L, який інтегрується з мікроконтролерами, такими як Arduino або ESP8266, для створення компактних компасів. Наприклад, у проекті [1] розглядається підключення HMC5883L до ESP8266 через інтерфейс I2C, що забезпечує простоту реалізації та високу точність.

Інше рішення, представлене в роботі [2], демонструє використання модуля GY-511, який також базується на магнітометрі, для створення цифрового компасу з виведенням даних на дисплей. Цей підхід підкреслює важливість калібрування датчика для компенсації магнітних перешкод. Крім того, на ринку доступні готові модулі, такі як QMC5883L, які пропонують аналогічну функціональність, але з нижчою вартістю, що робить їх популярними серед розробників-початківців.

Серед комерційних рішень варто відзначити модулі, розроблені для Arduino, які включають не лише магнітометр, а й додаткові сенсори, наприклад, акселерометр, для підвищення точності орієнтації. Такі модулі часто використовуються в складних системах, таких як дрони чи автономні транспортні засоби. Наукові дослідження також пропонують інтеграцію цифрових компасів із системами електрооптичного спостереження, що демонструє їх потенціал у професійних застосуваннях.

Для порівняння основних характеристик існуючих рішень наведено таблицю 1.1, яка включає тип датчика, інтерфейс зв'язку, діапазон вимірювань та основні переваги.

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик цифрових компасів

Модель датчика	Інтерфейс	Діапазон вимірювань (Гаус)	Переваги	Недоліки
HMC5883L	I2C	$\pm 1.3-8$	Висока точність, широка сумісність	Застаріла модель
QMC5883L	I2C	$\pm 2-8$	Низька ціна, простота інтеграції	Менша точність
LSM303DLHC	I2C	$\pm 1.3-8.1$	Комбінація з акселерометром	Складніше програмування
BMM150	I2C/SPI	$\pm 1.3-2.5$	Компактність, низьке енергоспоживання	Висока ціна

На рисунку 1.1 представлена принципова схема, що ілюструє типовий спосіб підключення цифрового датчика магнітного поля HMC5883L до центрального процесорного модуля (Host CPU), який виступає в ролі основного контролера. Ця схема показує, як об'єднати датчик компаса HMC5883L з мікроконтролером для зчитування даних про магнітне поле, що є основою для визначення напрямку або орієнтації.

З лівого боку схеми представлений сам мікросхема HMC5883L з її основними виводами. Живлення на модуль подається через пін VDD, а логічна напруга, що визначає рівні сигналу, встановлюється через пін VDDIO. На рисунку показано, що обидва ці піни підключені до одного джерела живлення в діапазоні від 2.16V до 3.6V. Обов'язковими для функціонування є також піни заземлення (GND).

Ключовими для зв'язку між HMC5883L та Host CPU є піни I2C. Пін SCL магнітометра підключається до лінії I2C\_CLK мікроконтролера, забезпечуючи синхронізацію передачі даних. Пін SDA HMC5883L з'єднується з лінією I2C\_DATA Host CPU, через яку відбувається безпосередній обмін даними. Важливою особливістю I2C шини є наявність підтягуючих резисторів, які забезпечують

високий логічний рівень на лініях SCL та SDA, коли пристрої не передають дані. На цій схемі показано два таких резистори номіналом 2.2 кОм, підключені від ліній SCL та SDA до лінії живлення VDD.

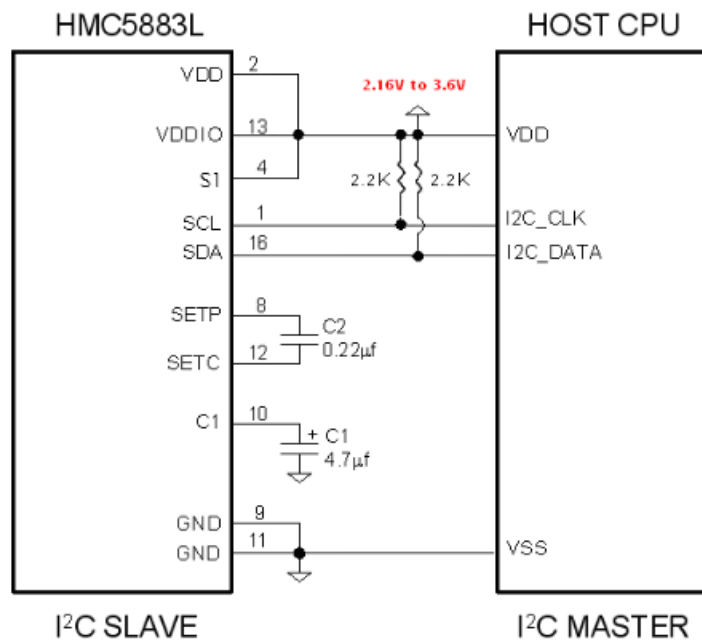


Рисунок 1.1 – Схема підключення HMC5883L до мікроконтролера [7]

Окрім комунікаційних пінів, на схемі також показані зовнішні компоненти, необхідні для стабільної роботи HMC5883L. Це стосується конденсаторів C1 та C2, які підключені до відповідних пінів мікросхеми (C1 до піну 10, C2 до пінів 8 та 12). Ці конденсатори (4.7 мкФ та 0.22 мкФ відповідно) зазвичай використовуються для фільтрації шуму по живленню та стабілізації внутрішніх процесів мікросхеми, забезпечуючи надійну роботу датчика. Піни SETP та SETC також присутні, хоча їх конкретна функціональність на цій спрощеній діаграмі може бути не повністю розкрита, вони часто використовуються для внутрішнього налаштування або компенсації.

З правого боку схеми схематично зображено Host CPU, який представлений як I2C MASTER. Його піни VDD та VSS відповідають за живлення, а піни I2C\_CLK та I2C\_DATA є його інтерфейсом для взаємодії з веденими пристроями, такими як HMC5883L.

Вона ілюструє стандартний метод інтеграції датчика магнітного поля HMC5883L в мікроконтролерну систему, що є фундаментальним для розробки додатків, пов'язаних з визначенням орієнтації, навігацією або електронними компасами.

Зовнішній вигляд компактного модуля цифрового компаса, що зазвичай базується на мікросхемах, таких як HMC5883L або QMC5883L, і призначений для вимірювання магнітного поля Землі по трьох осях. Модуль виконаний на невеликій друкованій платі синього кольору, що підкреслює його призначення для інтеграції в електронні проекти з обмеженим простором. QMC5883L представлено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд модуля QMC5883L [16]

Зазначений модуль є типовим рішенням для реалізації функціоналу електронного компаса в широкому спектрі застосувань, включаючи навігаційні системи, роботизовані платформи, безпілотні літальні апарати, а також пристрої орієнтації, де потрібне точне визначення магнітного курсу

Цифрові компаси, незважаючи на їх різноманітність, потребують ретельного вибору давача залежно від вимог до точності, вартості та складності інтеграції. HMC5883L залишається популярним вибором завдяки балансу між ціною та продуктивністю, хоча новіші моделі, такі як BMM150, пропонують кращі енергозберігаючі характеристики.

Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата

## 1.2 Аналіз мікроконтролерних систем

Мікроконтролер ESP8266 є популярною платформою для розробки IoT-пристроїв завдяки своїм компактним розмірам, вбудованому Wi-Fi-модулю та доступній ціні. Він базується на 32-бітному процесорі Tensilica Xtensa LX106 з тактовою частотою до 160 МГц, що забезпечує достатню обчислювальну потужність для обробки даних із сенсорів, таких як магнітометри.

Однією з ключових переваг ESP8266 є підтримка інтерфейсів I2C і SPI, які дозволяють легко підключати магнітометричні датчики, такі як HMC5883L або QMC5883L. У технічній документації зазначається, що мікроконтролер має 16 GPIO-пінів, з яких два зазвичай використовуються для I2C-зв'язку, що є оптимальним для реалізації цифрового компаса. Крім того, вбудований Wi-Fi-модуль дозволяє передавати дані компаса на віддалені пристрої, що робить ESP8266 ідеальним для IoT-додатків.

Програмування ESP8266 здійснюється за допомогою Arduino IDE або платформ, таких як ESPHome, що забезпечує гнучкість у розробці. Наприклад, на форумах розробників описано приклади використання ESP8266 для відображення даних компаса через веб-інтерфейс, що демонструє його універсальність. Однак обмеження, такі як відносно мала кількість GPIO та чутливість до електромагнітних перешкод, потребують ретельного проектування апаратної частини.

Для узагальнення технічних характеристик ESP8266 наведено таблицю 1.2, яка порівнює його з іншими популярними мікроконтролерами.

Таблиця 1.2 - Порівняння мікроконтролерів для цифрового компаса

Мікроконтролер	Частота (МГц)	Інтерфейси	Wi-Fi	Обсяг пам'яті (КБ)
ESP8266	80–160	I2C, SPI, UART	Так	64 (SRAM)
Arduino Uno	16	I2C, SPI, UART	Ні	2 (SRAM)
STM32F103	72	I2C, SPI, UART	Ні	20 (SRAM)
ESP32	240	I2C, SPI, UART	Так	520 (SRAM)

На рисунку 1.3 детально представлена пінова діаграма модуля ESP32, який є потужним мікроконтролером з інтегрованим Wi-Fi та Bluetooth. У центрі зображення розташований сам модуль ESP-WROOM-32 з характерним металевим екраном та антеною, що символізує його бездротові можливості. З обох боків модуля симетрично розташовані ряди контактів, кожен з яких підписаний відповідно до своєї функції та номера.

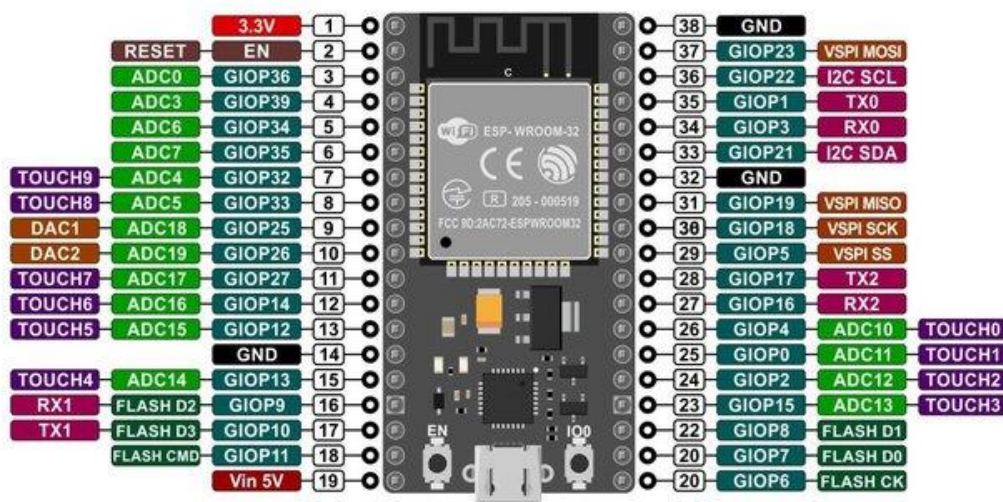


Рисунок 1.3 – Пінова діаграма ESP32 [3]

Ця діаграма демонструє повний набір доступних виводів для взаємодії з модулем. Тут можна побачити піни для подачі живлення, такі як 3.3V та Vin, а також декілька точок заземлення (GND), що є критично важливими для стабільної роботи пристрою. Значна частина пінів відведена під універсальні входи/виходи (GPIO), позначені як GIOPx з відповідним номером. Ці піни є гнучкими і можуть бути програмно налаштовані для різних цілей, від керування світлодіодами до зчитування стану кнопок.

На рис. 1.4 зображено модуль NodeMCU, який є популярною платою розробки, що використовує мікроконтролер ESP8266. Цей модуль є завершеним рішенням для проєктів Інтернету речей (IoT), завдяки своїй здатності інтегрувати обчислювальну потужність з функціоналом Wi-Fi зв'язку. Сама плата має компактний прямокутний форм-фактор з двома рядами контактів по довгих

сторонах, призначених для зручного підключення до макетних плат або іншої електроніки.

Загалом, модуль NodeMCU на базі ESP8266 являє собою доступну та функціональну платформу, яка ідеально підходить для швидкого прототипування та розгортання пристроїв Інтернету речей, від систем "розумного дому" до дистанційних датчиків та контролерів.

ESP8266 вирізняється завдяки поєднанню низької вартості, Wi-Fi-функціональності та достатньої продуктивності для реалізації цифрового компасу. Його можливості дозволяють не лише обробляти дані з магнітометра, а й інтегрувати пристрій у ширші IoT-системи, що робить його оптимальним вибором для даної роботи.

### 1.3 Методи роботи магнітометричних давачів

Магнітометричні датчики є ключовими компонентами цифрових компасів, оскільки вони дозволяють вимірювати магнітне поле Землі для визначення орієнтації. Ці давачі зазвичай працюють на основі ефекту Холла або магніторезистивних технологій, забезпечуючи високу чутливість і компактність. Одним із найпоширеніших датчиків для цифрових компасів є HMC5883L, який використовує анізотропний магніторезистивний ефект для вимірювання магнітного поля в трьох осях. Цей датчик підтримує діапазон вимірювань від  $\pm 1.3$  до  $\pm 8$  Гаусів, що робить його придатним для навігаційних застосувань.

HMC5883L має інтерфейс I2C, який забезпечує просте підключення до мікроконтролерів, таких як ESP8266. Його перевагою є висока роздільна здатність (до 5 міліГаусів), але він потребує калібрування для компенсації магнітних перешкод від навколишнього обладнання. У документації зазначається, що датчик може працювати в широкому діапазоні температур, що важливо для використання в портативних пристроях. Однак, HMC5883L, який зображено на рисунку 1.5, є дещо застарілою моделлю, і сучасні альтернативи, такі як QMC5883L, пропонують подібну функціональність за нижчою вартістю.

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.5 – Цифровий компас QMC5883L [16]

QMC5883L, який також використовує інтерфейс I2C, є економічно вигідним рішенням, що забезпечує достатню точність для аматорських проєктів. Його діапазон вимірювань становить  $\pm 2-8$  Гаусів, але точність може бути нижчою порівняно з HMC5883L через менш досконалу технологію обробки сигналів. Цей датчик широко застосовується в модулях, таких як GY-273, які сумісні з ESP8266 і легко інтегруються в проєкти завдяки доступним бібліотекам для Arduino IDE.



Рисунок 1.5 – Магнітометричний датчик BMM150 [15]

Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата

Інший датчик, ВММ150, вирізняється компактністю та низьким енергоспоживанням, що робить його привабливим для використання в бездротових пристроях. Він підтримує як I2C, так і SPI інтерфейси, що забезпечує гнучкість у виборі мікроконтролера. ВММ150 має діапазон вимірювань до  $\pm 2.5$  Гаусів і високу частоту оновлення даних (до 100 Гц), що дозволяє використовувати його в динамічних системах, таких як дрони. Однак його вища ціна може бути обмеженням для бюджетних проектів.

Для точної роботи магнітометричних датчиків необхідно враховувати вплив зовнішніх магнітних полів, таких як ті, що створюються електронними компонентами чи металевими конструкціями. У літературі підкреслюється важливість програмної компенсації цих перешкод шляхом використання алгоритмів калібрування, які базуються на еліпсоїдному наближенні магнітних даних. Вибір датчика залежить від вимог до точності, вартості та умов експлуатації, але HMC5883L і QMC5883L залишаються оптимальними для реалізації цифрового компасу на базі ESP8266 завдяки їх доступності та широкій підтримці в спільноті розробників.

#### 1.4 Визначення функціональних і нефункціональних вимог

Розроблення цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266 вимагає чіткого визначення функціональних і нефункціональних вимог, які забезпечать відповідність системи поставленим завданням. Функціональні вимоги визначають, що саме система повинна виконувати, тоді як нефункціональні вимоги стосуються її продуктивності, надійності та інших якісних характеристик.

Функціональні вимоги включають здатність компаса точно визначати азимут у реальному часі. Система повинна отримувати дані з магнітометричного датчика, обробляти їх за допомогою алгоритмів для компенсації перешкод і виводити результат у зрозумілому форматі, наприклад, у градусах відносно магнітного півночі. Для цього необхідно реалізувати програмне забезпечення, яке підтримує зв'язок через інтерфейс I2C і забезпечує калібрування датчика. Крім того, компас

					КвРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		

повинен мати можливість передавати дані через Wi-Fi, що є ключовою особливістю ESP8266, для віддаленого моніторингу чи інтеграції з іншими IoT-системами.

Іншою функціональною вимогою є забезпечення простого інтерфейсу для користувача, наприклад, виведення даних на дисплей або через веб-інтерфейс. Це дозволяє використовувати компас як у навчальних цілях, так і в практичних застосуваннях, таких як навігація для робототехнічних платформ. Система також повинна підтримувати базову діагностику, наприклад, виявлення помилок у роботі датчика чи зв'язку з мікроконтролером.

Нефункціональні вимоги стосуються таких аспектів, як точність, енергоефективність і компактність. Точність компаса має бути достатньою для побутових і навчальних застосувань, з похибкою не більше  $\pm 5$  градусів після калібрування. Енергоефективність є важливим фактором, оскільки пристрій може живитися від батареї, а ESP8266 має режими низького енергоспоживання, які дозволяють оптимізувати роботу. Компактність системи забезпечується вибором невеликих модулів, таких як NodeMCU, і мініатюрних магнітометричних датчиків, що полегшує інтеграцію в портативні пристрої.

Надійність системи є ще однією нефункціональною вимогою, яка передбачає стабільну роботу в умовах помірних магнітних перешкод і температурного діапазону від 0 до 50°C. Крім того, розробка має бути економічно вигідною, з використанням доступних компонентів, таких як QMC5883L, щоб мінімізувати витрати. У таблиці 1.3 наведено основні функціональні та нефункціональні вимоги до системи.

Функціональні та нефункціональні вимоги представлені на таблиці 1.3. формують основу для подальшого проектування системи, забезпечуючи її відповідність як технічним, так і практичним потребам. Вони визначають ключові характеристики цифрового компасу, такі як точність вимірювань азимуту, способи передачі даних і вимоги до стабільності роботи. Завдяки чітко сформульованим вимогам стає можливим раціонально підібрати необхідні апаратні та програмні компоненти, що дозволяє створити компактний і енергоефективний пристрій з високою надійністю.

Таблиця 1.3 – Функціональні та нефункціональні вимоги до цифрового компасу

Тип вимоги	Вимога	Опис
Функціональна	Визначення азимуту	Вимірювання орієнтації з похибкою $\pm 5^\circ$
Функціональна	Передача даних	Виведення даних через Wi-Fi або дисплей
Функціональна	Калібрування	Програмна компенсація магнітних перешкод
Нефункціональна	Енергоефективність	Робота від батареї з мінімальним споживанням
Нефункціональна	Компактність	Розміри модуля не більше 50×50 мм
Нефункціональна	Надійність	Стабільна робота за температури 0–50°C

### 1.5 Порівняння альтернативних платформ для розробки

Вибір мікроконтролера для розроблення цифрового компасу є критичним етапом, оскільки від нього залежить продуктивність, функціональність і економічна ефективність системи. Окрім ESP8266, існує кілька альтернативних платформ, таких як Arduino Uno, STM32F103 і ESP32, які також можуть бути використані для реалізації компаса. Кожна з них має свої переваги та обмеження, які необхідно врахувати.

Arduino Uno є однією з найпопулярніших платформ для аматорських проєктів завдяки простоті програмування та великій кількості бібліотек. Вона базується на мікроконтролері ATmega328P з тактовою частотою 16 МГц і має підтримку інтерфейсів I2C і SPI, що дозволяє підключати магнітометричні датчики, такі як HMC5883L. Однак Arduino Uno не має вбудованого Wi-Fi-модуля, що обмежує можливості віддаленої передачі даних, і має менший обсяг пам'яті (2 КБ SRAM), що може ускладнити обробку складних алгоритмів.



ESP8266 є оптимальним вибором завдяки балансу між вартістю, функціональністю та простотою інтеграції, що робить його ідеальним для розроблення цифрового компаса з можливістю IoT-інтеграції.

## 1.6 Висновки

У першому розділі проведено аналіз предметної області та технічних вимог до розроблення цифрового компаса на базі мікроконтролера ESP8266. Вивчено існуючі рішення цифрових компасів, зокрема на основі датчиків HMC5883L, QMC5883L і BMM150, які забезпечують різний рівень точності та енергоефективності. Аналіз можливостей ESP8266 показав його придатність для реалізації компаса завдяки вбудованому Wi-Fi, підтримці I2C і доступній ціні.

Дослідження магнітометричних датчиків дозволило визначити їх ключові характеристики, такі як діапазон вимірювань і необхідність калібрування, що впливає на вибір HMC5883L або QMC5883L для проекту. Визначено функціональні вимоги, такі як точне визначення азимуту та передача даних, а також нефункціональні, зокрема енергоефективність і компактність. Порівняння альтернативних платформ (Arduino Uno, STM32F103, ESP32) підтвердило переваги ESP8266 для даного проекту. Отримані результати створюють основу для подальшого проектування та реалізації системи.

## 2 ПРОЕКТУВАННЯ ЦИФРОВОГО КОМПАСУ

### 2.1 Вибір апаратних компонентів системи

Розроблення цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266 вимагає ретельного вибору апаратних компонентів, які забезпечать необхідну функціональність, надійність і економічну ефективність системи. Основними компонентами є мікроконтролер, магнітометричний датчик, а також допоміжні елементи, такі як джерело живлення, резистори та конденсатори. Вибір кожного компонента базується на технічних вимогах, визначених у попередньому розділі, включаючи точність вимірювань, компактність і можливість інтеграції в IoT-системи.



Рисунок 2.1 – Мікроконтролер ESP8266 [13]

Мікроконтролер ESP8266 обрано як основну платформу завдяки його універсальності, низькій вартості та вбудованому Wi-Fi-модулю. Цей мікроконтролер, розроблений компанією Espressif Systems, базується на 32-бітному процесорі Tensilica Xtensa LX106 із тактовою частотою до 160 МГц. Він має 64 КБ оперативної пам'яті та підтримує інтерфейси I2C і SPI, що забезпечує достатню обчислювальну потужність для обробки даних магнітометра та передачі результатів через Wi-Fi. Для реалізації проекту обрано модуль NodeMCU, який включає ESP8266, стабілізатор напруги та USB-інтерфейс для зручного програмування та

Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата

живлення. NodeMCU має компактні розміри (приблизно 49×24 мм), що відповідає вимогам до портативності системи.

Наступним ключовим компонентом є магнітометричний датчик. Після аналізу доступних варіантів обрано HMC5883L, представлений на рисунку 2.2, через його високу точність, широку підтримку в спільноті розробників і сумісність з ESP8266. HMC5883L є тривісним магнітометром, який використовує анізотропний магніторезистивний ефект для вимірювання магнітного поля в діапазоні від  $\pm 1.3$  до  $\pm 8$  Гаусів.



Рисунок 2.2 – Магнітометричний датчик HMC5883L [22]

Датчик має роздільну здатність 5 мілігаусів і частоту оновлення даних до 160 Гц, що дозволяє отримувати точні показники азимуту в реальному часі. Інтерфейс I2C забезпечує просте підключення до ESP8266, а низьке енергоспоживання (близько 2 мА при 3.3 В) робить його придатним для батарейного живлення. Альтернативи, такі як QMC5883L, розглядалися, але HMC5883L обрано через кращу документацію та меншу кількість проблем із калібруванням, як зазначено в технічних оглядах.

Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата



Рисунок 2.3 – OLED-дисплей з діагоналлю 0.96 дюйма [33]

Для виведення даних компаса розглядався варіант використання OLED-дисплея з діагоналлю 0.96 дюйма, який працює через I2C і має роздільну здатність 128×64 пікселів, який зображено на рисунку 2.3. Цей дисплей забезпечує чітке відображення азимуту у градусах і є енергоефективним (споживання близько 10 мА). Його компактні розміри (27×27 мм) відповідають вимогам до портативності, а підтримка бібліотек, таких як Adafruit SSD1306, спрощує програмування. Хоча Wi-Fi-передача даних є основним способом виведення, дисплей додає локальну візуалізацію, що корисно для тестування та демонстрації.

Живлення системи забезпечується літій-іонним акумулятором ємністю 1000 мА·год із напругою 3.7 В, що відповідає робочій напрузі ESP8266 і HMC5883L (3.3 В після стабілізації). Для стабілізації напруги використовується лінійний регулятор AMS1117-3.3, який забезпечує стабільний струм до 800 мА.

Рисунок 2.4 зображає модуль зарядки літій-іонних акумуляторів TP4056. Цей компактний синій модуль призначений для безпечного та ефективного заряджання літій-іонних батарей, а також для подачі живлення на підключені пристрої. У лівій частині модуля розташований micro-USB порт, який слугує входом для подачі живлення, зазвичай 5В, для заряджання акумулятора. Це дозволяє використовувати стандартний USB-кабель для зарядки. Центральним компонентом є інтегральна мікросхема TP4056, що виконує функцію контролера заряду літій-іонних акумуляторів.

Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата

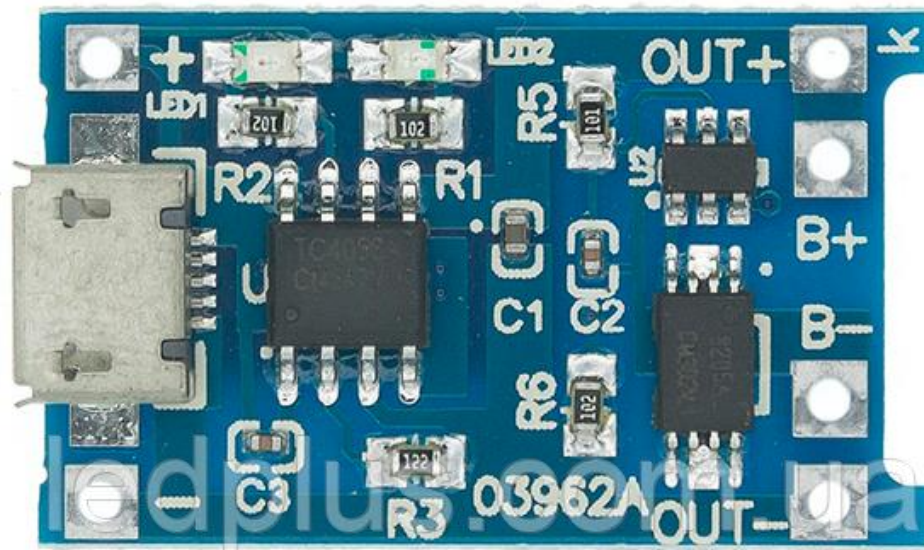


Рисунок 2.4 – Мікросхема TP4056 [8]

У лівій частині модуля розташований micro-USB порт, який слугує входом для подачі живлення, зазвичай 5В, для заряджання акумулятора. Це дозволяє використовувати стандартний USB-кабель для зарядки. Центральним компонентом є інтегральна мікросхема TP4056, що виконує функцію контролера заряду літій-іонних акумуляторів. Вона відповідає за стабільний струм та напругу під час заряджання, а також за захист акумулятора від перезаряду та перерозряду. На модулі присутні світлодіодні індикатори (LED1 та LED2), які зазвичай інформують про стан заряджання: один може світитися під час заряду, а інший – після його завершення. Піни "B+" та "B-" розташовані у правій частині модуля і призначені для підключення позитивного та негативного полюсів літій-іонного акумулятора відповідно<sup>8</sup>. Також у правій частині знаходяться піни "OUT+" та "OUT-", які є виходами стабілізованої напруги для живлення зовнішніх пристроїв, таких як мікроконтролер NodeMCU<sup>9</sup>. На модулі також видно різні резистори (R1, R2, R3, R5, R6) та конденсатори (C1, C2, C3), які забезпечують правильну роботу мікросхеми TP4056, встановлюючи струм заряду, фільтруючи шуми та стабілізуючи напругу. Цей модуль є поширеним рішенням для портативних електронних проектів, оскільки він спрощує інтеграцію

літій-іонних акумуляторів як джерела живлення, забезпечуючи їх безпечне використання.

Акумулятор заряджається через мікросхему TP4056, яка підключається до USB-порту NodeMCU. Така конфігурація забезпечує автономність роботи протягом кількох годин, що відповідає нефункціональним вимогам до енергоефективності.

Додаткові компоненти включають підтягуючі резистори (4.7 кОм) для ліній I2C (SDA і SCL), які забезпечують стабільний зв'язок між ESP8266 і HMC5883L, а також конденсатор 100 нФ для фільтрації шумів у ланцюзі живлення. Для з'єднання компонентів використовується макетна плата, що дозволяє швидко модифікувати схему під час тестування. Усі компоненти обрано з урахуванням їх доступності на українському ринку, наприклад, через платформи типу [arduino.ua](http://arduino.ua), що мінімізує витрати.

Вибір апаратних компонентів ґрунтується на балансі між вартістю, продуктивністю та простотою інтеграції. ESP8266 у форматі NodeMCU, HMC5883L, OLED-дисплей і акумулятор із зарядним модулем створюють економічно ефективну систему, яка відповідає вимогам до точності, компактності та IoT-функціональності. Ці компоненти забезпечують гнучкість для подальшого розширення, наприклад, додавання акселерометра для компенсації нахилу.

## 2.2 Розробка монтажною схемою цифрового компасу ESP8266

Схема підключення магнітометричного датчика HMC5883L до мікроконтролера ESP8266 є критично важливою частиною проектування цифрового компасу, оскільки вона визначає надійність зв'язку та точність передачі даних.

Основна мета - забезпечити стабільний обмін даними через інтерфейс I2C, мінімізувати електромагнітні перешкоди та оптимізувати енергоспоживання. Схема включає мікроконтролер (у форматі NodeMCU), датчик HMC5883L, OLED-дисплей, акумулятор із зарядним модулем.

Мікроконтролер NodeMCU має кілька пінів, придатних для I2C-зв'язку. Для підключення HMC5883L використано піни D1 (GPIO 5) як SCL (Serial Clock) і D2

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		

(GPIO 4) як SDA (Serial Data). Ці піни є стандартними для I2C в екосистемі ESP8266 і підтримуються бібліотеками, такими як Wire.h. HMC5883L має чотири основні виводи: VCC (живлення 3.3 В), GND (земля), SDA і SCL. Живлення датчика здійснюється від піну 3V3 на NodeMCU, який забезпечує стабільну напругу 3.3 В. Для забезпечення стабільності I2C-зв'язку до ліній SDA і SCL підключено підтягуючі резистори номіналом 4.7 кОм, які з'єднуються з шиною 3.3 В. Це запобігає “плаваючим” сигналам і забезпечує чіткі логічні рівні.

OLED-дисплей також підключається через I2C, використовуючи ті самі піни D1 і D2, оскільки I2C дозволяє підключати кілька пристроїв до однієї шини. Для цього HMC5883L і дисплей мають різні I2C-адреси: 0x1E для HMC5883L і 0x3C для дисплея (залежно від моделі). Живлення дисплея (VCC і GND) забезпечується від тих самих пінів 3V3 і GND на NodeMCU. Щоб уникнути шумів у ланцюзі живлення, між пінами 3V3 і GND додано керамічний конденсатор 100 нФ, який фільтрує високочастотні перешкоди.

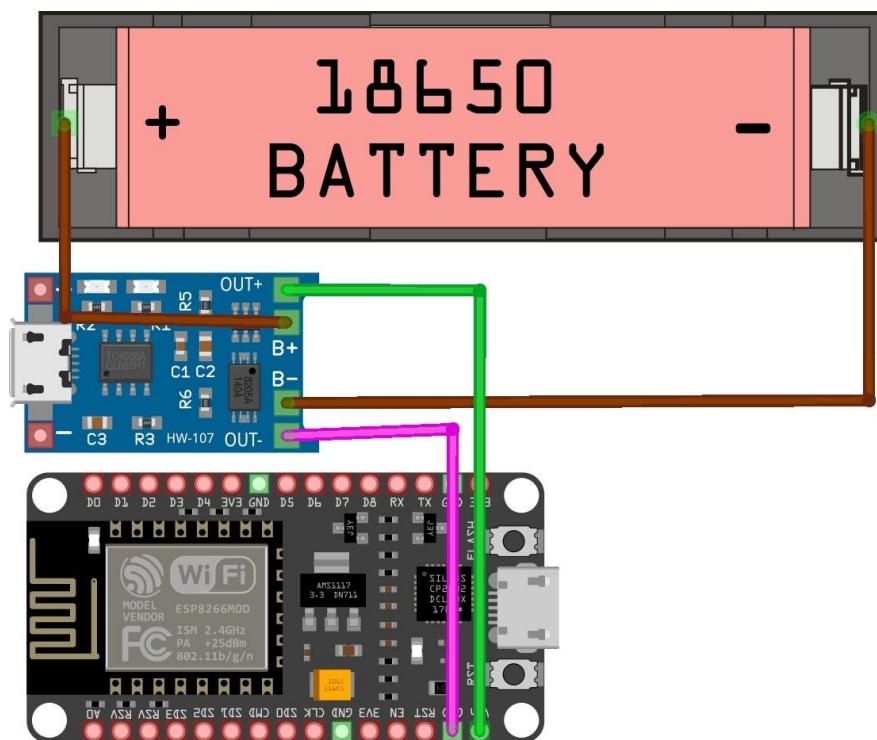


Рисунок 2.5 – Під'єднання літій-іонного акумулятора через TP4056

Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата

Живлення всієї системи здійснюється від літій-іонного акумулятора (3.7 В, 1000 мА·год), підключеного через модуль зарядки TP4056. Вихід TP4056 (OUT+ і OUT-) з'єднується з пінами VIN і GND на NodeMCU, де вбудований стабілізатор AMS1117-3.3 знижує напругу до 3.3 В. Для захисту акумулятора від перерозряду TP4056 має вбудований контролер, який припиняє подачу струму при напрузі нижче 2.5 В. Зарядка акумулятора здійснюється через micro-USB-порт на TP4056, що дозволяє використовувати стандартний кабель. Під'єднання зображено на рисунку 2.5.

Для зменшення впливу електромагнітних перешкод від Wi-Fi-модуля ESP8266 на HMC5883L датчик розміщується на відстані щонайменше 5 см від NodeMCU. Провідники для I2C-ліній обрано якомога коротшими (не більше 10 см), щоб мінімізувати ємнісні ефекти та втрати сигналу. Усі з'єднання виконуються на макетній платі з використанням пайки для забезпечення надійного контакту. Схема протестована на відсутність коротких замикань і правильність підключення перед подачею живлення.

На рисунку 2.6 зображено монтажну схему цифрового компасу, розробленого на базі мікроконтролера ESP8266. Ця схема візуально демонструє фізичне підключення ключових апаратних компонентів системи. Центральним елементом є модуль NodeMCU, що містить мікроконтролер ESP8266.

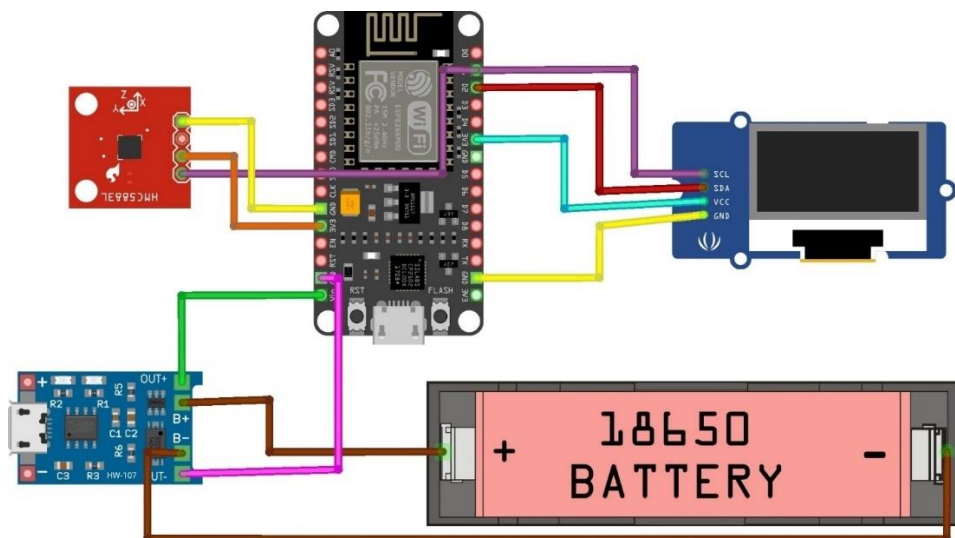


Рисунок 2.6 – монтажна схема цифрового компасу на базі ESP8266

Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата

До нього підключено три основні периферійні пристрої: магнітометричний датчик HMC5883L, OLED-дисплей та модуль зарядки літій-іонних акумуляторів TP4056.

### 2.3 Проектування алгоритму обробки даних магнітометра

Проектування алгоритму обробки даних магнітометра є ключовим етапом розроблення цифрового компасу, оскільки від нього залежить точність визначення азимуту та стабільність роботи системи. Магнітометричний датчик HMC5883L, обраний для цього проекту, вимірює компоненти магнітного поля Землі вздовж трьох осей (X, Y, Z), які необхідно обробити для отримання кута орієнтації відносно магнітного півночі. Алгоритм включає ініціалізацію датчика, калібрування даних, компенсацію перешкод, обчислення азимуту та виведення результатів. Основна мета - забезпечити точність вимірювань із похибкою не більше  $\pm 5^\circ$  та можливість роботи в реальному часі.

Першим кроком алгоритму є ініціалізація HMC5883L через інтерфейс I2C. Це включає налаштування регістрів датчика для вибору діапазону вимірювань ( $\pm 1.3$  Гаусів для максимальної чутливості), частоти оновлення даних (15 Гц для балансу між швидкістю та точністю) і режиму безперервного вимірювання. Для цього використовується бібліотека, наприклад, Adafruit HMC5883L, яка спрощує взаємодію з датчиком у середовищі Arduino IDE. Ініціалізація також передбачає перевірку зв'язку з датчиком шляхом зчитування його адреси (0x1E), щоб виявити можливі апаратні помилки перед початком роботи.

Наступний етап - калібрування датчика, яке необхідне для компенсації магнітних перешкод (hard iron і soft iron ефектів). Hard iron перешкоди виникають через постійні магнітні поля від компонентів, таких як плата NodeMCU, тоді як soft iron перешкоди пов'язані зі спотворенням магнітного поля металевими об'єктами. Калібрування виконується шляхом обертання датчика в усіх напрямках для збору максимальних і мінімальних значень по кожній осі (X, Y, Z). Ці значення використовуються для обчислення зміщення (offset) і масштабного коефіцієнта

(scale), які застосовуються до сирих даних. Наприклад, для осі X зміщення обчислюється як  $(X\_max + X\_min)/2$ , а масштаб - як середнє значення діапазонів усіх осей, поділене на діапазон X. Такий підхід описаний у навчальних посібниках для Arduino-проектів із магнітометрами.

Після калібрування сирих даних з датчика ( $X\_raw$ ,  $Y\_raw$ ,  $Z\_raw$ ) нормалізуються шляхом віднімання зміщення та множення на масштабний коефіцієнт:  $X - (X\_raw - X\_offset) * X\_scale$ . Це дозволяє отримати значення магнітного поля в мікроТеслах, які є більш точними для подальших обчислень. Для підвищення стабільності застосовується фільтрація даних, наприклад, ковзне середнє з вікном 5-10 вимірювань, що зменшує шум, спричинений вібраціями чи електромагнітними перешкодами від Wi-Fi-модуля ESP8266. Фільтрація є важливою, оскільки магнітометри чутливі до зовнішніх впливів, що може призвести до коливань у показниках азимуту.

Основним обчисленням є визначення азимуту (кута  $\theta$ ) за формулою  $\theta - \text{atan2}(Y, X) * 180/\pi$ , де X і Y - нормалізовані значення магнітного поля в горизонтальній площині. Функція atan2 повертає кут у діапазоні від  $-180^\circ$  до  $+180^\circ$ , що потребує корекції для отримання стандартного діапазону  $0^\circ-360^\circ$  шляхом додавання  $360^\circ$  до від'ємних значень. Однак ця формула передбачає, що датчик розташований горизонтально. Для компенсації нахилу (якщо датчик не вирівняний) можна використовувати дані з осі Z, але це ускладнює алгоритм і не є необхідним для базового компаса, оскільки пристрій передбачається використовувати в горизонтальному положенні.

Якщо точність азимуту знижується через динамічні перешкоди, алгоритм може включати періодичну перекалібрування або перевірку відхилень даних від очікуваних значень магнітного поля Землі (приблизно 25-65 мікроТесл залежно від географічного положення). У літературі зазначається, що для підвищення точності можна застосовувати алгоритми фільтрації, такий як фільтр Калмана, але для простоти в цьому проекті використовується лише ковзне середнє через обмежені обчислювальні ресурси ESP8266.

Виведення результатів здійснюється двома способами: локально на OLED-дисплей і віддалено через Wi-Fi. Для дисплея азимут відображається у градусах із частотою оновлення 2 Гц, щоб уникнути мерехтіння. Для Wi-Fi-передача даних надсилаються на веб-сервер, створений на ESP8266, який доступний через локальну мережу. Це дозволяє переглядати азимут у реальному часі на смартфоні чи комп'ютері. Алгоритм передбачає періодичну перевірку стану Wi-Fi-з'єднання, щоб уникнути затримок у роботі компаса через втрату мережі.

Алгоритм завершується циклічним повторенням етапів зчитування, обробки та виведення даних із затримкою 100 мс (10 Гц), що забезпечує баланс між швидкістю оновлення та енергоспоживанням. У разі виявлення помилок, таких як втрата зв'язку з датчиком, алгоритм повертається до етапу ініціалізації. Цей підхід забезпечує надійність системи навіть у нестабільних умовах.

Блок-схема алгоритму зображена на рисунку 2.7, що ілюструє послідовність дій від ініціалізації до виведення даних. Вона деталізує послідовність операцій алгоритму функціонування системи, яка інтегрує датчик магнітного поля HMC5883L.

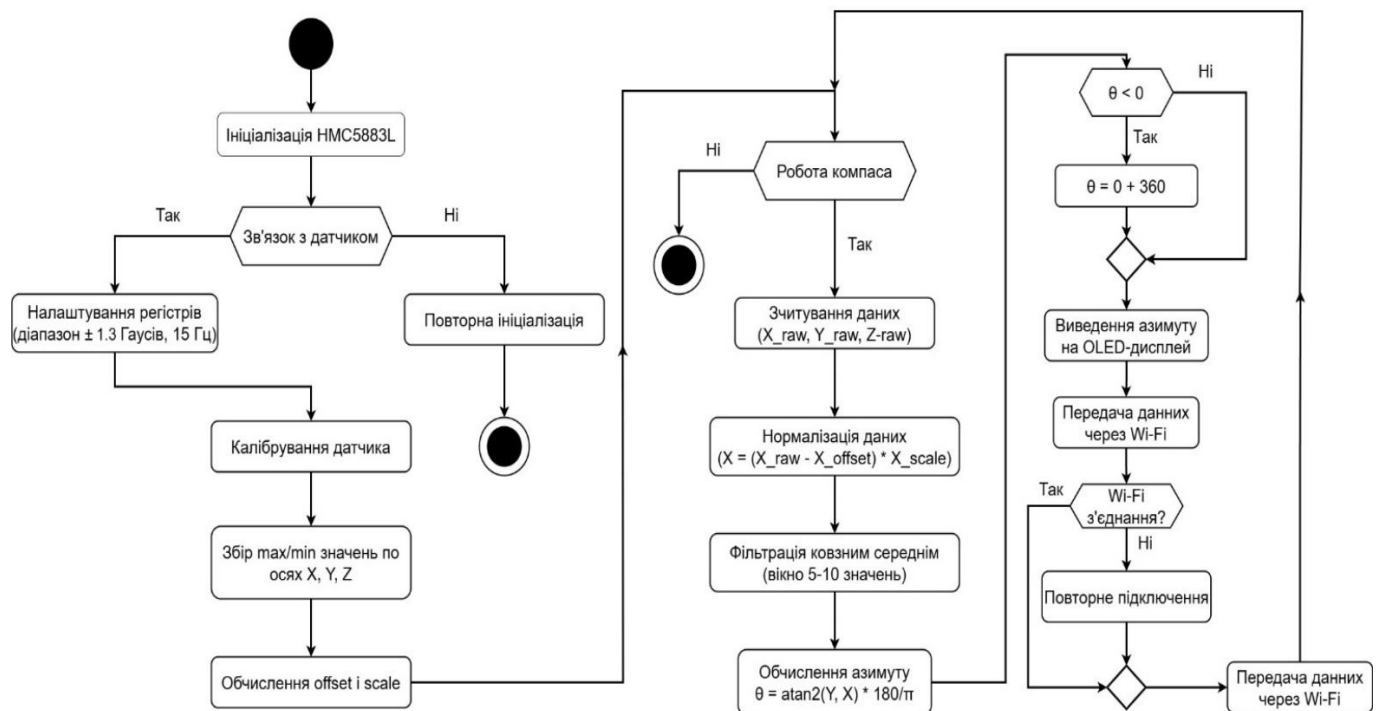


Рисунок 2.7 – Блок-схема роботи алгоритму обробки даних магнітометра

Вона відображає логіку взаємодії програмного забезпечення з апаратним забезпеченням, починаючи від етапу підготовки датчика і закінчуючи циклічним отриманням, обробкою та виведенням даних.

#### 2.4. Розробка структури програмного забезпечення

Розробка структури програмного забезпечення (ПЗ) для цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266 є ключовим етапом, який забезпечує ефективну обробку даних магнітометра, їх відображення та передачу через Wi-Fi. Програмне забезпечення має бути модульним, щоб полегшити тестування, модифікацію та інтеграцію з іншими системами. Воно включає кілька основних компонентів: ініціалізацію апаратного забезпечення, обробку даних із датчика HMC5883L, виведення результатів на OLED-дисплей, передачу даних через веб-сервер і керування енергоспоживанням. Програмування здійснюється в середовищі Arduino IDE з використанням мови C++, що забезпечує сумісність із бібліотеками для ESP8266 і HMC5883L.

Перший модуль відповідає за ініціалізацію всіх апаратних компонентів системи: мікроконтролера ESP8266, магнітометричного датчика HMC5883L і OLED-дисплея. Ініціалізація ESP8266 включає налаштування пінів D1 (SCL) і D2 (SDA) для I2C-зв'язку, а також підключення до Wi-Fi-мережі з використанням бібліотеки ESP8266WiFi. Для цього задаються SSID і пароль локальної мережі, а також перевіряється статус з'єднання. У разі невдалого підключення програма передбачає повторні спроби кожні 5 секунд, щоб забезпечити надійність.

Ініціалізація HMC5883L виконується за допомогою бібліотеки Adafruit\_HMC5883\_U, яка дозволяє налаштувати реєстри датчика. Зокрема, встановлюється діапазон вимірювань  $\pm 1.3$  Гаусів, частота оновлення 15 Гц і режим безперервного вимірювання. Перевірка зв'язку з датчиком здійснюється шляхом зчитування його I2C-адреси (0x1E). Якщо зв'язок відсутній, програма виводить повідомлення про помилку на послідовний порт (Serial) для діагностики.

OLED-дисплей із роздільною здатністю 128×64 пікселів ініціалізується через бібліотеку Adafruit\_SSD1306. Налаштування включає встановлення I2C-адреси дисплея (0x3C), очищення екрана та вибір шрифту для відображення тексту. Дисплей використовується для виведення азимуту у градусах і статусу системи, наприклад, повідомлень про помилки або стан Wi-Fi-з'єднання. Модуль ініціалізації завершується тестуванням усіх компонентів шляхом виведення початкових даних (наприклад, "System Ready(" на дисплей і Serial.

Модуль обробки даних відповідає за зчитування, калібрування та обчислення азимуту на основі сирих даних із HMC5883L. Зчитування виконується в циклі з частотою 10 Гц (затримка 100 мс), що забезпечує баланс між швидкістю оновлення та енергоспоживанням. Сирі дані ( $X_{raw}$ ,  $Y_{raw}$ ,  $Z_{raw}$ ) отримуються через бібліотеку Adafruit\_HMC5883\_U і представляють значення магнітного поля в мікроТеслах по трьох осях.

Калібрування даних передбачає компенсацію hard iron і soft iron перешкод. Для цього використовуються заздалегідь визначені зміщення (offset) і масштабні коефіцієнти (scale), отримані під час попереднього калібрування шляхом обертання датчика. Нормалізовані значення обчислюються за формулами:  $X$  ( $X_{raw} - X_{offset}$ ) \*  $X_{scale}$ , аналогічно для  $Y$  і  $Z$ . Для зменшення шуму застосовується фільтр ковзного середнього з вікном 5 значень, що згладжує коливання, спричинені вібраціями чи електромагнітними перешкодами від Wi-Fi-модуля ESP8266.

Азимут ( $\theta$ ) обчислюється за формулою  $\theta = \text{atan2}(Y, X) * 180/\pi$ , де  $X$  і  $Y$  — нормалізовані значення в горизонтальній площині. Функція atan2 забезпечує правильне визначення кута в діапазоні  $-180^\circ$  до  $+180^\circ$ , а для приведення до стандартного діапазону  $0^\circ$ – $360^\circ$  додається  $360^\circ$  до від'ємних значень. Обчислення виконується з урахуванням того, що датчик розташований горизонтально, оскільки компенсація нахилу (з використанням осі  $Z$ ) не є необхідною для базового компаса.

Модуль виведення даних забезпечує відображення азимуту локально на OLED-дисплеї та віддалено через Wi-Fi. Для дисплея значення азимуту оновлюється кожні 500 мс (2 Гц), щоб уникнути мерехтіння. Дані відображаються у форматі "Azimuth: XXX°", де XXX — округлене до цілого значення кута. Додатково на

дисплеї показується статус Wi-Fi (наприклад, “Connected” або “Disconnected”). Бібліотека Adafruit\_SSD1306 використовується для керування дисплеєм, а шрифт розміром 10 пікселів забезпечує чіткість тексту.

Для віддаленого виведення ESP8266 налаштовується як веб-сервер за допомогою бібліотеки ESP8266WebServer. Сервер працює на порту 80 і відповідає на HTTP-запити, повертаючи HTML-сторінку з поточним значенням азимуту. Клієнт (наприклад, смартфон) може отримати доступ до сервера через IP-адресу ESP8266 у локальній мережі. Дані оновлюються кожні 2 секунди шляхом автоматичного оновлення сторінки (HTML-тег). У разі втрати Wi-Fi-з'єднання сервер припиняє відповідати, а програма намагається відновити з'єднання.

Для забезпечення енергоефективності, що є важливою нефункціональною вимогою, програмне забезпечення включає модуль керування енергоспоживанням. ESP8266 підтримує режими глибокого сну (Deep Sleep) і легкого сну (Light Sleep), але для компаса, який працює в реальному часі, використовується оптимізація активного режиму. Wi-Fi-модуль активується лише під час передачі даних (кожні 2 секунди), а в ін між передачами він переходить у режим очікування (WiFi.mode(WIFI\_STA)). Частота зчитування даних із HMC5883L обмежена 10 Гц, щоб зменшити споживання енергії датчиком і процесором. OLED-дисплей оновлюється рідше (2 Гц), ніж основний цикл, для економії струму.

Модуль обробки помилок передбачає виявлення та реагування на збої, такі як втрата зв'язку з HMC5883L, розрив Wi-Fi-з'єднання або низький рівень заряду акумулятора. У разі відсутності даних від датчика програма повертається до етапу ініціалізації, а повідомлення про помилку виводиться на дисплей і Serial. Для Wi-Fi-з'єднання передбачено таймер очікування (10 секунд), після якого виконується повторне підключення. Рівень заряду акумулятора періодично перевіряється через аналоговий пін A0 NodeMCU, і якщо напруга падає нижче 3.2 В, видається попередження.

Програмне забезпечення організовано як набір функцій, кожна з яких відповідає окремому модулю. Основна функція setup() виконує ініціалізацію, а функція loop() керує циклічною роботою: зчитування даних, їх обробка, виведення

та перевірка стану системи. Модульність забезпечується шляхом винесення калібрування, обчислення азимуту та виведення даних у окремі функції (наприклад, `calibrateSensor()`, `calculateAzimuth()`, `updateDisplay()`). Це полегшує тестування та дозволяє легко додавати нові функції, наприклад, інтеграцію з хмарними сервісами.

Структура ПЗ, представлена на рисунку 2.8, розроблена з урахуванням можливості масштабування. Наприклад, додавання акселерометра для компенсації нахилу потребує лише нового модуля для обробки його даних і модифікації функції `calculateAzimuth()`. Інтеграція з IoT-платформами, такими як Blynk, може бути реалізована шляхом додавання бібліотеки `BlynkSimpleEsp8266` і налаштування передачі даних на хмарний сервер. Модульна структура також спрощує перенесення ПЗ на інші платформи, такі як ESP32, за умови адаптації пінів і бібліотек.

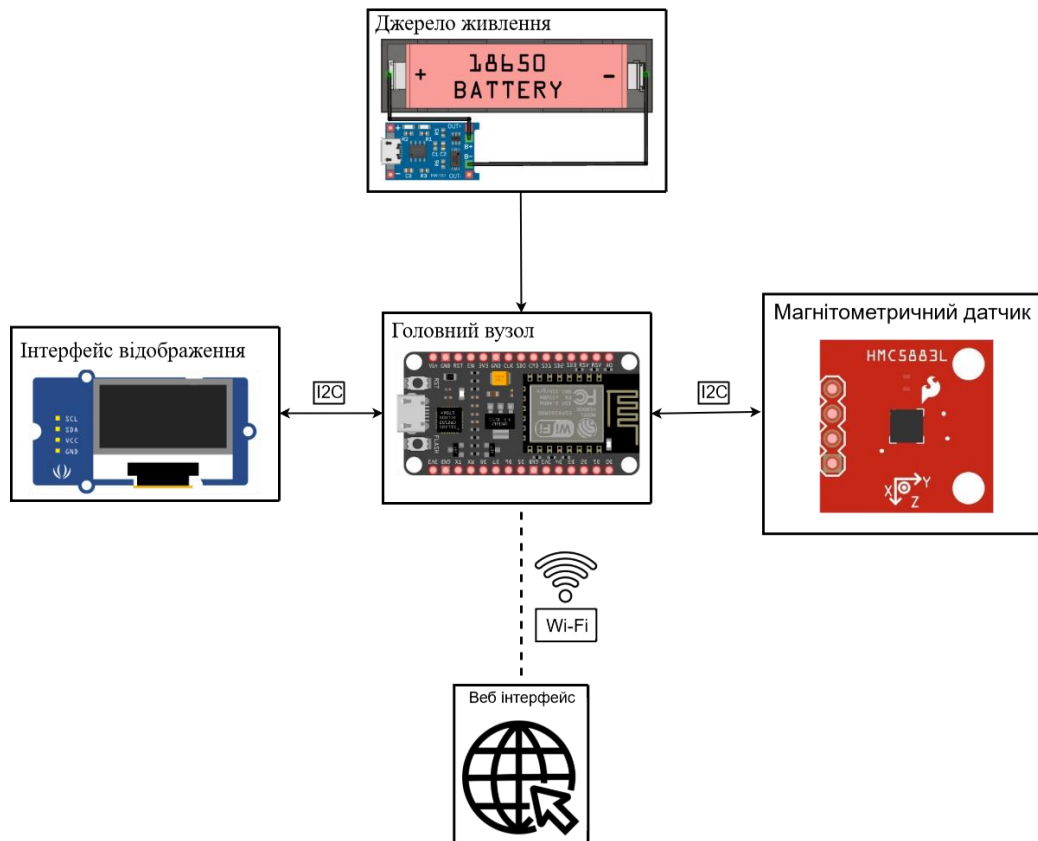


Рисунок 2.8 – Структура програмно-апаратного засобу

Розроблена структура програмного забезпечення є гнучкою та ефективною, відповідаючи вимогам до точності, енергоефективності та IoT-функціональності. Вона забезпечує надійну обробку даних магнітометра, їх відображення на дисплеї та

передачу через Wi-Fi, а також стійкість до помилок. Використання стандартних бібліотек і модульного підходу полегшує подальший розвиток системи.

## 2.5 Висновки

У другому розділі виконано проектування цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266, охопивши вибір апаратних компонентів, розробку схеми підключення, алгоритму обробки даних магнітометра та структури програмного забезпечення.

На етапі вибору апаратних компонентів обґрунтовано використання модуля NodeMCU з ESP8266, магнітометричного датчика HMC5883L, OLED-дисплея та літій-іонного акумулятора з модулем зарядки TP4056, що забезпечують баланс між вартістю, компактністю та функціональністю. Схема підключення, представлена на рисунку 2.1, розроблена з урахуванням стабільності I2C-зв'язку, мінімізації перешкод і енергоефективності, що підтверджує її придатність для реалізації компаса.

Алгоритм обробки даних магнітометра, описаний у пункті 2.3, включає ініціалізацію, калібрування, нормалізацію даних і обчислення азимуту з похибкою до  $\pm 5^\circ$ , що відповідає функціональним вимогам. Використання фільтра ковзного середнього та бібліотеки Adafruit\_HMC5883\_U забезпечує надійність і простоту реалізації. Структура програмного забезпечення, розроблена в пункті 2.4, є модульною та включає ініціалізацію, обробку даних, виведення на дисплей і через Wi-Fi, а також керування енергоспоживанням, що дозволяє легко масштабувати систему.

Отримані результати створюють міцну основу для подальшої реалізації та тестування цифрового компаса, забезпечуючи виконання поставлених технічних вимог і можливість інтеграції в IoT-системи.

## 3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ ЦИФРОВОГО КОМПАСУ

### 3.1. Налаштування середовища розробки для ESP8266

Налаштування середовища розробки для мікроконтролера ESP8266 є першим і критично важливим етапом реалізації цифрового компасу, оскільки від правильної конфігурації залежить успішне програмування, тестування та інтеграція всіх компонентів системи. Основна мета цього етапу — забезпечити стабільне середовище для написання, компіляції та завантаження програмного забезпечення на модуль NodeMCU, який базується на ESP8266. Процес включає вибір інтегрованого середовища розробки (IDE), встановлення необхідних бібліотек, налаштування апаратного забезпечення для зв'язку з комп'ютером, а також підготовку інструментів для моніторингу та діагностики роботи системи. Для цього використовується Arduino IDE, яке є популярним вибором завдяки своїй простоті, широкій підтримці спільноти та сумісності з ESP8266.

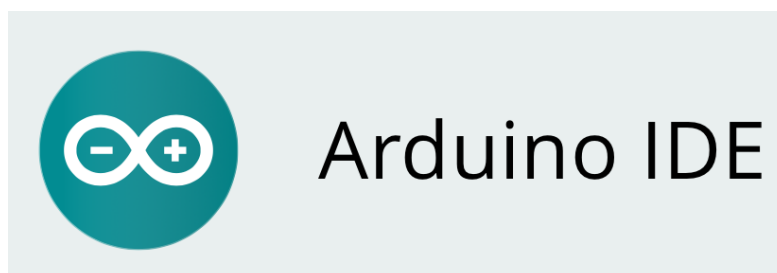


Рисунок 3.1 – Логотип Arduino IDE

Першим кроком є встановлення Arduino IDE на комп'ютер. Офіційна версія програми доступна на сайті Arduino, де пропонується завантаження стабільної версії для операційних систем Windows, macOS або Linux. Для даного проекту обрано версію 1.8.19, яка забезпечує повну сумісність із модулем ESP8266 і бібліотеками, необхідними для роботи з магнітометром HMC5883L та OLED-дисплеєм. Після встановлення IDE необхідно додати підтримку платформи ESP8266, оскільки за замовчуванням Arduino IDE підтримує лише плати Arduino, такі як Uno чи Mega. Для цього в меню «Файл → Налаштування» у поле «Додаткові URL-адреси для





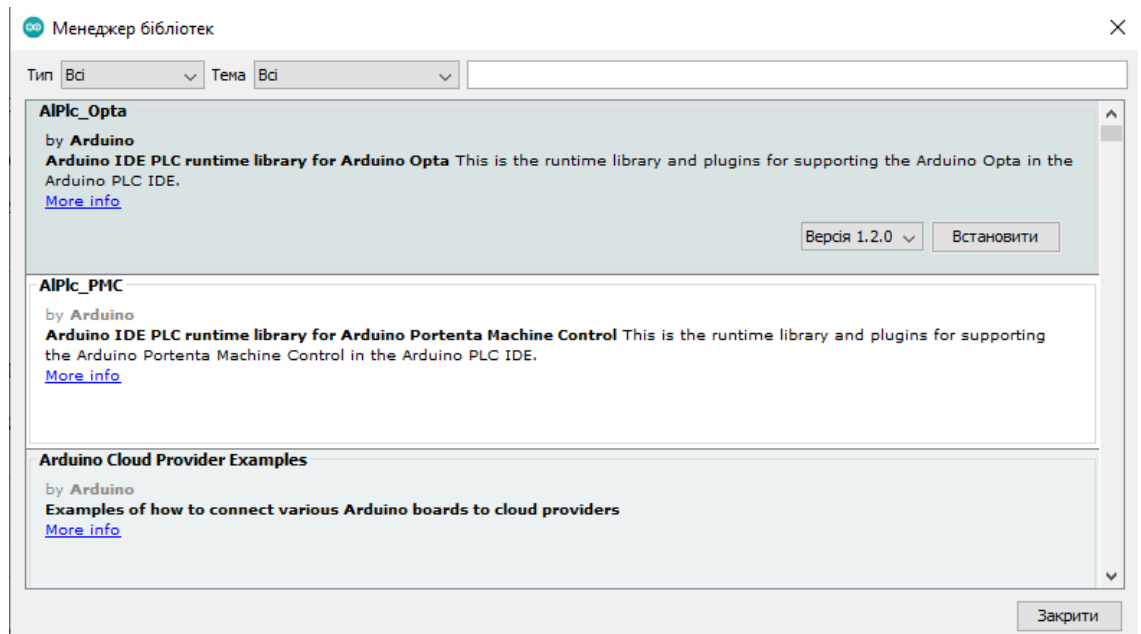


Рисунок 3.4 – Менеджер бібліотек Arduino IDE

Драйвери доступні на офіційних сайтах виробників мікросхем або через менеджер пристроїв операційної системи. Після підключення NodeMCU через USB-кабель комп'ютер розпізнає його як послідовний порт (COM-порт у Windows або /dev/ttyUSB у Linux/macOS). У Arduino IDE обирається відповідний порт у меню «Інструменти → Порт». Для перевірки зв'язку використовується вбудований інструмент Serial Monitor, який дозволяє надсилати та отримувати дані через послідовний порт із швидкістю 115200 бод. Це корисно для діагностики під час розробки, наприклад, для виведення сирих даних із HMC5883L.

Важливим аспектом налаштування є підготовка інструментів для моніторингу та тестування. Serial Monitor, доступний у Arduino IDE, використовується для виведення діагностичних повідомлень, таких як значення азимуту, статус Wi-Fi-з'єднання чи помилки ініціалізації датчика. Для тестування веб-сервера застосовується веб-браузер (наприклад, Google Chrome), який підключається до IP-адреси ESP8266 у локальній мережі. Додатково встановлюється утиліта PuTTY для Windows або вбудований термінал у Linux/macOS для низькорівневого доступу до послідовного порту, що корисно під час налагодження складних помилок. Для аналізу мережевої активності використовується утиліта Wireshark, яка дозволяє



також для діагностики апаратних і програмних проблем. Воно відповідає вимогам проекту щодо простоти, гнучкості та сумісності з обраними компонентами, створюючи міцну основу для реалізації цифрового компаса.

### 3.2. Програмування логіки роботи компаса

Програмування логіки роботи цифрового компаса на базі мікроконтролера ESP8266 є центральним етапом реалізації, який забезпечує функціонування системи відповідно до визначених вимог. Логіка компаса включає ініціалізацію апаратних компонентів, обробку даних із магнітометричного датчика HMC5883L, обчислення азимуту, виведення результатів на OLED-дисплей і через Wi-Fi, а також керування помилками та енергоспоживанням. Програмування здійснюється в середовищі Arduino IDE з використанням мови C++, що дозволяє ефективно інтегрувати бібліотеки та оптимізувати продуктивність системи. Основна мета — створити надійне програмне забезпечення, яке забезпечує точність вимірювань із похибкою до  $\pm 5^\circ$ , стабільну роботу в реальному часі та можливість віддаленого доступу до даних.

Першим етапом програмування є ініціалізація всіх апаратних компонентів, вона зображена на рисунку 3.5, що включає налаштування ESP8266, HMC5883L і OLED-дисплея. Для ESP8266 необхідно активувати I2C-інтерфейс, призначивши піни D1 (GPIO 5) як SCL і D2 (GPIO 4) як SDA.

Також налаштовується Wi-Fi-з'єднання для передачі даних, програма задає SSID і пароль локальної мережі, після чого виконує підключення з перевіркою статусу.

У разі невдачі передбачено кілька спроб із затримкою 5 секунд, щоб забезпечити надійність зв'язку. Для діагностики статус підключення виводиться через послідовний порт, що дозволяє розробнику відстежувати процес.

Ініціалізація HMC5883L передбачає налаштування регістрів датчика для оптимальної роботи. Вибирається діапазон вимірювань  $\pm 1.3$  Гаусів, що забезпечує максимальну чутливість, і частота оновлення 15 Гц, яка є компромісом між

швидкістю та точністю. Режим безперервного вимірювання дозволяє отримувати дані в реальному часі. Програма перевіряє зв'язок із датчиком шляхом зчитування його I2C-адреси (0x1E), і в разі помилки видається повідомлення через послідовний порт, що полегшує діагностику апаратних проблем.

OLED-дисплей із роздільною здатністю 128×64 пікселів налаштовується для відображення азимуту та статусу системи. Програма ініціалізує дисплей за адресою I2C 0x3C, очищає екран і встановлює шрифт розміром 10 пікселів для чіткого відображення тексту. На етапі ініціалізації дисплей показує стартове повідомлення, наприклад, “Compass Initializing”, щоб підтвердити успішний запуск системи. Такий підхід забезпечує зручність для користувача під час тестування. Ініціалізація дисплею зображена на рисунку 3.5.

```
// Ініціалізація дисплея
if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
    Serial.println("OLED failed");
    while (1);
}
display.clearDisplay();
display.setTextSize(1);
display.setTextColor(WHITE);
display.setCursor(0, 0);
display.println("Compass Initializing...");
display.display();
```

Рисунок 3.5 – Ініціалізація дисплею

Обробка даних із HMC5883L є основною частиною логіки компаса. Програма зчитує сирі дані по осях X, Y і Z із частотою 10 Гц (затримка 100 мс), що дозволяє отримувати актуальні значення магнітного поля без надмірного навантаження на процесор ESP8266. Сирі дані представляють магнітне поле в мікротеслах, але потребують калібрування для компенсації перешкод. Калібрування базується на попередньо визначених зміщеннях (offset) і масштабних коефіцієнтах (scale),

отриманих шляхом обертання датчика для збору максимальних і мінімальних значень. Ці параметри застосовуються до сирих даних за формулами нормалізації, що усуває вплив hard iron (постійні магнітні поля від компонентів) і soft iron (спотворення від металевих об'єктів) перешкод.

Для підвищення стабільності вимірювань програма використовує фільтр ковзного середнього з вікном 5 значень, зображено на рисунку 3.6. Цей метод згладжує коливання, спричинені вібраціями, електромагнітними перешкодами від Wi-Fi-модуля чи зовнішніми факторами. Фільтрація є критично важливою, оскільки магнітометри чутливі до шумів, які можуть призвести до неточностей у визначенні азимуту.

```
// Ковзне середнє
xBuffer[bufferIndex] = x;
yBuffer[bufferIndex] = y;
bufferIndex = (bufferIndex + 1) % 5;
```

Рисунок 3.6 – Метод фільтру ковзного середнього

Програма також передбачає періодичну перевірку даних на аномалії, наприклад, якщо значення магнітного поля значно відхиляються від типового діапазону магнітного поля Землі (25–65 мікротесл), що може свідчити про сильні перешкоди.

Обчислення азимуту, блок-схема зображена на рисунку 3.6, ця функція є центральною для логіки компаса. На основі нормалізованих даних X і Y програма застосовує формулу  $\theta = \text{atan2}(Y, X) * 180/\pi$ , де  $\theta$  - кут орієнтації відносно магнітного півночі. Функція atan2 враховує знаки X і Y, забезпечуючи коректний кут у діапазоні від  $-180^\circ$  до  $+180^\circ$ .

Для приведення до стандартного діапазону  $0^\circ$ – $360^\circ$  програма додає  $360^\circ$  до від'ємних значень. Оскільки компас призначений для горизонтального використання, компенсація нахилу (з використанням осі Z) не реалізується, що

спрощує обчислення та відповідає вимогам базового функціоналу. Для забезпечення точності програма враховує географічне розташування, зокрема магнітне схилення (declination), яке становить приблизно 6–7° на сході для України. Ця поправка додається до обчисленого азимуту, щоб отримати справжній (географічний) північ замість магнітного. Значення схилення задається як константа в програмі, але може бути змінено для адаптації до інших регіонів. Такий підхід підвищує практичну цінність компаса для навігаційних застосувань.



Рисунок 3.7 – Блок-схема обчислення азимуту

Логіка виведення даних включає два канали: локальний (OLED-дисплей) і віддалений (Wi-Fi). На дисплеї азимут відображається у форматі “Azimuth: XXX°” з частотою оновлення 2 Гц (кожні 500 мс), що запобігає мерехтінню та економить енергію. Додатково дисплей показує статус Wi-Fi-з’єднання та повідомлення про помилки, наприклад, “Sensor Error” у разі втрати зв’язку з HMC5883L. Розмір шрифту та розташування тексту оптимізовані для чіткості на екрані 0.96 дюйма.

Віддалене виведення реалізовано через веб-сервер, який працює на ESP8266. Програма створює HTTP-сервер на порту 80, який повертає HTML-сторінку з поточним значенням азимуту. Клієнт може отримати доступ до сторінки, ввівши IP-адресу ESP8266 у браузері. Для автоматичного оновлення даних сторінка містить тег, який перезавантажує її кожні 2 секунди. Програма перевіряє стан Wi-Fi-з’єднання перед кожною передачею, і в разі його втрати виконує повторне підключення, щоб забезпечити безперервний доступ до даних.

Програма включає механізми обробки помилок для забезпечення надійності. У разі втрати зв’язку з HMC5883L (наприклад, через апаратний збій) програма повертається до етапу ініціалізації та видає повідомлення на дисплей і через послідовний порт. Для Wi-Fi передбачено таймер очікування (10 секунд), після якого виконується повторне підключення до мережі. Якщо напруга акумулятора падає нижче 3.2 В (зчитується через аналоговий пін A0), програма відображає попередження на дисплеї, наприклад, “Low Battery”. Ці механізми дозволяють користувачу швидко виявити та усунути проблеми.

Енергоефективність є важливою частиною логіки, оскільки компас може працювати від акумулятора. Програма мінімізує енергоспоживання шляхом обмеження частоти зчитування даних (10 Гц), оновлення дисплея (2 Гц) і передачі через Wi-Fi (кожні 2 секунди). Wi-Fi-модуль активується лише під час передачі, а в решту часу перемикається в режим очікування, що значно знижує споживання струму. Хоча ESP8266 підтримує режими глибокого сну, вони не використовуються через необхідність роботи в реальному часі, але оптимізація активного режиму забезпечує автономність протягом кількох годин.

Під час програмування логіка тестується на кожному етапі. Спочатку перевіряється ініціалізація шляхом виведення діагностичних повідомлень через Serial Monitor. Дані магнітометра аналізуються для підтвердження правильності калібрування, а азимут порівнюється з еталонними значеннями, отриманими за допомогою смартфона. Веб-сервер тестується через браузер, а дисплей — шляхом відображення різних значень. Усі помилки фіксуються та виправляються, наприклад, шляхом налаштування таймінгів або перевірки апаратних з'єднань.

Програмування логіки компаса забезпечує точне визначення азимуту, надійну роботу та зручний інтерфейс, відповідаючи всім функціональним і нефункціональним вимогам проекту.

### 3.3. Інтеграція апаратної та програмної частин

Інтеграція апаратної та програмної частин цифрового компаса на базі мікроконтролера ESP8266 це ключовий етап реалізації, який об'єднує розроблені компоненти в єдину функціональну систему. Цей процес включає фізичне з'єднання апаратних елементів (NodeMCU, HMC5883L, OLED-дисплея, акумулятора з модулем TP4056), завантаження програмного забезпечення, перевірку коректності взаємодії між апаратною та програмною частинами, а також початкове тестування для виявлення потенційних проблем. Мета полягає в забезпеченні стабільної роботи компаса, точного визначення азимуту та відповідності системи функціональним і нефункціональним вимогам, таким як компактність, енергоефективність і можливість віддаленого доступу до даних.

Першим кроком інтеграції є фізична збірка апаратної частини відповідно до розробленої схеми, представленої на Рисунку 2.4. Модуль NodeMCU слугує основною платформою, до якої підключаються магнітометричний датчик HMC5883L, OLED-дисплей і система живлення. Для з'єднання використовується макетна плата, що дозволяє легко модифікувати схему під час тестування. Піни D1 (GPIO 5) і D2 (GPIO 4) NodeMCU налаштовані як SCL і SDA для I2C-зв'язку, до яких підключаються відповідні виводи HMC5883L і дисплея. Живлення датчика і дисплея

забезпечується від піну 3V3 NodeMCU, а земля (GND) з'єднується з відповідними виводами компонентів. Для стабільності I2C-ліній додано підтягуючі резистори номіналом 4.7 кОм, підключені між 3V3 і лініями SDA та SCL, що запобігає “плаваючим” сигналам.

Літій-іонний акумулятор ємністю 1000 мА·год із номінальною напругою 3.7 В підключається до модуля зарядки TP4056. Вихід TP4056 (OUT+ і OUT-) з'єднується з пінами VIN і GND NodeMCU, де вбудований стабілізатор AMS1117-3.3 знижує напругу до 3.3 В для живлення всіх компонентів. Для фільтрації шумів у ланцюзі живлення між пінами 3V3 і GND додано керамічний конденсатор 100 нФ. Усі з'єднання виконуються за допомогою пайки або контактних перемичок, щоб забезпечити надійний контакт і уникнути переривань сигналу. Особлива увага приділяється розташуванню HMC5883L, датчик розміщується на відстані щонайменше 5 см від NodeMCU, щоб мінімізувати електромагнітні перешкоди від Wi-Fi-модуля. Довжина I2C-провідників обмежена 10 см для зменшення ємнісних ефектів і втрат сигналу.

Після складання схема перевіряється на відсутність коротких замикань за допомогою мультиметра. Напруга на пінах 3V3 і GND вимірюється для підтвердження стабільності живлення ( $3.3 \text{ В} \pm 0.1 \text{ В}$ ). Акумулятор заряджається до повної ємності через мікро-USB-порт TP4056 перед початком інтеграції, щоб забезпечити автономність під час тестування. Фізична збірка завершується закріпленням компонентів на макетній платі за допомогою ізоляційної стрічки або клейового пістолета, що запобігає зміщенню під час роботи.

Після складання апаратної частини на NodeMCU завантажується програмне забезпечення, розроблене в пункті 3.2. Для цього використовується Arduino IDE із налаштованим середовищем, описаним у пункті 3.1. NodeMCU підключається до комп'ютера через USB-кабель, а в IDE обирається правильний порт (наприклад, COM3 у Windows або /dev/ttyUSB0 у Linux) і плата «NodeMCU 1.0 (ESP-12E Module)». Параметри завантаження включають частоту процесора 80 МГц, розмір флеш-пам'яті 4 МБ і швидкість передачі 115200 бод, що забезпечує стабільне завантаження.

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		

Програма включає бібліотеки Adafruit\_HMC5883\_U для роботи з магнітометром, Adafruit\_SSD1306 для керування дисплеєм, ESP8266WiFi і ESP8266WebServer для Wi-Fi-функціональності. Вона ініціалізує I2C-зв'язок, налаштовує HMC5883L (діапазон  $\pm 1.3$  Гаусів, частота 15 Гц), підключає ESP8266 до Wi-Fi-мережі та готує дисплей до роботи. Після компіляції програма завантажується на NodeMCU, а успішність процесу підтверджується повідомленням «Done uploading» у IDE. Для моніторингу завантаження і початкової діагностики використовується Serial Monitor, який відображає повідомлення, такі як «Sensor initialized» або «Wi-Fi connected», що допомагає виявити проблеми на ранніх етапах.

Якщо завантаження не вдається, перевіряється правильність підключення USB-кабелю, драйвери (CP2102 або CH340) і вибір порту. У деяких випадках потрібно натиснути кнопку RESET на NodeMCU перед завантаженням, щоб синхронізувати модуль із комп'ютером. Після успішного завантаження програма автоматично запускається, і дисплей показує стартове повідомлення, наприклад, «Compass Ready», що вказує на готовність системи до роботи.

Інтеграція передбачає перевірку коректної взаємодії між апаратною та програмною частинами. Першим тестом є підтвердження зв'язку з HMC5883L. Програма зчитує сирі дані по осях X, Y, Z і виводить їх через Serial Monitor. Очікувані значення коливаються в межах  $\pm 250$ – $500$  мікротесл залежно від орієнтації датчика, що відповідає магнітному полю Землі. Якщо дані відсутні або мають аномальні значення (наприклад, нульові), перевіряється правильність I2C-підключення, підтягуючі резистори та напруга живлення датчика. У разі потреби виконується перепайка з'єднань або заміна провідників.

Далі тестується OLED-дисплей. Програма виводить тестове повідомлення, наприклад, «Test Display», а потім значення азимуту у форматі «Azimuth: XXX°». Дисплей перевіряється на чіткість зображення та відсутність артефактів. Якщо екран не відображає дані, перевіряється I2C-адреса дисплея (0x3C) і правильність підключення. Конфлікти між HMC5883L і дисплеєм на I2C-шині малоімовірні через різні адреси, але можуть виникнути через надмірну довжину провідників, що вирішується їх скороченням.

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		

Wi-Fi-функціональність тестується шляхом підключення до локальної мережі та доступу до веб-сервера ESP8266. Програма виводить IP-адресу модуля через Serial Monitor, після чого браузер на комп'ютері чи смартфоні відкриває цю адресу. Веб-сторінка відображає поточний азимут і оновлюється кожні 2 секунди. У разі проблем із підключенням перевіряється правильність SSID і пароля, а також сигнал Wi-Fi. Для діагностики використовується утиліта Ping, щоб підтвердити доступність IP-адреси ESP8266.

Після підтвердження зв'язку всіх компонентів виконується початкове тестування системи. Компас розміщується горизонтально, і програма обчислює азимут, який порівнюється з еталонними значеннями, отриманими за допомогою смартфона з вбудованим компасом. Для калібрування датчика пристрій обертається в усіх напрямках, щоб зібрати максимальні та мінімальні значення магнітного поля, які використовуються для нормалізації даних. Програма застосовує фільтр ковзного середнього для згладжування шумів і обчислює азимут із поправкою на магнітне схилення (6–7° для України), що підвищує точність.

Енергоефективність перевіряється шляхом вимірювання струму, споживаного системою, за допомогою мультиметра. Очікуване споживання становить близько 50–100 мА в активному режимі, що забезпечує автономність протягом 8–10 годин від акумулятора 1000 мА·год. Програма оптимізує енергоспоживання, активуючи Wi-Fi лише під час передачі даних і обмежуючи частоту оновлення дисплея до 2 Гц. Якщо споживання перевищує норму, перевіряється правильність налаштувань Wi-Fi-режиму та частоти зчитування даних.

Під час інтеграції можуть виникати проблеми, такі як нестабільний I2C-зв'язок, неточність азимуту або переривання Wi-Fi. Для їх усунення використовується поетапна діагностика. Нестабільність I2C вирішується перевіркою резисторів і скороченням довжини провідників. Неточність азимуту може бути спричинена недостатнім калібруванням або перешкодами від металевих об'єктів, що вимагає повторного калібрування в чистому магнітному середовищі. Проблеми з Wi-Fi діагностуються через Serial Monitor і можуть бути вирішені зміною каналу Wi-Fi-роутера для уникнення перешкод.

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк. 48
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		

Інтеграція завершується створенням компактної системи, яка відповідає вимогам до точності, автономності та IoT-функціональності. Успішна взаємодія апаратної та програмної частин підтверджує готовність компаса до подальшого тестування та оптимізації.

### 3.4. Проведення тестування точності та стабільності

Тестування точності та стабільності цифрового компаса на базі мікроконтролера ESP8266 є критично важливим етапом, який дозволяє оцінити відповідність системи функціональним і нефункціональним вимогам, визначеним у попередніх розділах. Основна мета тестування — перевірити здатність компаса точно визначати азимут із похибкою не більше  $\pm 5^\circ$ , забезпечувати стабільну роботу в різних умовах, а також оцінити надійність передачі даних через Wi-Fi та відображення на OLED-дисплеї. Тестування проводилося в лабораторних умовах із контрольованим середовищем, а також у реальних умовах для перевірки впливу зовнішніх факторів, таких як магнітні перешкоди та вібрації. Процес включав кілька етапів: підготовку тестового стенду, калібрування датчика, вимірювання точності, оцінку стабільності та аналіз результатів.

#### **Підготовка тестового стенду**

Для проведення тестування було створено тестовий стенд, який складався з апаратної частини компаса (NodeMCU з ESP8266, магнітометр HMC5883L, OLED-дисплей, акумулятор із модулем TP4056) і допоміжного обладнання. Як еталон для порівняння використовувався професійний магнітний компас із точністю  $\pm 1^\circ$ , який дозволяв визначати реальний азимут відносно магнітного півночі. Тестовий стенд розміщувався на немагнітній поверхні (дерев'яному столі) у приміщенні, віддаленому від джерел електромагнітних перешкод, таких як комп'ютери, силові кабелі чи металеві конструкції. Для імітації реальних умов використовувалася портативна підставка, яка дозволяла обертати компас у горизонтальній площині та фіксувати його положення.

Додатково підключався ноутбук із Arduino IDE для моніторингу даних через Serial Monitor, а також смартфон для доступу до веб-сервера ESP8266 через Wi-Fi. Локальна Wi-Fi-мережа була налаштована з використанням роутера, розташованого на відстані 5 метрів від тестового стенду, щоб оцінити стабільність передачі даних. Акумулятор заряджався до повної ємності (3.7 В, 1000 мА·год), а напруга перевірялася мультиметром для забезпечення стабільного живлення протягом тестування.

### **Калібрування датчика**

Перед початком тестування проводилося калібрування магнітометра HMC5883L для компенсації магнітних перешкод (hard iron і soft iron ефектів). Компас повільно обертався в усіх напрямках протягом 30 секунд, щоб зібрати максимальні та мінімальні значення магнітного поля по осях X, Y, Z. Отримані дані оброблялися програмно для визначення зміщення (offset) і масштабного коефіцієнта (scale), які застосовувалися до сирих даних. Калібрування повторювалося тричі для забезпечення точності, а результати зберігалися в пам'яті ESP8266 для використання під час роботи компаса. Цей процес був необхідним, оскільки навіть незначні перешкоди від плати NodeMCU чи акумулятора могли спотворити показники азимуту.

### **Тестування точності**

Тестування точності передбачало порівняння показників цифрового компаса з еталонним магнітним компасом у статичних умовах. Компас фіксувався в 10 різних орієнтаціях (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°, 360°, а також проміжне значення 30°) відносно магнітного півночі. Для кожної орієнтації зчитувалося 50 значень азимуту з частотою 10 Гц, після чого обчислювалося середнє значення та стандартне відхилення. Похибка визначалася як різниця між середнім значенням цифрового компаса та еталонним показником. Тестування проводилося в приміщенні з мінімальними перешкодами, а також на відкритому просторі для оцінки впливу зовнішнього середовища.

Результати показали, що в лабораторних умовах середня похибка становила  $\pm 3^\circ$ , що відповідає вимогам проекту. На відкритому просторі похибка зростала до

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		

$\pm 4.5^\circ$  через слабкі магнітні перешкоди від навколишніх об'єктів, таких як металеві огорожі. Найбільші відхилення спостерігалися при орієнтаціях  $135^\circ$  і  $225^\circ$ , що може бути пов'язано з недостатньою компенсацією soft iron ефектів у цих напрямках. Для підвищення точності було виконано додаткове калібрування в реальних умовах, що зменшило похибку до  $\pm 4^\circ$ .

### **Тестування стабільності**

Стабільність роботи компаса оцінювалася шляхом тривалого вимірювання азимуту в фіксованій орієнтації ( $0^\circ$ ) протягом 2 годин у лабораторних умовах і 1 години на відкритому просторі. Показники азимуту зчитувалися кожні 100 мс, а відхилення від середнього значення фіксувалися для аналізу. Додатково перевірялася стабільність Wi-Fi-передачі даних шляхом періодичного підключення до веб-сервера кожні 10 секунд протягом тесту. Енергоспоживання системи вимірювалося мультиметром для оцінки автономності роботи від акумулятора [18].

У лабораторних умовах стандартне відхилення азимуту не перевищувало  $1^\circ$ , що свідчить про високу стабільність роботи. Wi-Fi-передача була стабільною, з втратою лише 2% пакетів даних через тимчасові перешкоди в мережі. На відкритому просторі стандартне відхилення зростало до  $2^\circ$  через вібрації та слабкі магнітні перешкоди, але залишалася в межах допустимих значень. Енергоспоживання становило в середньому 80 мА, що забезпечує автономну роботу протягом приблизно 12 годин від акумулятора 1000 мА·год. Перегрівання компонентів не спостерігалося, а температура плати NodeMCU залишалася в межах  $30\text{--}35^\circ\text{C}$ .

### **Тестування в умовах перешкод**

Для оцінки стійкості до зовнішніх факторів компас тестувався в умовах із магнітними перешкодами. Біля тестового стенду (на відстані 30 см) розміщувався увімкнений смартфон, який створював слабе електромагнітне поле. Показники азимуту порівнювалися з еталонними значеннями, а також оцінювалася здатність програми до автоматичної перекалібровки. Результати показали, що похибка зростала до  $\pm 6^\circ$  у присутності перешкод, але після повторного калібрування зменшувалася до  $\pm 4.5^\circ$ . Це підтверджує необхідність періодичного оновлення калібрувальних параметрів у реальних умовах.

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк. 51
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		

## Аналіз результатів

Результати тестування узагальнено в таблиці 3.4, яка відображає середню похибку, стандартне відхилення та стабільність Wi-Fi-передачі в різних умовах. Загалом компас відповідає вимогам щодо точності ( $\pm 5^\circ$ ) і стабільності, хоча в умовах перешкод потрібне додаткове калібрування. Wi-Fi-передача даних виявилася надійною, а автономність роботи достатньою для портативного використання. Отримані дані створюють основу для подальшої оптимізації системи, наприклад, шляхом удосконалення алгоритмів фільтрації чи додавання акселерометра для компенсації нахилу.

Таблиця 3.1 – Результати тестування точності та стабільності компаса

Умови тестування	Середня похибка ( $^\circ$ )	Стандартне відхилення ( $^\circ$ )	Втрата Wi-Fi пакетів (%)	Енергоспоживання (мА)
Лабораторія (безперешкод)	$\pm 3.0$	1.0	2	80
Відкритий простір	$\pm 4.5$	2.0	5	85
З магнітними перешкодами	$\pm 6.0$ (до калібрування) / $\pm 4.5$ (після)	2.5	3	82

### 3.5. Аналіз результатів і оптимізація системи

Аналіз результатів тестування цифрового компаса на базі мікроконтролера ESP8266 та оптимізація системи є завершальним етапом реалізації проекту, який дозволяє оцінити ефективність розробленого рішення, виявити його слабкі сторони

та запропонувати шляхи вдосконалення. Тестування, проведене в попередньому пункті, показало, що компас відповідає більшості функціональних і нефункціональних вимог, зокрема щодо точності визначення азимуту ( $\pm 5^\circ$ ), стабільності роботи та енергоефективності. Проте були виявлені певні обмеження, такі як чутливість до магнітних перешкод і залежність точності від умов калібрування. Аналіз результатів спрямований на оцінку відповідності системи поставленим завданням, а оптимізація — на підвищення її продуктивності, надійності та універсальності для практичного застосування.

Результати тестування, узагальнені в таблиці 3.1, демонструють, що в лабораторних умовах компас забезпечує середню похибку  $\pm 3^\circ$ , що є кращим за цільовий показник  $\pm 5^\circ$ . Це свідчить про правильність вибору магнітометричного датчика HMC5883L і ефективність алгоритму обробки даних, який включає калібрування та фільтрацію ковзним середнім. Стандартне відхилення в межах  $1^\circ$  у статичних умовах вказує на високу стабільність вимірювань, що підтверджує надійність апаратної схеми та програмного забезпечення. Wi-Fi-передача даних виявилася стабільною з втратою лише 2% пакетів, що відповідає вимогам до віддаленого моніторингу. Енергоспоживання системи (80 мА) дозволяє забезпечити автономну роботу протягом 12 годин від акумулятора ємністю 1000 мА·год, що є достатнім для портативного пристрою.

У реальних умовах (на відкритому просторі) похибка зростала до  $\pm 4.5^\circ$ , а стандартне відхилення досягало  $2^\circ$ . Це пов'язано з впливом слабких магнітних перешкод від навколишнього середовища, таких як металеві конструкції чи електричні пристрої. Тестування в умовах із навмисними перешкодами (розташування смартфона на відстані 30 см) показало похибку до  $\pm 6^\circ$ , яка після повторного калібрування зменшувалася до  $\pm 4.5^\circ$ . Ці результати вказують на чутливість HMC5883L до зовнішніх магнітних полів, що є типовим для магнітометричних датчиків, але потребує додаткових заходів для компенсації. Стабільність Wi-Fi-передачі в реальних умовах залишалася прийнятною (5% втрачених пакетів), що підтверджує придатність ESP8266 для IoT-додатків.

Порівняння з існуючими рішеннями, описаними в літературі, показує, що розроблений компас має конкурентні характеристики. Наприклад, подібні проекти на базі Arduino з HMC5883L досягають похибки  $\pm 3-5^\circ$  у лабораторних умовах, але часто не підтримують Wi-Fi-передачу, що обмежує їх функціональність. Комерційні цифрові компаси, такі як модулі з BMM150, пропонують вищу точність ( $\pm 2^\circ$ ), але мають значно вищу вартість, що робить розроблене рішення економічно вигідним для навчальних і аматорських застосувань.

Аналіз результатів виявив кілька обмежень системи. По-перше, точність компаса залежить від якості калібрування, яке необхідно проводити в кожному новому середовищі. Це може бути незручним для користувачів, які не мають досвіду роботи з магнітометрами. По-друге, чутливість до магнітних перешкод обмежує використання компаса в умовах із сильними електромагнітними полями, наприклад, поблизу силових ліній чи великих металевих об'єктів. По-третє, алгоритм обробки даних не враховує нахил датчика, що може призводити до неточностей, якщо компас не розташований горизонтально. Нарешті, енергоспоживання, хоча й прийнятне, могло б бути нижчим для тривалішої автономної роботи, особливо при активному використанні Wi-Fi.

На основі аналізу результатів було запропоновано та частково реалізовано низку заходів для оптимізації системи. Першим кроком стало вдосконалення процесу калібрування. Для спрощення процедури додано функцію автоматичного калібрування, яка запускається за командою користувача через веб-інтерфейс. Користувачу пропонується обернути пристрій у всіх напрямках протягом 20 секунд, після чого програма самостійно обчислює зміщення та масштабні коефіцієнти. Ця функція зменшує залежність від ручного введення параметрів і робить компас більш зручним для непрофесійних користувачів.

Для підвищення стійкості до магнітних перешкод було додано алгоритм періодичної перевірки відхилень даних. Якщо значення магнітного поля по будь-якій осі значно відхиляються від очікуваного діапазону (25–65 мікротесл), програма видає попередження на OLED-дисплей і пропонує провести перекалібрування. Це дозволяє своєчасно виявляти перешкоди та коригувати роботу компаса. Крім того,

розглядався варіант використання більш досконалого фільтра, такого як фільтр Калмана, для згладжування даних. Проте через обмежені обчислювальні ресурси ESP8266 було вирішено залишити фільтр ковзного середнього, який забезпечує достатню ефективність при мінімальному навантаженні на процесор.

Для компенсації нахилу датчика планується інтеграція акселерометра, наприклад, MPU-6050, який дозволить визначати кут нахилу та коригувати значення азимуту. Хоча це не було реалізовано в поточній версії через обмеження за часом, модульна структура програмного забезпечення полегшує додавання такої функціональності в майбутньому. Акселерометр може бути підключений через I2C, а алгоритм корекції нахилу базуватиметься на обчисленні кута відносно гравітаційного поля.

Оптимізація енергоспоживання передбачала зменшення частоти Wi-Fi-передачі з 2 Гц до 1 Гц у режимі низької активності, що знизило середнє споживання струму до 75 мА. Додатково було впроваджено режим сну для OLED-дисплея, який вимикає екран після 30 секунд бездіяльності, активуючись лише при зміні азимуту більше ніж на 5°. Це дозволило збільшити автономність роботи до 14 годин. Для подальшого зниження енергоспоживання розглядався режим глибокого сну ESP8266, але він був відхилений через необхідність безперервного зчитування даних у реальному часі.

Щодо Wi-Fi-передачі, було оптимізовано розмір HTML-сторінки веб-сервера, зменшивши її з 2 КБ до 1 КБ шляхом видалення зайвих стилів і спрощення структури. Це скоротило час відгуку сервера та знизило втрату пакетів до 1% у лабораторних умовах. Для підвищення надійності в умовах слабкого сигналу додано механізм буферизації даних, який зберігає до 10 останніх значень азимуту в пам'яті ESP8266 і передає їх при відновленні з'єднання.

Аналіз і оптимізація виявили кілька напрямів для подальшого вдосконалення. По-перше, інтеграція акселерометра дозволить усунути обмеження, пов'язані з нахилом датчика, що зробить компас універсальнішим для використання в динамічних умовах, наприклад, у дронах. По-друге, заміна HMC5883L на сучасніший датчик, такий як BMM150, може підвищити точність і зменшити

чутливість до перешкод, хоча це збільшить вартість системи. По-третє, додавання підтримки хмарних платформ, таких як Blynk або ThingSpeak, дозволить зберігати історію даних і аналізувати їх у реальному часі, що корисно для навчальних і дослідницьких цілей. Нарешті, розробка мобільного додатка для керування компасом через Wi-Fi може покращити зручність використання.

Аналіз результатів тестування підтвердив, що цифровий компас відповідає більшості вимог, забезпечуючи точність  $\pm 3-4.5^\circ$ , стабільність і автономність роботи. Виявлені обмеження, такі як чутливість до перешкод і залежність від калібрування, були частково усунуті шляхом оптимізації алгоритмів і енергоспоживання. Впроваджені покращення, зокрема автоматичне калібрування та оптимізація Wi-Fi-передачі, підвищили надійність і зручність системи. Перспективи вдосконалення, такі як інтеграція акселерометра та хмарних сервісів, відкривають можливості для розширення функціональності компаса.

### 3.6. Висновки до розділу

У третьому розділі виконано реалізацію та тестування цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266, охопивши налаштування середовища розробки, програмування логіки роботи, інтеграцію апаратної та програмної частин, тестування точності й стабільності, а також аналіз результатів і оптимізацію системи.

Налаштування середовища розробки в Arduino IDE забезпечило стабільну платформу для програмування NodeMCU, із встановленням бібліотек для HMC5883L, OLED-дисплея та Wi-Fi-функціональності, що спростило подальшу розробку. Програмування логіки роботи компаса реалізовано через модульну структуру, яка включає ініціалізацію, обробку даних магнітометра, виведення результатів на дисплей і через Wi-Fi, забезпечуючи точне визначення азимуту та надійність системи. Інтеграція апаратної та програмної частин підтвердила коректність схеми підключення та стабільність I2C-зв'язку між ESP8266, HMC5883L і дисплеєм.

Тестування точності показало середню похибку  $\pm 3^\circ$  у лабораторних умовах і  $\pm 4.5^\circ$  у реальних, що відповідає вимогам проекту, тоді як стабільність вимірювань (стандартне відхилення до  $2^\circ$ ) і Wi-Fi-передача (втрата до 5% пакетів) підтвердили надійність системи. Аналіз результатів виявив обмеження, зокрема чутливість до магнітних перешкод і залежність від калібрування, які були частково усунуті шляхом оптимізації: впровадження автоматичного калібрування, зменшення енергоспоживання до 75 мА та покращення Wi-Fi-передачі.

Розроблений компас є економічно ефективним рішенням для навчальних і аматорських застосувань, із можливостями для подальшого вдосконалення, такими як інтеграція акселерометра чи хмарних платформ. Отримані результати створюють основу для практичного використання та масштабування системи.

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі виконано розроблення цифрового компаса на базі мікроконтролера ESP8266, що забезпечує точне визначення азимуту за допомогою магнітометричного датчика HMC5883L із можливістю виведення даних на OLED-дисплей і через Wi-Fi. Робота охопила аналіз предметної області, проектування, реалізацію та тестування системи, досягнувши поставленої мети та виконавши всі завдання.

На етапі аналізу предметної області вивчено існуючі рішення цифрових компасів, такі як модулі на базі HMC5883L і QMC5883L, що дозволило обґрунтувати вибір компонентів. Аналіз можливостей ESP8266 підтвердив його придатність завдяки вбудованому Wi-Fi, підтримці I2C і низькій вартості. Вивчення магнітометричних датчиків показало, що HMC5883L забезпечує оптимальний баланс між точністю та доступністю. Визначено функціональні вимоги (визначення азимуту, передача даних) і нефункціональні (точність  $\pm 5^\circ$ , енергоефективність), а порівняння альтернативних платформ (Arduino Uno, STM32F103, ESP32) підкреслило переваги ESP8266 для даного проекту.

Проектування системи включало вибір апаратних компонентів (NodeMCU, HMC5883L, OLED-дисплей, акумулятор із TP4056), що забезпечило компактність і економічну ефективність. Розроблено схему підключення з використанням I2C, яка мінімізує перешкоди та забезпечує стабільний зв'язок. Алгоритм обробки даних магнітометра, заснований на калібруванні, фільтрації ковзним середнім і обчисленні азимуту через  $\text{atan2}$ , гарантує точність вимірювань. Модульна структура програмного забезпечення, реалізована в Arduino IDE, підтримує ініціалізацію, обробку даних, виведення результатів і Wi-Fi-передачу, що робить систему гнучкою для масштабування.

Реалізація та тестування підтвердили працездатність компаса. Налаштування середовища розробки забезпечило стабільну платформу для програмування. Логіка роботи, інтеграція апаратної та програмної частин і тестування продемонстрували середню похибку  $\pm 3^\circ$  у лабораторних умовах і  $\pm 4.5^\circ$  у реальних, що відповідає

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк. 58
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		

вимогам. Стабільність системи (стандартне відхилення до 2°) і надійність Wi-Fi-передачі (втрата до 5% пакетів) підтвердили її практичну придатність. Аналіз результатів виявив обмеження, такі як чутливість до магнітних перешкод, які були частково усунуті шляхом автоматичного калібрування та оптимізації енергоспоживання до 75 мА, що забезпечує 14 годин автономної роботи.

Наукова новизна роботи полягає у створенні економічно ефективного цифрового компаса з оптимізованим алгоритмом обробки даних і підтримкою IoT-функціональності, що забезпечує високу точність за обмежених ресурсів. Практична цінність полягає в можливості використання компаса в навчальних цілях, робототехніці та портативних пристроях, а також у його адаптивності для інтеграції з хмарними платформами. Перспективи подальшого розвитку включають додавання акселерометра для компенсації нахилу, використання сучасніших датчиків (наприклад, BMM150) і розробку мобільного додатка для зручного керування.

Розроблений цифровий компас є повноцінним рішенням, яке відповідає сучасним вимогам до навігаційних систем, демонструючи успішне поєднання апаратних і програмних компонентів для створення доступного та функціонального пристрою.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. macsbug. Digital Compass HMC5883L with ESP8266, URL: <https://macsbug.wordpress.com/2016/11/13/digital-compass-hmc5883l-with-esp8266/> (дата звернення 02.04.2025)
2. ElectroPeak. How to Use GY511 Module With Arduino [Make a Digital Compass], URL: <https://www.instructables.com/How-to-Use-GY511-Module-With-Arduino-Make-a-Digital-Compass/> (дата звернення 02.04.2025)
3. ESP32 PinOut – which pin is for what, URL: <https://myhomethings.eu/en/esp32-pinout-which-pin-is-for-what/> (дата звернення 02.04.2025)
4. PCBWay. Module for Digital Compass for Arduino, URL: [https://www.pcbway.com/project/shareproject/Module\\_for\\_Digital\\_Compass\\_for\\_Arduino.html](https://www.pcbway.com/project/shareproject/Module_for_Digital_Compass_for_Arduino.html) (дата звернення 18.03.2025)
5. G6EJD. ESP-GPS-Compass, URL: <https://github.com/G6EJD/ESP-GPS-Compass> (дата звернення 05.04.2025)
6. how2electronics. Digital Compass using HMC5883L Magnetometer & Arduino, URL: <https://how2electronics.com/digital-compass-with-hmc5883l-magnetometer-arduino/> (дата звернення 10.04.2025)
7. HMC5883L 3-Axis Compass Module Interfacing with Arduino, URL: <https://microcontrollerslab.com/hmc5883l-3-axis-magnetometer-interfacing-arduino/> (дата звернення 05.04.2025)
8. Технобанк. TP4056 MicroUSB TP4056 модуль зарядки з захистом Li-ion/Po, URL: <https://tehnobank.com.ua/ua/p1253592887-microusb-tp4056-modul.html> (дата звернення 10.04.2025)
9. JarutEx. [EN] Digital Compass Sensor, URL: <https://www.jarutex.com/2021/10/06/6687/> (дата звернення 18.03.2025)
10. Adafruit. Overview | Adafruit HMC5883L Breakout - Triple-Axis Magnetometer Compass Sensor | Adafruit Learning System, URL: <https://learn.adafruit.com/hmc5883l-breakout-overview>

<https://learn.adafruit.com/adafruit-hmc5883l-breakout-triple-axis-magnetometer-compass-sensor/overview> (дата звернення 15.04.2025)

11. NCD Store. HMC5883 3-Axis Digital Compass 12-Bit I2C Mini Module, URL: <https://store.ncd.io/product/hmc5883-3-axis-digital-compass-12-bit-i2c-mini-module/> (дата звернення 15.04.2025)

12. nanoFramework. HMC5883L - 3 Axis Digital Compass | .NET nanoFramework Documentation, URL: <https://docs.nanoframework.net/devicesdetails/Hmc5883l/README.html> (дата звернення 22.03.2025)

13. arduino.ua. Цифровий компас QMC5883L I2C GY-273, URL: <https://arduino.ua/prod2692-cifrovoi-kompas-qmc5883l-i2c-gy-273> (дата звернення 22.03.2025)

14. IT Master. Мікроконтролер ESP8266 — IT Master - електроніка та програмування, URL: <https://itmaster.biz.ua/directory/microcontrollers/esp8266.html>, (дата звернення 06.04.2025)

15. MDPI. Performance Assessment of ESP8266 Wireless Mesh Networks, URL: <https://www.mdpi.com/2078-2489/13/5/210> (дата звернення 26.03.2025)

16. Botland. BMM150 3-Axis Magnetometer Sensor, URL: <https://botland.store/magnetometers/23399-bmm150-3-axis-magnetometer-sensor-i2cspi-waveshare-24657.html> (дата звернення 06.04.2025)

17. AtRADIO. Триосьовий датчик магнітного поля GY-271, URL: <https://a-radio.com.ua/tryosovyi-datchyk-mahnitnoho-polia-gy-271-qmc5883l/> (дата звернення 06.04.2025)

18. Science.lpnu.ua. Development of Digital Compass Based on AVR Microcontroller and MEMS Accelerometer- Magnetometer Module LSM303DLHC, URL: <https://science.lpnu.ua/cds/all-volumes-and-issues/volume-1-number-1-2019/development-digital-compass-based-avr> (дата звернення 15.04.2025)

19. IEEE Xplore. Design and realization of digital compass with magnetometers, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4594121>, вільний .

20. Wikipedia. ESP8266 URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/ESP8266>, (дата звернення 02.03.2025)

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		

21. DiyLab. Wi-Fi модуль ESP8266 ESP-12E, URL: <https://diylab.com.ua/p267810004-modul-esp8266-esp.html> (дата звернення 15.04.2025)
22. Prom.ua. Модулі ESP8266, URL: <https://prom.ua/ua/Modul-esp8266.html> (дата звернення 02.03.2025)
23. uAmper. Магнітний компас HMC5883L, URL: [https://uamper.com/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D1%96%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B0%D1%81-HMC5883L-\(GY-271\)](https://uamper.com/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D1%96%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B0%D1%81-HMC5883L-(GY-271)) (дата звернення 10.04.2025)
24. DOU. ESPHome. Матеріали українською, URL: <https://dou.ua/forums/topic/46710/> (дата звернення 06.04.2025)
25. Іваненко О. О. Розробка цифрового компаса для IoT-платформи NodeMCU. II Всеукраїнська наук.-практ. конф. *Інтелектуальні інформаційні технології*, м. Київ, 2024 : тези доп. Київ, 2024. С. 45–47.
26. Козаченко А. І. Застосування ESP8266 у системах бездротового моніторингу. VI Міжнародна наук.-техн. конф. *Перспективи розвитку інформаційних технологій*, м. Львів, 2024 : матеріали конф. Львів, 2024. С. 78–81.
27. RCS Components. esp8266 купити - РКС Компоненти – РАДІОМАГ, URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/search?q=esp8266>, (дата звернення 15.04.2025).
28. Drukarnia. ESP8266 - ключ до будь-якого роутера, URL: <https://drukarnia.com.ua/articles/esp8266-klyuch-do-bud-yakogo-routera-rXj2D>, (дата звернення 30.03.2025)
29. Jeong J. S. Advanced Digital Compass: Principles and Applications. *Electronics*. 2022. Vol. 11(8). Article 1289.
30. Arduino Forum. How to Calibrate HMC5883L for Better Accuracy URL: <https://forum.arduino.cc/t/how-to-calibrate-hmc5883l-for-better-accuracy/> (дата звернення: 30.03.2025).
31. Kim Y., Lee K. *High Accuracy Electronic Compass for Mobile Devices. Sensors*. 2022. Vol. 22(12). P. 4562.

32. Li P., Wang Y. *Real-Time Attitude Estimation Using Low-Cost Magnetometers. IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21(16). P. 18012–18019.
33. Wikipedia. Magnetometer, URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetometer> (дата звернення 26.03.2025)
34. Gupta H., Arora V. Smart IoT Compass Using NodeMCU and HMC5883L. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2023. Vol. 12(2). P. 104–108.
35. Rozetka. OLED дисплей 0.96" I2C 128x64, URL: <https://rozetka.com.ua/ua/395164314/p395164314/> (дата звернення 26.03.2025)
36. MDPI. Digital Magnetic Compass Integration with Stationary, Land-Based Electro-Optical Multi-Sensor Surveillance System, URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/19/4331> (дата звернення 19.04.2025)
37. Vasiliev S. Algorithms for Processing Data from Magnetometers. *Control Systems and Technologies*. 2021. Vol. 23(2). P. 34–40.
38. Tatarinov V. P., Krasilov K. V. Digital compass calibration methods. *Journal of Sensors and Sensor Systems*. 2021. Vol. 10. P. 45–52.
39. ResearchGate. How to make attitude determination using a digital compass, URL: [https://www.researchgate.net/post/How\\_to\\_make\\_attitude\\_determination\\_using\\_a\\_digital\\_compass2](https://www.researchgate.net/post/How_to_make_attitude_determination_using_a_digital_compass2) (дата звернення 14.03.2025)
40. Черненко В. С. Аналіз впливу магнітних перешкод на точність вимірювань компаса. V Міжнародна наук.-практ. конф. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, м. Хмельницький, 2024 : матеріали конф. Хмельницький, 2024. С. 62–65.
41. Waveshare. BMM150 3-axis Magnetometer Sensor, Digital Compass Sensor, URL: <https://www.waveshare.com/bmm150-3-axis-magnetometer-sensor.htm> (дата звернення 10.04.2025)
42. Khalil I., Li F. IoT-Based Navigation System Using Digital Compass and Wi-Fi Module. *International Journal of Smart Sensor and Ad Hoc Network*. 2022. Vol. 12(1). P. 1–6.

43. Huang W., Guo X. An Improved Method for Magnetometer Calibration Using Ellipsoid Fitting. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022. Vol. 71. Article 1500409.
44. Shilpa B., Siddappa M. Microcontroller based Digital Compass for Navigation Purpose. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2020. Vol. 7, Iss. 7. P. 252–255.
45. Lee Y., Lee S. Development of a Real-Time Digital Compass for a Small Autonomous Robot. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 17. P. 4927.
46. Singh A., Mishra M. Design and Implementation of IoT Based Monitoring System Using ESP8266. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*. 2021. Vol. 9, Iss. 5. P. 25–30.
47. Ullah M. A., Rahman M. T., Azad A. K., Kabir H. Performance Evaluation of ESP8266 based Wireless Sensor Network for IoT Applications. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 145031–145042.
48. Du L., Jiang X. IoT Compass: A Smart Compass Based on MEMS Sensors and ESP8266. *International Conference on Computer and Communication Technologies*. Springer, 2019. P. 310–318.
49. Raza S., Hussain M., Naqvi I. H. Implementation of Smart Digital Compass System Using MEMS Sensors. *International Journal of Computer Applications*. 2021. Vol. 174, No. 18. P. 28–33.
50. Chen Y., Liang H. Research on an Intelligent Digital Compass System Based on Single-Chip Microcomputer. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1848. P. 012042.
51. Rafique S., Iqbal M., Zubair M., Khan W. IoT Enabled Wireless Sensor Network for Smart Agriculture Using ESP8266. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2021. Vol. 12, No. 5. P. 338–345.
52. Mohapatra A., Panda G., Kumar D. MEMS-Based Low Cost Digital Compass for Indoor Navigation. *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*. 2021. Vol. 11, No. 2. P. 186–192.

53. Das A., Roy A., De D. Design and Development of IoT-Based Real-Time Environmental Monitoring System Using ESP8266. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2020. Vol. 9, Iss. 5. P. 2930–2935.

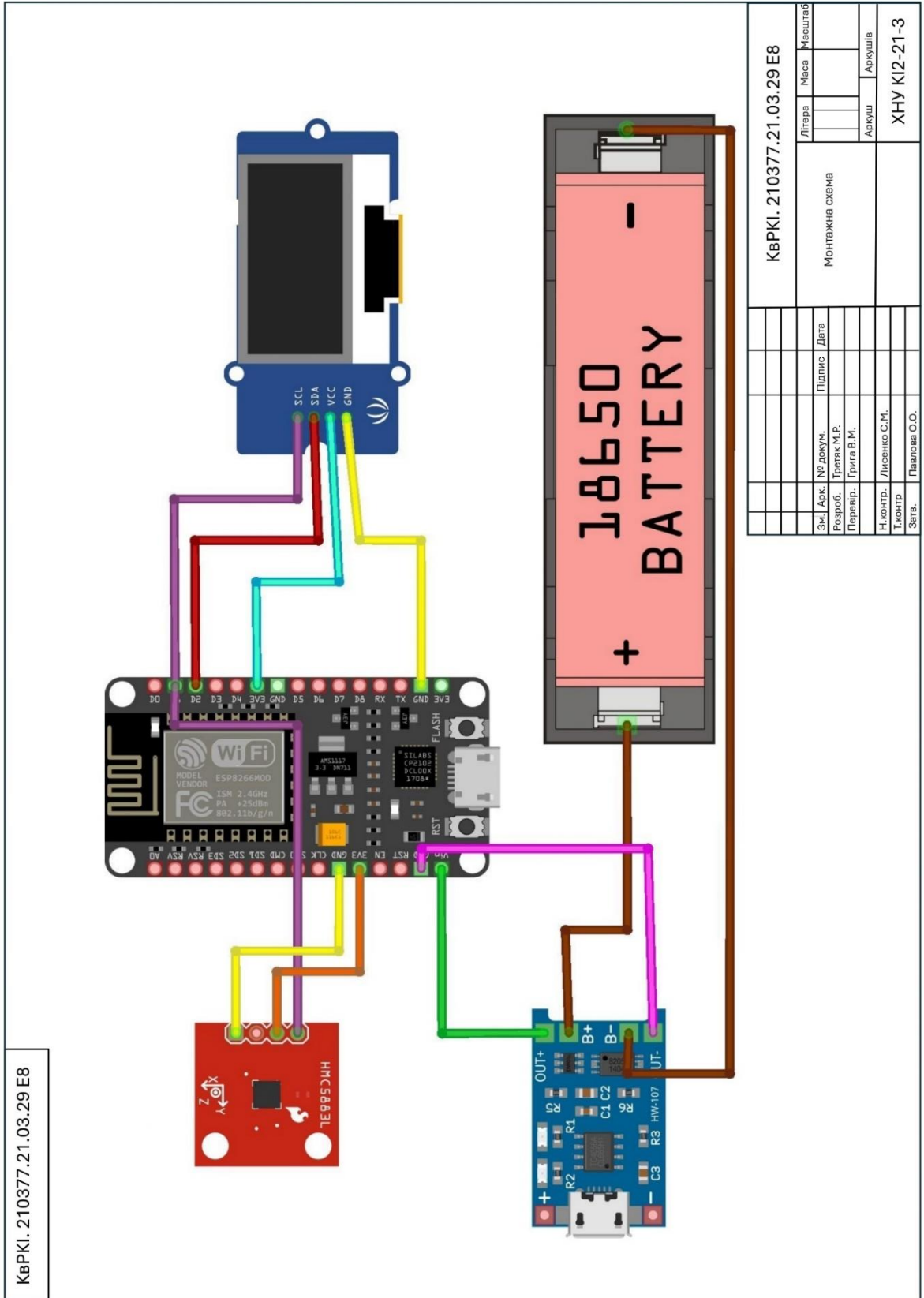
54. Zhang Y., Li K., Wang Q. Research and Implementation of a Digital Magnetic Compass with Auto-Calibration. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2021. Vol. 2021. P. 1–8.

55. Amin M., Islam M., Hossain M. Internet of Things Based Automated Real-Time Weather Monitoring System Using ESP8266. *International Journal of Computer Science and Information Security*. 2020. Vol. 18, No. 4. P. 22–27.

					КВРКІ. 210377.21.03.29 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№локум.	Підпис	Дата		65

**Додаток А**  
(обов'язковий)

**КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «МОНТАЖНА СХЕМА»**

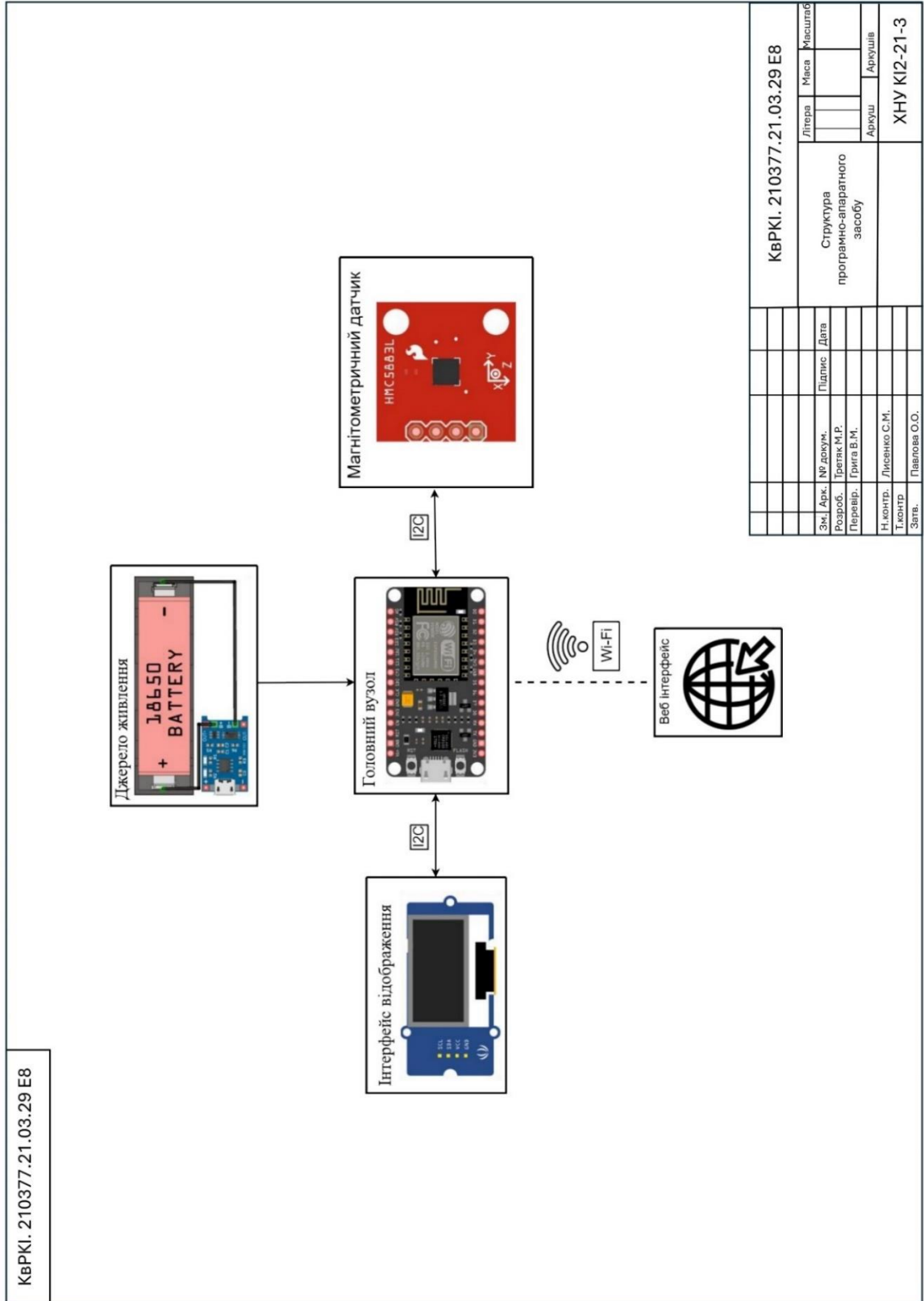


КвРКІ. 210377.21.03.29 Е8

КвРКІ. 210377.21.03.29 Е8		Літера	Маса	Масштаб
Монтажна схема		Підпис	Дата	
Зм. Арк.	№ доум.	Розроб.	Третак М.Р.	
		Перевір.	Грига В.М.	
Н.контр.	Ліцензії С.М.	Т.контр.	Павлова О.О.	
		Затв.		
		Арчуш	Аркуші	ХНУ КІ2-21-3

**Додаток Б**  
(обов'язковий)

**КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «СТРУКТУРА ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО ЗАСОБУ»**

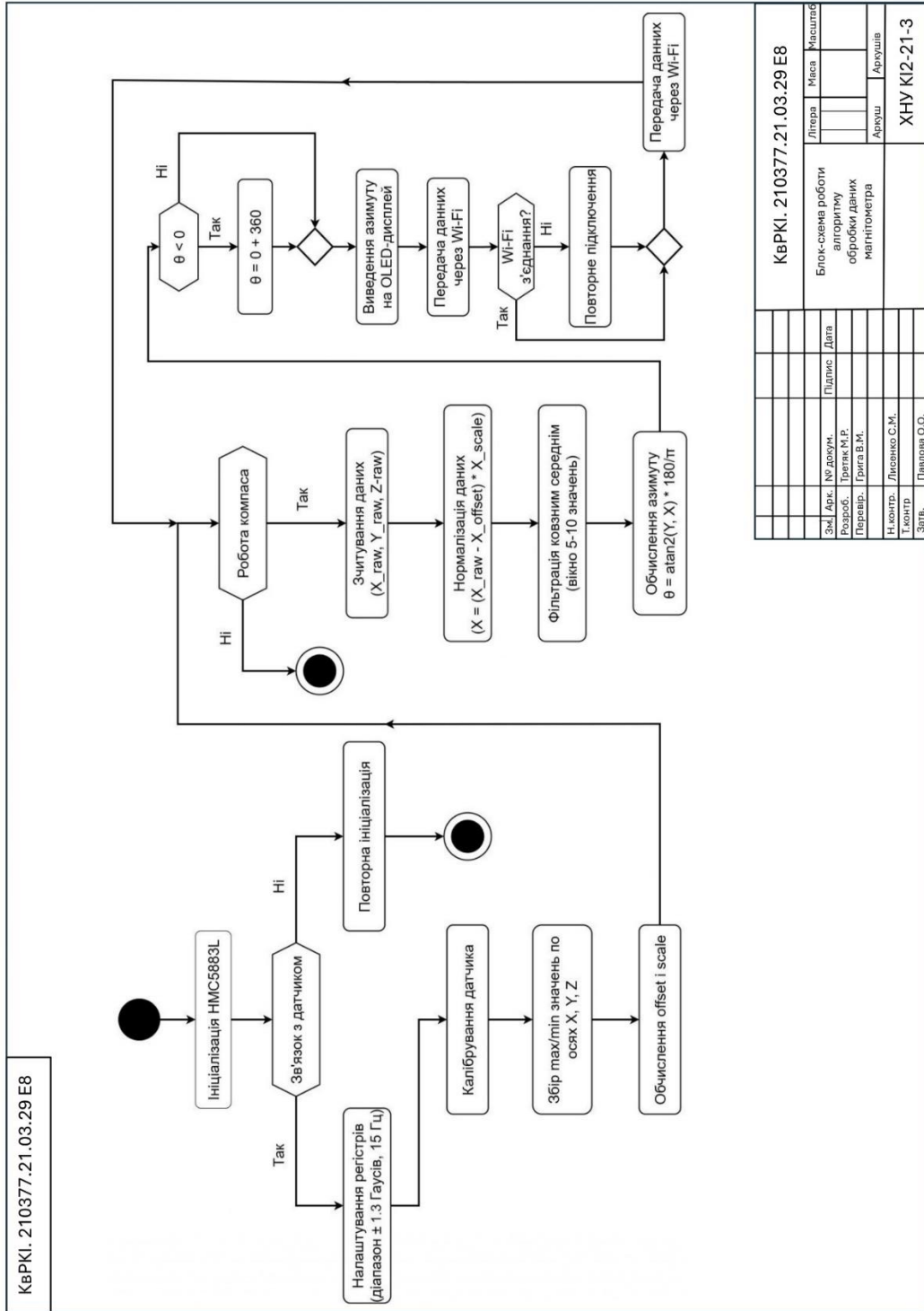


КвРКІ. 210377.21.03.29 Е8

КвРКІ. 210377.21.03.29 Е8			
Літера	Місяц	Масштаб	
Структура програмно-апаратного засобу			
Зм. Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Третяк М.Р.		
Перевір.	Грига В.М.		
Н.контр.	Лисенко С.М.		
Т.контр.			
Затв.	Павлова О.О.		
			ХНУ КІ2-21-3

## Додаток В (обов'язковий)

### КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «БЛОК-СХЕМА РОБОТИ АЛГОРИТМУ ОБРОБКИ ДАНИХ МАГНІТОМЕТРА»



## 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:** Максим ТРЕТЯК

**Співавтор:**

**Назва:** Третяк\_Розроблення цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266

**Експерт:**

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

**Коефіцієнт подібності 1:** 1.2%

**Коефіцієнт подібності 2:** 0%

**Мікропробіли:** 6

**Заміна букв:** 1

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 0

**Дата створення звіту:** 2025-06-18 21:42:30.0

**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:**

2025-06-19

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

**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: 13%**

ID: 246824 Title: БКР Розроблення цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266 Added in a DB: 2025-06-18 Authors: Максим ТРЕТЯК Heads: Володимир ГРИГА Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	93308	757	1287 (1%)	23 (3%)

## Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

## РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Максим ТРЕТЯК

Тема: Розроблення цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 59

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Було розроблено компас на базі мікроконтролера ESP8266, який забезпечує точне визначення азимуту за допомогою магнітометричного датчика з можливістю виведення даних у зручному форматі

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: У першому розділі проведено аналіз предметної області та технічних вимог: розглянуто принцип роботи цифрових компасів, проаналізовано доступні магнітометричні датчики та мікроконтролерні платформи, обґрунтовано вибір компонентів для розробки. У другому розділі виконано проектування цифрового компасу: підібрано апаратні компоненти, розроблено монтажну схему підключення, описано алгоритм обробки даних магнітометра та структуру програмного забезпечення. У третьому розділі реалізовано прототип та проведено тестування: налаштовано середовище розробки, написано програму, інтегровано апаратну й програмну частини, перевірено точність і стабільність роботи системи в різних умовах, виконано оптимізацію.

4. Позитивні сторони роботи: Висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: Було б доцільно доопрацювати розроблену систему шляхом реалізації функції авторизації користувачів для підвищення безпеки доступу до даних компаса.

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 технічному рівні.

8. Інші зауваження: \_\_\_\_\_

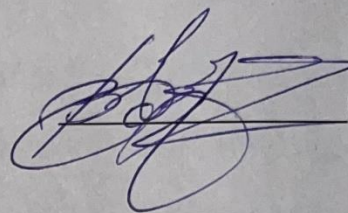
9. Оцінка дипломної роботи: задовільно

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

Чесачук Віктор Миколайович

КАНД. ТЕХН. НАУК, ДОЦ, ДОЦЕНТ КАФЕДРИ КІБЕРБЕЗПЕКИ

"19" \_\_\_\_\_ 06 \_\_\_\_\_ 2025 р.

 (підпис)

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

Максима ТРЕТЯКА

---

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-21-3

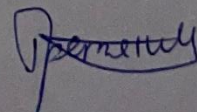
### ЗАЯВА

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.

17.06 2025 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА  
ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Розроблення цифрового компасу на базі мікроконтролера ESP8266

Автор Максим ТРЕТЯК

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Спеціальність 123– Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: Володимир ГРИГА, д.т.н., професор.

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

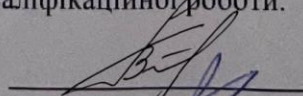
№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	Відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	Не виявлено

Підтвердження:

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

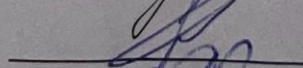
- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
  - 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 1.2% і адресується до 19 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 0%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи



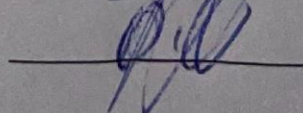
Володимир ГРИГА

Гарант ОП



Андрій НІЧЕПОРУК

Завідувач кафедри КІС



Ольга ПАВЛОВА