

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

**Факультет програмних систем та прикладної математики
Кафедра системного програмування і спеціалізованих
комп'ютерних систем**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Віталій РОМАНКЕВИЧ

«___» _____ 2026 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Системне програмування та спеціалізовані комп'ютерні системи»
спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»
на тему: «Програмно-апаратний комплекс підтримки водія з індикацією
прискорення»**

Виконав:

студент 4 курсу, групи КВ-22

Савельєв Олександр

Керівник:

ст. викладач каф. СПіСКС, д.ф.

Радченко Костянтин Олександрович

Консультант з нормоконтролю:

доц. каф. СПіСКС, к.т.н., доц.

Клятченко Ярослав Михайлович

Рецензент:

ст. викладач каф. обчислювальної техніки ФІОТ, д.ф.

Коренко Дмитро Володимирович

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

Студент _____

Київ – 2026 року

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

ФАКУЛЬТЕТ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ ТА ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ

Кафедра системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Освітньо-професійною програма

**«Системне програмування та спеціалізовані
комп'ютерні системи»**

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис) **Віталій РОМАНКЕВИЧ**

“ ____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студента

Савельєва Олександра Сергійовича

1. Тема проєкту «Програмно-апаратний комплекс підтримки водія з індикацією прискорення», керівник проєкту ст. викладач каф. СПіСКС, д.ф. Радченко Костянтин Олександрович, затверджена наказом по університету від «28» травня 2026 р. № 1984-С
2. Термін подання студентом проєкту _____
3. Вихідні дані до проєкту: див. Технічне завдання
4. Зміст пояснювальної записки:
 - 1) аналіз проблеми ефективного енергоспоживання побутовими приладами;
 - 2) математичне моделювання, аналіз методів прогнозування та вибір технологій;
 - 3) вибір бібліотеки та проектування інформаційної системи;
 - 4) реалізація системи та аналіз отриманих результатів.
5. Перелік графічного матеріалу:
 - 1) схема бази даних системи;
 - 2) загальна схема побудови моделей;
 - 3) алгоритм тренування моделі машинного навчання;
 - 4) алгоритм моніторингу мережі побутових пристроїв.

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Клятченко Я. М., доцент кафедри СПіСКС, к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання «__» _____ 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Вивчення літератури за тематикою роботи	15.11.2025	
2	Розроблення та узгодження технічного завдання	27.11.2025	
3	Аналіз існуючих програм для аналізу енергоспоживання	28.12.2025	
4	Розроблення структури інформаційної системи	05.02.2026	
5	Програмна реалізація системи на основі ML.NET	15.03.2026	
6	Розроблення інтерфейсу користувача у WinForms	20.04.2026	
7	Тестування моделі та функціоналу системи	21.05.2026	
8	Підготовка матеріалів першого розділу дипломного проєкту	25.05.2026	
9	Підготовка матеріалів другого розділу дипломного проєкту	29.05.2026	
10	Підготовка матеріалів третього розділу дипломного проєкту	01.06.2026	
11	Підготовка матеріалів четвертого розділу дипломного проєкту	02.06.2026	
12	Оформлення технічної документації та графічної частини	03.06.2026	
13	Попередній огляд матеріалів дипломної роботи на кафедрі	04.06.2026	

Студент

Олександр САВЕЛЬЄВ

Керівник проєкту

Костянтин РАДЧЕНКО

АНОТАЦІЯ

Бакалаврський дипломний проєкт включає пояснювальну записку (72 сторінок, 20 рис. , 7 табл. , список використаної літератури з 27 найменувань, 3 додатки.

Метою бакалаврського дипломного проєкту є розробка програмно-апаратного комплексу підтримки водія з індикацією прискорення, що забезпечує автоматичне визначення динамічного стану транспортного засобу та світлову індикацію маневрів у режимі реального часу. Система призначена для підвищення безпеки та помітності водіїв двоколісного транспорту в дорожньому потоці.

У процесі роботи було створено апаратну частину на базі мікроконтролера STM32F103C8T6 з підключенням інерційного вимірювального модуля BNO055 та адресної світлодіодної матриці WS2812B, розроблено власну двошарову друковану плату формфактору 45×45 мм та змонтовано робочий прототип. Програмне забезпечення включає прошивку мовою C/C++ без операційної системи реального часу з кооперативним плануванням задач, апаратну емуляцію часозалежного протоколу WS2812B засобами SPI, та скінченний автомат станів.

Система пройшла тестування на стенді та в реальних умовах експлуатації, показавши стабільність та достовірність індикації. Результати підтвердили функціональність комплексу та його економічну доцільність – орієнтовна собівартість прототипу близько 39 доларів США, що у 6-17 менше за функціонально близькі комерційні аналоги.

Таким чином розроблений комплекс поєднує в собі функціональність, економічну ефективність, відкритість архітектури та гнучкість до подальшої модифікації. Що робить його перспективною основою для впровадження у задачах активної безпеки дорожнього руху

Ключові слова : активна безпека, двоколісний транспорт, STM32,BNO055, WS2812B, вбудовані системи, інерційний вимірювальний модуль,

ANNOTATION

The bachelor's thesis project includes an explanatory note (72 pages, 20 figures, 7 tables, a list of used literature from 27 items, 3 appendices.

The purpose of the bachelor's thesis project is to develop a software and hardware complex for driver support with acceleration indication, which provides automatic determination of the dynamic state of the vehicle and light indication of maneuvers in real time. The system is designed to increase the safety and visibility of drivers of two-wheeled vehicles in the traffic flow.

During the work, a hardware part was created based on the STM32F103C8T6 microcontroller with the connection of the BNO055 inertial measurement module and the WS2812B addressable LED matrix, a proprietary two-layer printed circuit board with a form factor of 45×45 mm was developed and a working prototype was assembled. The software includes firmware in the C/C++ language without a real-time operating system with cooperative task planning, hardware emulation of the WS2812B time-dependent protocol using SPI, and a finite state machine.

The system was tested on the bench and in real operating conditions, showing stability and reliability of the indication. The results confirmed the functionality of the complex and its economic feasibility - the estimated cost of the prototype is about 39 US dollars, which is 6-17 times less than functionally similar commercial analogues.

Thus, the developed complex combines functionality, economic efficiency, openness of the architecture and flexibility for further modification. What makes it a promising basis for implementation in active road safety tasks

Keywords: active safety, two-wheeled transport, STM32, BNO055, WS2812B, embedded systems, inertial measurement module,

Поз.	Формат	ПОЗНАЧЕННЯ	НАЙМЕНУВАННЯ	Кількість аркушів	№ прим.	Примітки
	A4	ІАЛЦ.045480.005 Д1	Схема бази даних системи			
			Структурна схема			
	A4	ІАЛЦ.045480.006 Д2	Загальна схема побудови моделей.	1		
			Структурна схема			
	A4	ІАЛЦ.045480.007 Д3	Алгоритм тренування моделі машинного навчання. Блок-схема алгоритму			
	A4	ІАЛЦ.045480.008 Д4	Алгоритм моніторингу мережі побутових пристроїв. Блок-схема алгоритму			
		Диск CD-ROM	Текст пояснювальної записка. Архівований код програми у форматі .zip. Презентація дипломного проєкту. Графічний матеріал			
Змін Арк. № докум. Підпис Дата ІАЛЦ.045480.001 ОА Арк.						

ЗМІСТ

1	НАЙМЕНУВАННЯ ТА ГАЛУЗЬ РОЗРОБКИ	2
2	ПІДСТАВА ДЛЯ РОЗРОБКИ.....	2
3	МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ.....	2
4	ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ	2
5	ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ	3
5.1	Вимоги до програмного продукту, що розробляється:.....	3
5.2	Вимоги до апаратного продукту, що розробляється:	3
6	ЕТАПИ РОЗРОБКИ.....	4

					ІАЛЦ.045480.002 ТЗ			
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата				
Розроб.		Савельєв О.С			Програмно-апаратний комплекс підтримки водія з індикацією прискорення Технічне завдання	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.		Радченко К.О.						4
						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФПСІМ, КВ-22		
Н. контр.		Клятченко Я. М.						
Зав. Каф.		Романкевич В. О.						

1 НАЙМЕНУВАННЯ ТА ГАЛУЗЬ РОЗРОБКИ

Назва розробки: «Програмно-апаратний комплекс підтримки водія з індикацією прискорення».

Галузь застосування: Підвищення безпеки та зменшення ймовірності потрапляння в дорожньо-транспортну пригоду водіями малопомітних в дорожньому трафіку транспортних засобів

ПІДСТАВА ДЛЯ РОЗРОБКИ

Підставою для розробки є завдання на дипломне проєктування на здобуття першого (Бакалаврського) рівня вищої освіти, затверджене кафедрою системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

3 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ

Метою даного проєкту є створення недорогого підвищення безпеки водія мотоцикла та інших учасників дорожнього руху шляхом розробки програмно-апаратного комплексу, що забезпечує візуальну індикацію динамічного стану транспортного засобу (прискорень, гальмування, маневрів повороту та кренів) на світлодіодній матриці, розташованій на спині водія.

4 ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

Джерелом інформації є технічна та науково-технічна література. Статутні документи ООН та ЄС. Документація до електронних компонентів та мікросхем. Документація середовища розробки STM CUBE IDE.

					ІАЛЦ.045480.002 ТЗ	Арк.
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		2

5 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

5.1 Вимоги до програмного продукту, що розробляється:

- Забезпечення індикації дій водія
- Відповідати стандартам законодавчих документів щодо засобів комунікації між водіями
- Автоматична індикація прискорень та сповільнень
- Автоматична індикація зміни напрямку руху

5.2 Вимоги до апаратного продукту, що розробляється::

- Мікроконтролер STM32F103
- Сенсор гіроскоп-акселерометр-магнетометр BNO055
- Живлення від USB DCP

					ІАЛЦ.045480.002 ТЗ	Арк.
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		3

6 ЕТАПИ РОЗРОБКИ

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів
1	Вивчення літератури за тематикою роботи	10.11.2025
2	Розроблення та узгодження технічного завдання	27.11.2025
3	Аналіз існуючих рішень для підтримки водія та підвищення активної безпеки	28.12.2025
4	Розроблення структури інформаційної системи	05.02.2026
5	Розроблення та трасування друкованої плати керуючого модуля	9.04.2026
6	Розроблення прошивки мікроконтролера STM32 та драйвера світлодіодної матриці	7.05.2026
7	Тестування моделі та функціоналу системи	21.05.2026
8	Підготовка матеріалів першого розділу дипломного проекту	21.05.2026
9	Підготовка матеріалів другого розділу дипломного проекту	24.05.2026
10	Підготовка матеріалів третього розділу дипломного проекту	30.06.2026
11	Підготовка матеріалів четвертого розділу дипломного проекту	31.05.2026
12	Оформлення технічної документації та графічної частини	03.06.2026
13	Попередній огляд матеріалів дипломної роботи на кафедрі	04.06.2026

Поз.	Формат	ПОЗНАЧЕННЯ	НАЙМЕНУВАННЯ	Кількіс ть	№	Примітки
	A4	ІАЛЦ.045480.004 ПЗ	Програмно-апаратний комплекс підтримки водія зі індикацією прискорення			
			Пояснювальна записка			
	A4	ІАЛЦ.045480.005 Д1	Схема бази даних системи Структурна схема			
	A4	ІАЛЦ.045480.006 Д2	Загальна схема побудови моделей. Структурна схема	1		
	A4	ІАЛЦ.045480.007 Д3	Алгоритм тренування моделі машинного навчання Блок-схема алгоритму			
	A4	ІАЛЦ.045480.008 Д4	Алгоритм моніторингу мережі побутових пристроїв. Блок-схема алгоритму			
		Диск CD-ROM	Текст пояснювальної з Графічний матеріал			
			ІАЛЦ.045480.003 ТП			
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		
Розробив	Савельєв О.С.				Літ.	
Перевірив	Радченко К.О.				Аркуш	
Консуьлт.					Аркушів	
Н. контроль	Клятченко Я.М.					
Зав. каф.	Романкевич В.О.				КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФПСПМ KB-22	
					Програмно-апаратний комплекс підтримки водія з і н	

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Програмно-апаратний комплекс підтримки водія з індикацією
прискорення»

Київ – 2026

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	2
ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ	5

Н	
М	
Висновки по розділу	15
Е	
Р	Н
Н	У
В	Р
В	Е
Висновки по розділу	15
3. ПРОГРАМНО АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ПІДТРИМКИ ВОДІЯ З ІНДИКАЦІЄЮ ПРИСКОРЕННЯ	38
3.1 Архітектура програмно апаратного комплексу	39
3.2 Апаратна частина – керуючий модуль	43
3.3 Програмне забезпечення STM32	54
Висновки до розділу	59
4	\
4.1 Демонстрація працездатності комплексу	61
4.2 Функціональні можливості та режими роботи комплексу	63
4.3 Оцінка собівартості та економічна доцільність	64
4.4 Можливості модернізації	66
Висновки до розділу	59
ВИСНОВКИ.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70
ДОДАТКИ.....	74

					ІАЛЦ.045480.004 ПЗ		
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Програмно-апаратний комплекс підтримки водія з інди- кацією прискорення Пояснювальня записка		
Розробив	Савельєв О.С						
Перевірив	Радченко К.О.						
Консульт.							
Н. контроль	Клятченко Я. М.						
Зав. каф.	Романкевич В.О.				Літ. Аркуш Аркушів 1 72 КПІ Ім. Ігоря Сікорського, ФПСІМ КВ-22		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

КМДА – Київська міська державна адміністрація

LBFTS (англ. looked-but-failed-to-see) – ДПТ з типовою проблемою - дивився, але не побачив

ТЗ – Транспортний засіб

MEMS (англ. Micro-Electro-Mechanical Systems) – мікроелектромеханічні системи; технологія виготовлення мініатюрних механічних структур інтегрованих з електронікою на одному кристалі.

IMU (англ. Inertial Measurement Unit) – інерціальний вимірювальний модуль; пристрій, що поєднує акселерометр, гіроскоп та (опціонально) магнітометр.

NHTSA (англ. National Highway Traffic Safety Administration) – Національна адміністрація безпеки дорожнього руху США

MAIDS (англ. Motorcycle Accident In-Depth Study) – поглиблене дослідження мотоциклетних пригод у країнах ЄС

MCCS (англ. Motorcycle Crash Causation Study) – дослідження причин мотоциклетних аварій (США)

BLE (англ. Bluetooth Low Energy) – технологія бездротового зв'язку з низьким енергоспоживанням

CAN (англ. Controller Area Network) – послідовна шина для обміну даними у транспортних засобах

I2C (англ. Inter-Integrated Circuit) – послідовний двопровідний інтерфейс обміну даними

SPI (англ. Serial Peripheral Interface) – послідовний синхронний інтерфейс обміну даними

UART (англ. Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) – універсальний асинхронний приймач-передавач

DMA (англ. Direct Memory Access) – прямий доступ до пам'яті

SDA (англ. Serial Data) – лінія передачі даних шини I²C

SCL (англ. Serial Clock) – лінія тактування шини I²C

					ІАЛЦ.045480.004 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

MOSI (англ. Master Out Slave In) – лінія передачі даних від ведучого до підлеглого пристрою (SPI)

MISO (англ. Master In Slave Out) – лінія передачі даних від підлеглого до ведучого пристрою (SPI)

SCK (англ. Serial Clock) – лінія тактового сигналу шини SPI

SS/CS (англ. Slave Select / Chip Select) – лінія вибору підлеглого пристрою (SPI)

TX/RX (англ. Transmit / Receive) – лінії передавання та приймання даних (UART)

NRZ (англ. Non-Return-to-Zero) – кодування, у якому біт визначається тривалістю високого рівня сигналу

GPIO (англ. General-Purpose Input/Output) – лінія введення-виведення загального призначення

RISC (англ. Reduced Instruction Set Computer) – архітектура процесора зі скороченим набором інструкцій

RGB (англ. Red, Green, Blue) – колірна модель «червоний-зелений-синій»

LED (англ. Light-Emitting Diode) – світлодіод

USB (англ. Universal Serial Bus) – універсальна послідовна шина

DCP (англ. Dedicated Charging Port) – спеціалізований порт заряджання за специфікацією USB Battery Charging

LDO (англ. Low-Dropout regulator) – лінійний стабілізатор напруги з малим просіданням

LQFP (англ. Low-profile Quad Flat Package) – тип корпусу мікросхеми з выводами по периметру

LGA (англ. Land Grid Array) – тип корпусу мікросхеми з контактними майданчиками знизу

HAL (англ. Hardware Abstraction Layer) – рівень апаратної абстракції бібліотек STM32

LL (англ. Low Layer) – низькорівнева бібліотека STM32

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

3

SWD (англ. Serial Wire Debug) – інтерфейс програмування та налагодження

SWDIO (англ. Serial Wire Debug Input/Output) – лінія даних інтерфейсу SWD

SWCLK (англ. Serial Wire Clock) – лінія тактування інтерфейсу SWD

FDM (англ. Fused Deposition Modeling) – технологія 3D-друку методом наплавлення

PCB (англ. Printed Circuit Board) – друкована плата

IPC – Асоціація стандартів електронної промисловості (стандарт IPC-2221)

RC – фільтр на основі резистора та конденсатора

					ІАЛЦ.045480.004 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ВСТУП

У сучасних мегаполісах транспортна інфраструктура зазнає значного навантаження внаслідок стрімкого зростання кількості індивідуального автотранспорту. Згідно даних КМДА, лише за період з 2019 по 2022 рік кількість зареєстрованого автотранспорту зросла за 927 тис. до 1,375 млн одиниць [1].

Перевантаження дорожньої мережі та регулярне утворення заторів спричинило зміну транспортних уподобань міського населення на користь малогабаритних транспортних засобів, скутерів, мопедів, електро-велосипедів та електро-самоварів. Додатковим чинником що сприяє збільшенню кількості такого транспорту є активний розвиток сервісів кур'єрської доставки в усіх розвинених країнах.

Зворотнім боком цього процесу є істотне зростання ризиків для життя та здоров'я учасників дорожнього руху. За даними Національної адміністрації безпеки дорожнього руху США за 2023 рік, рівень смертності водіїв двоколісних транспортних засобів у розрахунку на пройдену відстань приблизно в 30 разів перевищує аналогічний показник для водіїв легкових автомобілів [2].

Однією з ключових факторів такої статистики є низька помітність мотоциклів та мопедів на дорозі, та обмежені можливості комунікації водія з іншими учасниками дорожнього руху: штатна світлова сигналізація мотоциклів є компактною і часто погано помітна, а на деяких не класифікованих законодавством транспортних засобах такі як електросамокати електроскутери тощо, такі засоби можуть бути взагалі відсутні.

Існуючі засоби пасивного захисту - знижують тяжкість наслідків ДТП проте ніяк не запобігають її виникненню. Засоби ж активного інформування учасників руху представлені переважно дорогими комерційними рішеннями, з обмеженою функціоналом, закритою архітектурою, та недоступністю в зв'язку з ціною даних засобів або не відповідним формфактором.

Водночас сучасний рівень розвитку мікроконтролерів та інерційних вимірювальних модулів, та світлодіодних стрічок створює передумови для розробки доступних систем підтримки водія з індикацією маневрів

					ІАЛЦ.045480.004 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

1.1 Обґрунтування теми

Підвищений рівень аварійності серед водіїв двоколісного транспорту, зазначений у вступі має конкретні причини встановлені у низці фундаментальних досліджень ДПТ. Аналіз цих причин дозволяє визначити напрями, у яких розробка нових технічних засобів може дати найбільший ефект для зниження ризиків.

Європейське дослідження MAIDS (Motorcycle Accident In-Depth Study), проведене на вибірці з 921 пригоди в п'яти країнах ЄС, підтвердило ці висновки: у 36,6 % усіх досліджених пригод первинним фактором дорожньо-транспортної пригоди було не зауваження мотоцикла водієм іншого транспортного засобу (perception failure). Серед усіх помилок водіїв інших транспортних засобів, що були визнані первинним фактором, понад 70 % становили саме помилки сприйняття – нездатність побачити мотоцикл у транспортному потоці [4].

Сучасне дослідження Motorcycle Crash Causation Study (MCCS), проведене Федеральним управлінням автомобільних шляхів США у 2019 році на вибірці з 351 пригоди в штаті Каліфорнія, повторно зафіксувало цю закономірність: 12 % водіїв інших транспортних засобів у самозвітах вказали, що вони «дивились, але не побачили мотоцикл» (looked but did not see), що в літературі позначається терміном look-but-failed-to-see error [5].

Цей фактор зумовлений об'єктивними геометричними характеристиками, меншими за автомобілі розмірами, меншу площу фронтального та бокового силуету, а також компактними світловими засобами індикації. Отже, подальше зниження аварійності двоколісного транспорту лежить у площині активних засобів - тих, що запобігають пригоді через підвищення помітності та інформативності комунікації водія з іншими учасниками руху.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

6

1.2 Огляд існуючих рішень та приладів для підтримки водія

1.2.1 Cosmo Connected

Cosmo Connected – Французький технологічний бренд, що спеціалізується на розробці пристроїв для підвищення безпеки користувачів двоколісного транспорту та засобів мікро мобільності[6].

Їх пристрій Cosmo Ride надає наступний набір функцій

- Індикація сповільнень за рахунок вбудованого акселерометра
- Безпроводний пульт для керування індикатором
- Чотири режими підсвічування, індикація лівого та правого повороту, зупинок та режим аварійних вогнів
- Відслідковування падінь
- Можливість розповсюджувати свою локацію через застосунок.
- Інтеграція в шоломи від цієї ж компанії
- Можливість кріплення на будь який шолом при умові купівлі спеціального магнітного кріплення



Рис. 1.1 – Комплектація пристрою Cosmo Ride

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

7

Також компанія пропонує рюкзаки Securain Connected, що є рюкзаком компанії Delsey в який вбудований пристрій Cosmo Ride. І вело-шоломи з інтегрованим Cosmo Ride.



Рис. 1.2 – Рюкзак Securain Connected з інтегрованим Cosmo Ride

Конструктивно Cosmo Ride складається з корпусу з пластику ABS з підвищеною стійкістю до зовнішніх умов. В виду закритої архітектури та ПЗ компанія не розголошує на основі якого мікроконтролеру побудовано їх прилад.

З точки зору електроніки, прилад має 96 SMD світлодіодів, по 48 жовтого та червоного кольорів для індикації поворотів, трьохосьовий гіроскоп та трьохосьовий акселерометр для виявлення сповільнень і падінь. Модуль керування живиться від батарейки CR2032 і використовує BLE 4.0 (Bluetooth Low Energy).

Додатково передбачається інтеграція з мобільним телефоном для керування пристроєм і передачі інформації про геолокацію у разі падіння. Живлення індикатора відбувається за допомогою вбудованого літій-іонного акумулятора ємністю в 900мА/год що забезпечує до 8 годин роботи. Зарядка відбувається через USB Type B порт. Зовнішній вигляд приладу зображено на рисунку 1.1

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
8

До переваг пристрою можна віднести:

- Автономність 8 годин, що дозволяє використовувати прилад навіть на ТЗ що не мають електросистеми до якої можна підключись.
- Компактність та мала маса
- Наявність зручного бездротового пульта що можна закріпити на кермі, а також можливість керувати пристроєм з телефону.
- Можливість повідомити про падіння та поділитись геолокацією можливого ДТП.

Недоліки та функціональні обмеження.

- У технічні документації чітко зазначено що Cosmo Ride рекомендується використовувати лише для засобів мікро мобільності, моно-коліс, електро самокатів та велосипедів, скейт-бордів та роликів. Застосування для ТЗ більшої швидкості руху виходить за регламентовані умови експлуатації.[7]
- Відсутність аварійного сигналу гальмування, та відсутність індикації прискорень зменшує користь від приладу як засобу комунікації в дорожніх умовах
- Залежність від архітектури Cosmo , хоч в продажі і наявне магнітне кріплення для інших форматів використання основна інтеграція спрямована на власні продукти компанії: рюкзаки, вело шоломи, жилети.
- Висока ціна для країн середнього та низького рівня статків, базовий прилад коштує 75 євро без урахування податків та мит, а для використання не в екосистемі продуктів Cosmo потрібно докупити кріплення ще за 15 євро.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

9

1.2.2 LIVALL Tech

LIVALL – китайський виробник смарт шоломів, заснований в 2014 році. Що позиціонує себе як перший в світі виробник шоломів з патентованою системою виявлення падінь. Продуктова лінійка компанії включає як велосипедні моделі BH51M, EVO21, BH62 так і новітні мотоциклетні шоломи MC1 та MC1 Pro. На відміну від Cosmo Connected, продукти компанії LIVALL фокусуються на повній інтеграції світлотехніки та електроніки у корпус шоломів, протилежно продуктам які будуються навколо модуля Cosmo Ride



Рис. 1.3 – Смарт шолом LIVALL MC1 Pro

Найбільш релевантним продуктом компанії в контексті даної роботи можна вважати шолом MC1 Pro (Рис 1.3) [8]. Наразі даний шолом є флагманським продуктом компанії та створений з напрацювань та технологій відпрацьованих на велосипедних шоломах. Основний фокус в технічних характеристиках зроблено на мультимедійні функції така як вбудована камера, інтерком для комунікації з іншими мотоциклістами (до 5 учасників), та Hi-Fi динаміки та мікрофон з гасінням шуму вбудовані у шолом.

Великий фокус робить також і на підвищені безпеки водія, шолом пройшов всі необхідні для допуску до доріг загального користування сертифікації, має патентовану систему детекції падінь з функцією повідомлень в пропрієтаний застосунок LIVALL Riding app. Також шолом обланано активними електронними системами безпеки, передніми та задніми блоками світлодіодів, вбудованим гіроскопом та акселерометром для індикації сповільнень, на відміну від велосипедних моделей шолом не має індикаторів поворотів, лише автоматична індикація сповільнень. Живлення електроніки на борту відбувається за рахунок вбудованого акумулятору на 2000 мА/год, що забезпечує автономну роботу 8-10 годин. Зарядка відбувається через пропріє тарний магнітний чотирьох контактний роз'єм

До переваг даного рішення можна віднести: Повну сертифікацію як пасивного засобу безпеки, наявність хорошого мультимедіа функціоналу. Виявлення падінь з поширенням геолокації місця пригоди та автоматичні стоп сигнали що підлаштовуються під умови освітлення

Недоліки включають:

- Високу вагу 1650г, порівняно з іншими шоломами його категорії
- Відсутність показчиків повороту у будь якому виглядію.
- Можливість перекриття світлової секції рюкзаком або плечима водія при спортивній посадці на мотоцикл
- Розташування IMU на шоломі водія, що призводить до фальшивих спрацювань від коливань голови на дорожньому покритті низької якості про що сказано в мануалі[9]
- Дуже високу ціну в 700 доларів США

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
11

1.2.3 InView

inView – це продукт компанії Third Eye Design Inc. (Піттсфорд, штат Нью-Йорк, США), розроблений і виготовлений у США. На відміну від раніше розглянутих рішень, inView реалізує принципово іншу архітектуру активної світлової сигналізації для мотоциклістів: замість самостійного визначення маневрів за даними інерціальних датчиків, система дублює сигнали штатної світлотехніки мотоцикла шляхом прямого підключення до його бортової електропроводки [10].



Рис. 1.4 – Система InView змонтована на мотошолом

Комплекс складається з трьох основних компонентів – передавача, що встановлюється на мотоцикл і підключається в штатну електросистему. Підтримуються мотоцикли з CAN шиною на борті, живлення відбувається від штатної 12 вольової мережі. На шолом кріпиться приймач індикатор – портативний модуль світлодіодами для індикації. Живлення портативного модуля відбувається від двох елементів АА. Останній компонент провідний світлодіодний блок що монтується на задню частину мотоцикла і є провідним подовжувачем передавача.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

12

Пристрій напряду інтегрується в електросистему транспорту і під час руху зчитує данні що до застосування гальм скидання газу та іншу інформацію і відправляє відповідні команди на приймач, що активує необхідну групу світлодіодів. Також в пристрій інтегровано додатковий акселерометр для детекції сповільнень без застосування ручки гальм – пасивного гальмування.

InView – на відміну від двох вище представлених рішень є максимально коректним інженерним продуктом, дублюючи системи транспортного засобу напряду, замість аналізу вимірів MEMS – сенсорів закріплених до водія. Така реалізація повністю виключає фіктивні спрацювання від тряски головою або поганої якості дорожнього покриття. До того ж ця система є універсальною щодо екіпіровки яку вже має людина, немає потреби докуповувати окреме рішення , або купляти весь продукт заради безпекових опцій

Основними перевагами такого рішення є

- Концептуально коректна архітектура – пряма інтеграція в уже наявну світлову систему ТЗ
- Універсальність щодо наявної екіпіровки, кріплення на липучці дозволяє використовувати будь яким захисним одягом
- Передбачуваність роботи – поведінка детермінована і обмежена базовим станом штатної електротехніки та закріпленням до ТЗ акселерометром для визначення пасивного гальмування.

Недоліками рішення є такі фактори:

- Необхідність самостійної інтеграції в електросистему – що може бути складно для людей без таких навичок
- Обмеженість в функціоналі штатною світловою системою, якщо в штатній системі відсутні певні функції перекрити їх даними приладом не вийде
- Необхідність в переустановленні системи при зміні ТЗ
- Відсутність можливості інтеграції в ТЗ які не є мотоциклами з CAN шиною
- Велика ціна в 250-300 доларів США

1.3 Обґрунтування теми дипломного проєкту

Беручи до уваги аналіз наведених систем, можна зробити висновок, що хоча на ринку існує низка пристроїв для підвищення активної безпеки водіїв двоколісного транспорту значна їх частина так чи інакше мають обмеження, або функціональні або архітектурні або фінансові. Дорогі комплексні рішення по типу шолому LIVALL MC1 Pro забезпечують одночасне покриття пасивної та активної безпеки і просунутої системи мультимедіа, проте їм бракує функціоналу у вигляді індикації екстреного гальмування та індикації маневрів, а висока ціна та формат саме мотошолома ще сильніше обмежують кількість людей яких задовольнить таке рішення. А розміщення IMU на голові водія може спричиняти хибну індикацію

Системи такі як InView мають принципово правильне рішення з точки зору архітектури та запобіганню хибній комунікації. Обмежують кількість можливих користувачів необхідністю до фізичної інтеграції в електросистему ТЗ, що унеможливорює встановлення такого засобу на ТЗ без CAN шини або без штатної світлової індикації. Ціна в 300 доларів США хоч і є більш демократичною ніж 700 за шолом LIVALL, все ще є великою сумою для країн з низькими та середніми статками громадян. Cosmo Connect Представляє собою більш доступне рішення покриваючи більшість потреб, проте мають регламентовані обмеження щодо застосування на ТЗ що не відносяться до мікро мобільності, і вимагає додаткових витрат при умові використання за межами екосистеми продуктів компанії.

Обрана тема – «Програмно-апаратний комплекс підтримки водія з індикацією прискорення» – має на меті створення доступного, універсального рішення з оптимальним співвідношенням вартості, функціональності та відкритості архітектури.

Доступна вартість апаратної частини дає змогу використовувати комплекс на різних типах двоколісного транспорту незалежно від наявності штатної CAN-шини, чи вбудованої системи світлової індикації Використання інерціального вимірювального модуля з трьохосьовим акселерометром та гіроскопом,

					ІАЛЦ.045480.004 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

закріпленого безпосередньо на транспортному засобі (а не на шоломі водія), дозволяє точно фіксувати фактичну динаміку руху – сповільнення, прискорення та маневри – без впливу коливань голови водія. Це формує достовірну основу для автоматичної індикації сигналів гальмування та поворотів у режимі реального часу.

Висновки по розділу

Розглянуті системи демонструють значне різноманіття технічних і архітектурних підходів до задачі підвищення активної безпеки водіїв двоколісного транспорту, що підтверджує високу актуальність обраної теми. Вони різняться за принципом визначення маневрів (інерціальні датчики або пряма інтеграція з бортовою електросистемою), за способом монтажу (на шоломі або на транспортному засобі), за вартістю, функціональністю та ступенем відкритості архітектури. Високотехнологічні комерційні системи забезпечують повноцінну сертифікацію та широкий мультимедійний функціонал, однак залишаються недоступними широкому загалу через високу ціну.

Системи прямої інтеграції в бортову мережу є концептуально найбільш коректними, проте обмежені сумісністю лише з певними категоріями транспортних засобів. Водночас рішення на основі автономних інерціальних модулів мають потенціал для універсального застосування, але потребують ретельного підходу до розміщення сенсорів та алгоритмів обробки сигналів для уникнення фальшивих спрацювань.

З огляду на це, розробка доступного програмно-апаратного комплексу активної світлової сигналізації на базі автономного інерціального модуля, закріпленого на транспортному засобі, виглядає як актуальний, технічно обґрунтований проєкт, що має високу прикладну цінність у контексті зниження аварійності серед водіїв двоколісного транспорту та підвищення їх помітності в транспортному потоці.

2 АНАЛІЗ ОБРАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА АПАРАТНИХ РІШЕНЬ

2.1 Мікроконтролер STM32F103C8T6

Мікроконтролер STM32F103C8T6 (рис 2.1), розроблений компанією STMicroelectronics, є одним з найпоширеніших представників серії F1 та використовується як надійна платформа для побудови вбудованих систем реального часу. Він вирізняється збалансованим співвідношенням обчислювальної потужності, енергоспоживання та вартості, широким набором периферійних інтерфейсів, а також відкритою екосистемою розробки. Саме ці характеристики роблять його привабливим для проєктування недорогих, але водночас функціональних апаратних рішень – від промислової автоматики до пристроїв активної безпеки транспортних засобів [11].



Рис. 2.1 – Мікроконтролер STM32f103C8T6

Даний мікроконтролер побудований на основі 32-бітного RISC-ядра Arm® Cortex®-M3, що може працювати на тактовій частоті до 72 МГц, забезпечуючи високу швидкість обробки даних у режимі реального часу. Така обчислювальна потужність дає змогу одночасно опитувати декілька зовнішніх периферійних модулів, виконувати математичну обробку отриманих сигналів та формувати керуючі сигнали для виконавчих пристроїв. Ядро мікроконтролера підключено до двох внутрішніх тактових шин, що об'єднують високошвидкісні модулі пам'яті з удосконаленими периферійними інтерфейсами, завдяки чому

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

16

мікроконтролер демонструє стабільну поведінку навіть під час обслуговування декількох потоків даних та переривань [11]

Однією з ключових переваг STM32F103C8T6 є наявність вбудованої Flash-пам'яті обсягом 64 КБ та ОЗП обсягом 20 КБ. Цього обсягу достатньо для розміщення прошивки що містить в собі необхідні драйвери сенсорів, алгоритми цифрової фільтрації сигналів та логіку керування виконавчими пристроями, без необхідності у зовнішніх мікросхемах пам'яті. Така інтеграція спрощує топологію друкованої плати, знижує її собівартість та підвищує надійність систем.

Модуль має широкий набір периферійних інтерфейсів. Мікросхему виконано в корпусі LQFP-48 із 37 лініями ведення-виведення загального призначення та апаратною підтримкою стандартних комунікаційних інтерфейсів CAN, I2C, SPI, USART та USB. Багато форматна підтримка інтерфейсів дає змогу обирати спосіб обміну даними під кожну окрему задачу. [12]

Суттєвою архітектурною особливістю над іншими мікроконтролерами бюджетного сегменту є наявність 7 каналного контролера прямого доступу до пам'яті (DMA), що керує операціями периферії - таймерів, АЦП, SPI, I2C, USART, без участі процесорного ядра. Завдяки цьому воно звільняється від рутинних операцій перекладання даних між регістрами периферії та ОЗП, що дає змогу одночасно виконувати складні обчислення без втрати швидкодії обміну даними з зовнішніми пристроями.[11]

Ще одним значущим фактором є енергоефективність та широкий діапазон умов експлуатації. Мікроконтролер живиться від напруги 2-3,6 вольт, працює в широкому температурному режимі від -40 до +85 °C. Та має комплексний набір енергозберігаючих режимів, що дозволяє проектувати як стаціонарні пристрої з постійним живленням, так і автономні рішення з акумуляторним джерелом.

Для роботи з STM32F103C8T6 доступний широкий набір інструментів та середовищ розробки, серед яких офіційне інтегроване середовище STM32CubeIDE від STMicroelectronics із вбудованим графічним конфігуратором

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

17

периферії STMCubeMX, а також комерційні рішення по типу Keil μ Vision та IAR Embedded Workbench.[13]

Підсумовуючи вищезазначене, можна стверджувати, що STM32F103C8T6 є оптимальним вибором для створення недорогих надійних та функціональних вбудованих систем реального часу. Його технічні характеристики – продуктивне 32 бітне ядро, достатній обсяг вбудованої пам'яті, широкий набір інтерфейсів та наявність контролера прямого доступу до пам'яті, повністю відповідають вимогам сучасних рішень для обробки даних в реальному часі.

2.1.1 Протокол I²C

Послідовний інтерфейс I2C є одним з найпоширеніших стандартів обміну даними між мікроконтролером та зовнішніми периферійними мікросхемами. Фізично шина побудована на двох двонапрямлених лініях [14] Serial Data (SDA) – лінія передачі даних, та Serial Clock (SCL) лінія тактування що формується ведучим пристроєм. Обидві лінії побудовані за схемою відкритого стоку транзистора, пристрої на шині можуть лише притягувати лінії до землі приводячи лінію в низький стан, і не може активно задавати високий логічний рівень. Високий рівень на лінії забезпечуються резисторами підтяжки, номінал яких зазвичай обирається у діапазоні 1-10 кОм залежно від довжини шини відповідно і погонної ємності, а також швидкості комунікації по ній.[14]

Кожна підлегла мікросхема зазвичай має 7 бітну адресу, за допомогою якої ведуча мікросхема вибирає з яким саме компонентом буде відбуватись комунікація. Це дає теоретичну можливість підключити до 127 окремих мікросхем на одну шину без додаткових сигнальних провідників вибору що сильно спрощує розробку особливо у разі низької кількості ліній ведення виведення.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

18

На практиці майже неможливо розмістити таку велику кількість мікросхем на одній шині, причинами цього являються паразитна ємність контактів мікросхем з відкритим стоком що підключені до шини, при встановленні великої кількості підлеглих мікросхем сумарна паразитна ємність буде заважати комунікаціям по шині, другою причиною чому встановлення всіх 127 мікросхем майже неможливе це конфлікти адрес, так більшість мікросхем мають опцію заміни адреси, але найчастіше ця опція використовується для встановлення двох однакових мікросхем на одну шину та зміною адреси на 1 молодший біт задля розрізнення їх між собою.

Обмін даними по шині відбувається у формі повідомлень, що складаються з кадрів початку та кінця передачі, кадру адреси, біта запису або читання, кадру даних та біту підтвердження. Після кадру старту ведуча мікросхема формує на лінії 7 бітну адресу підлеглої з якою вона збирається працювати і доповнює кадр бітом читання/запису, на що підлегла мікросхема має відповісти бітом підтвердження під час 9го тактового імпульсу, після чого комунікація відбувається кадрами по 8 біт кожен з яких супроводжується бітом підтвердження.[15]

Специфікація I2C, передбачає декілька стандартних швидкісних режимів:

- Standard-mode зі швидкістю до 100 кбіт/с
- Fast-mode з швидкістю до 400 кбіт/с
- Fast-mode Plus що дозволяє розвинути швидкість передачі до 1 мбіт/с
- High-speed mode до 3.4 Мбіт/с

Суттєвою перевагою даного протоколу для вбудованих систем яка зумовлює його популярність це низька кількість сигнальних ліній, адресація на рівні протоколу, і висока надійність передачі за рахунок підтвердження передачі кадрів. Дані фактори стали вирішальними під час розробки даного проєкту і вибору шини для спілкування.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

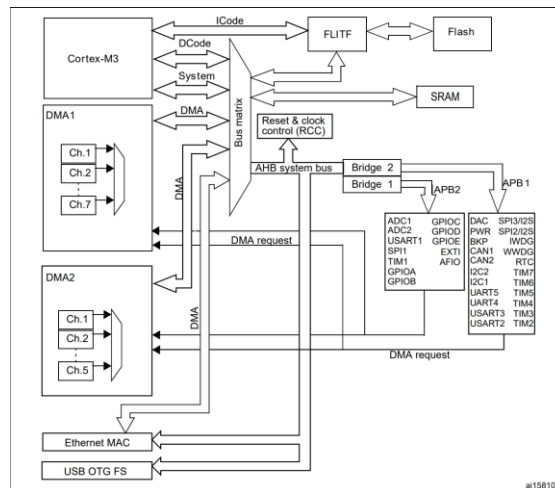
19

2.1.2 Контролер прямого доступу до пам'яті

DMA(Direct Memory access) є однією з ключових архітектурних особливостей ядра Cortex®-M3. Що дозволяє організувати обмін даними між периферійними пристроями не займаючи процесорний час ядра. Звільнення ядра від рутинних операцій пересилання даних є особливо важливим у вбудованих системах реального часу.

Згідно з офіційними документами STMicroelectronics [16] обраний для дипломного проєкту мікроконтролер мають на борту 1 контролер DMA1 з 7 незалежними каналами, кожен з каналів може бути конфігурований на обслуговування запитів від конкретного периферійного модуля – таймера, АЦП інтерфейсів SPI,I²C та UART/USART.

Архітектурно DMA-контролер є окремим ведучим пристроєм на внутрішній шинній матриці, що з'єднує його з оперативною пам'яттю та периферійними інтерфейсами. Доступ до спільних ресурсів між ядром та контролером прямого доступу в пам'ять організований за схемою що гарантує процесорному ядру не менше половини смуги пропускання.



Контролер DMA1 на борту обраного мікроконтролера підтримує три режими роботи: пам'ять – периферія , периферія – пам'ять а пам'ять – пам'ять. Програмно для кожного каналу задаються адреса регістра периферії ,адреса буфера в оперативній пам'яті , кількість елементів даних, що мають бути передані , а також параметри трансферу в регістрі конфігурації каналу: напрямок передачі , розмір даних (8,16,32 біти), режим інкрементування адрес периферії та пам'яті , рівень пріоритету каналу, та режим роботи[16]. Це дозволяє гнучко налаштувати контролер під конкретну задачу від циклічного читання значень з АЦП до пакетного копіювання масивів даних.

Арбітр пріоритетів контролера DMA дозволяє задавати чотири програмних рівні пріоритету для кожного каналу один із чотирьох програмних рівнів пріоритету (very high, high , medium, low). Якщо кілька DMA запитів мають однаковий програмний пріоритет то їх обслуговування визначається апаратно – канал з меншим номером отримує перевагу над каналами з більшими. Такий механізм дозволяє зберігати детермінованість системи навіть в складних за структурою системах.[16]Кожен з каналів має три основні події переривання, завершення половини передачі Half Transfer, завершення повної події передачі Transfer Complete, та помилку передачі Transfer Error [16]. Для цих подій передбачені окремі прапорці стану та біти дозволу переривань.

У межах дипломного проєкту контролер DMA1 використовується у режимі пам'ять - периферія для безперервного передавання кадрів зображення на світлодіодну матрицю через інтерфейс SPI, що повністю звільняє ядро Cortex-M3 від обслуговування потоку байтів та залишає його ресурси для прикладних обчислень.

2.1.3 Протокол SPI

Послідовний синхронний інтерфейс SPI (Serial Peripheral Interface) є одним з базових стандартів обміну даними між мікроконтролером та зовнішніми мікросхемами в межах однієї друкованої плати. Протокол було розроблено в середині 1980-х років, і з того часу він став фактичним промисловим стандартом для високошвидкісного підключення дисплеїв, мікросхем пам'яті, АЦП, бездротових модулів та інших компонентів[17]. Завдяки апаратній простоті реалізації повнодуплексному режиму обміну та високій пропускну здатності, даний протокол добре пристосувався в середовищах де потрібна передача великих обсягів даних[18].

Фізично класична SPI шина використовує чотири сигнальні лінії: MOSI (Master out, Slave In) для передачі даних від ведучої мікросхеми до відомої. MISO (Master In Slave Out) для зворотного потоку даних під підлеглою до ведучого. SCK або SCL (Serial Clock) – лінія тактового сигналу, що формується ведучим пристроєм та синхронізує транзакції обміну. Та лінія SS/CS (Slave/Chip Select) для вибору конкретного підлеглому пристрою[19]. На відміну I²C, де всі пристрої адресуються за 7 бітними номерними адресами у SPI кожен підлеглий потребує власної фізичної лінії CS, що обмежує кількість мікросхем на одній шині, проте суттєво спрощує апаратну реалізацію та усуває витрату часу на адресацію.

Обмін даними відбувається повнодуплексно – під час кожного такту лінії SCK один біт передається від ведучого до підлеглому і один біт повертається у зворотному напрямку. Це дозволяє ефективно реалізовувати протоколи запит-відповідь без розділення команди та відповіді на окремі транзакції[17].

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

22

Серед основних переваг SPI , що зумовлюють його широке застосування у вбудованих системах[18], можна виділити

1. Висока пропускна здатність – швидкість передачі може досягати десятків мега-біт за секунду, що на порядок перевищує можливості інших стандартних протоколів.
2. Безперервний потоковий характер передачі, відсутність накладних витрат на службові поля протоколу, та легкість апаратної реалізації на зсувних регістрах
3. Повнодуплексний обмін даними, можливість одночасної передачі даних в обох напрямках
4. Гнучкість формату даних що передаються , довільний розмір переданого слова від стандартних 8 до 16 біт до нестандартизованих форматів необхідних для інтеграції з вузько спеціалізованими сенсорами і пристроями
5. Ефективна взаємодія з контролером прямого доступу до пам'яті фізична архітектура шини ідеально пристосована до роботи з DMA що дозволяє безперервно передавати великі масиви даних без витрати процесорного часу ядра
6. Простота електричної реалізації, лінії шини SPI не вимагають зовнішньої підтяжки через резистори, оскільки використовується push-pull конфігураціях вихідного каскаду. Це зменшує необхідну кількість компонентів на платі та дозволяє отримати більш передбачувану поведінку шини на високих частотах обміну даних.

Окрему практичну цінність інтерфейсу SPI становить можливість використання його для генерації прецизійний часових послідовностей для протоколів що не відносяться до сімейства SPI. Оскільки інтерфейс не має стандартизованих параметрів, у сучасних мікроконтролерах можна конфігурувати тривалість кожного імпульсу та частоту синхросигналу, порядок передачі біт.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

23

Вищеназвані факти дозволяють використовувати апаратний SPI на борту обраного мікроконтролера як універсальний драйвер для протоколів з NRZ кодуванням, де для визначення стану біту використовується чітко вивірені за часом імпульсів замість просто вимірювання логічного рівня на лінії. Для такої емуляції достатньо використовувати всього одну лінію MOSI інші лінії залишаються незадіяними що нівелює одну з найбільших проблем даного інтерфейсу у вигляді великої кількості ніжок мікроконтролера. Розрахувавши частоту синхроімпульсу, кожному реальному біту цільового протоколу буде відповідати послідовність з декількох біт SPI, таким чином на лінії MOSI буде відтворюватись послідовність що відповідає вимогам цільового стандарту.

Такий підхід дозволяє керувати пристроями з нестандартними засобами комунікації, без необхідності програмного формування необхідних послідовностей, а можливість спарювання апаратного SPI з DMA дозволяє звільнити ядро від рутинних операцій передачі навіть для нестандартних протоколів непередбачених на боту мікроконтролера

2.1.4 Протокол UART

Послідовний асинхронний інтерфейс UART (Universal Asynchronous Reciver-Transmitter) є одним з найстаріших та найпоширеніших стандартів обміну даним між цифровими пристроями. Свої коріння він бере ще від ранніх телетайпних з'єднань 1960-х років та з того часу фактично став стандартом для простого двостороннього обміну даними в форматі поінт то поінт у вбудованих системах, попри появу більш сучасних та швидкісних протоколів[20]. Завдяки мінімальним апаратним вимогам простоті реалізації та широкій лінійці інструментів для роботи з ним UART зберігає роль універсального каналу зв'язку що використовуються у завдання службового обміну, конфігурування пристроїв та діагностики на етапі розробки і налагодження прошивки.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

24

На відміну від синхронних протоколів де всі учасники використовують спільну тактову лінію. UART її не має, замість цього передавач і приймач незалежно генерують свої внутрішні тактові сигнали, а синхронізація досягається за рахунок заздалегідь узгодженої швидкості обміну даними (baud rate) та службових бітів кадру [21]. Допустима розбіжність частот між передавачем та приймачем зазвичай не може перебільшувати 10% після чого порушується правильне семплування біт та обмін стає неможливим

Фізично класична лінія UART використовує лише дві сигнальні лінії одну для передавача та іншу для приймача, TX та RX відповідно. При з'єднанні двох пристроїв лінія приймача одного підключається то передавача іншого і навпаки, що утворює повно дуплексний канал зв'язку. Така топологія називається поинт – ту- поинт, і є основним відрізняючим фактором відносно інших стандартних інтерфейсів, UART не підтримує декілька приладів на одній шині. Відсутність адресації та апаратна реалізація не передбачає механізмів для підключення третього і подальших пристроїв на одну і туж шину.[21]

Обмін даним відбувається у форматі кадрів фіксованого формату. Кожен з таких кадрів починається стартовим бітом (логічний нуль) за яким слідує корисне навантаження від 5 до 9 біт, необов'язковий біт парності, що призначається для виявлення помилок передачі та один чи два стопові біти (логічна одиниця). Формат кадру прийнято коротко позначати три символьним кодом – наприклад найпоширеніша конфігурація 8N1 означає 8 біт даних відсутність біта парності та один стоповий біт.

Швидкість обміну протоколу задається у бодах (baud) і визначає кількість біт передану лінією за одну секунду. Стандартні швидкості, що використовуються в сучасних вбудованих системах утворюють фіксований ряд 9600,19200,38400,57600,115200,230400... швидкість 115200 фактично є найбільш розповсюдженою і є стандартом для службових і діагностичних каналів зв'язку.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

25

Серед переваг UART можна визначити [20]:

1. Низька кількість сигнальних ліній – для двостороннього обміну достатньо двох провідників та спільної землі, що звільняє виводи мікроконтролера для інших периферійних задач
2. Відсутність необхідності у спільному тактовому сигналі – асинхронний характер обміну дозволяє з'єднувати пристрої що не мають синхронізовану тактову частоту – що особливо зручно для тимчасового підключення зовнішнього обладнання – наприклад комп'ютера розробника до вбудованої системи
3. Простота реалізації та широка підтримка UART підтримується переважною більшістю мікроконтролерів, та програмних інструментів розробки. Стандарти термінальні програми по типу PuTTY , або вбудовані в середу розробки монітори послідовного порту, дозволяють відображати данні з вбудованої системи на комп'ютері розробника без додаткового програмування на стороні ПК
4. Гнучкість формату обміну даними – можливість конфігурувати кількість біт даних наявність та тип біта парності, кількість стоп біт дозволяє адаптувати протокол до різноманітних вимог та умов
5. Наявність мінімального контролю помилок – за рахунок необов'язкового біта парності полегшує роботу під час розробки , а можливість конфігурувати швидкість у широкому діапазоні дозволяє працювати з дуже великою кількістю периферії

У межах даного дипломного проєкту UART використовується для створення службового каналу зв'язку між мікроконтролером STM32F103C8T6 та комп'ютером розробника. Цей канал дозволяє є виводити налагоджувальну інформацію – поточні значення зчитаних із сенсорів даних, проміжні результати алгоритмів обробки сигналів, стан системи та повідомлення про помилки – у текстовому вигляді в термінальну програму на боці комп'ютера.

Можливість спостерігати за внутрішнім станом системи є важливим інструментом верифікації коректності роботи системи та пошуку помилок на

					ІАЛЦ.045480.004 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

етапі розробки, що особливо актуально в системах реального часу де стандартні методи покрокового налагодження можуть порушувати часову поведінку системи.

2.2 Інерціальний вимірювальний модуль BNO055

Інерціальний вимірювальний модуль BNO055, розроблений компанією Bosch Sencortec , являє собою 9-осьовий сенсор абсолютної орієнтації, що поєднує в одному корпусі три фізичні MEMS- сенсори та спеціалізований мікроконтролер для апаратної обробки даних[22]. Така архітектура виділяє його на фоні класичний інерціальних збірок , що традиційно формуються поєднанням окремих мікросхем акселерометра, гіроскопу та магнетометра. Завдяки апаратному алгоритму Sensor Fusion та готовому для використання формату вихідних даних, BN055 є оптимальним рішенням для задач, де потрібне визначення динамічного стану об'єкта в простоті.



Рис. 2.3 – Модуль з BNO055

Архітектурно BNO055 побудований як система в корпусі (System in Package, SIP), що складається з трьох незалежних MEMS-сенсорів – трьохосьового акселерометра, трьохосьового гіроскопа та трьох осьового магнітометра – а також 32-бітного мікроконтролера ARM Cortex-M0+ на якому виконується фірмова прошивка Bosch з алгоритмом Sensor Fusion[24]. Концепція sensor fusion полягає у комплексній обробці показів декількох сенсорів різної

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

27

фізичної природи з метою отримання вхідних даних точність яких суттєво перевищує можливості кожного окремого сенсора. Акселерометр забезпечує прив'язку до напрямку гравітації, гіроскоп короточасну стабільність, а магнітометр абсолютну прив'язку до магнітного поля. Обробляючи цю інформацію на вбудованому ядрі мікроконтролера, сенсор передає ведучій системі готові “фізичні” величини – кватерніон орієнтації, кути Ейлера, вектори лінійного прискорення без гравітаційної складової, та вектор гравітації – без необхідності у власних обчислювальних ресурсах для реалізації цифрових фільтрів чи комплементарного фільтру.

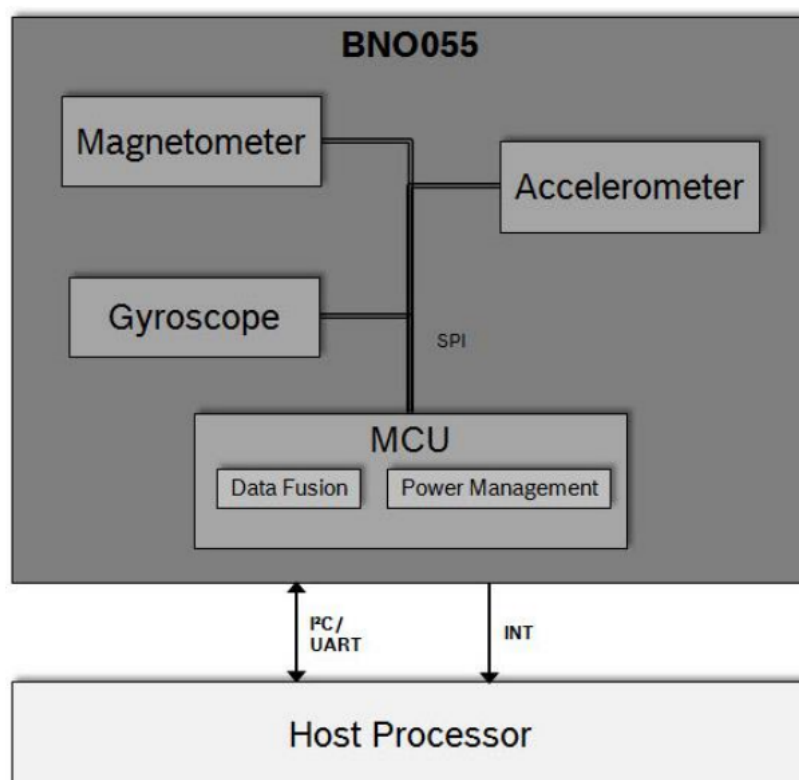


Рис. 2.4 – Архітектура BNO055 з офіційного даташиту Bosch

Параметри окремих сенсорів осей модуля істотно відрізняються від режиму роботи. У сирому non-fusion режимі, розробник може конфігурувати діапазони вимірювання та смуги пропускання кожного окремого сенсора. У режимах де задіяна технологія Sensor Fusion ці параметри обираються

вбудованим алгоритмом та зазвичай фіксуються на певному рівні оскільки математична модель fusion розрахована під конкретну чутливість

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики сенсорних осей BNO055[24, 23]

Сенсор	Параметр	Non-fusion режими	Fusion режими роботи
Акселерометр	Діапазон	$\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ g	± 4 g
	Роздільність	14 біт	14 біт
	Смуга пропускання	7,81 Гц – 1кГц	62.5 Гц
Гіроскоп	Діапазон	$\pm 125 - \pm 2000$ °/с	2000 °/с
	Роздільність	16 біт	16 біт
	Смуга пропускання	12 Гц – 523 Гц	32 Гц
Магнітометр	Діапазон	± 1300 μ T (X, Y) / ± 2500 μ T (Z)	Той самий
	Роздільність	$\sim 0,3$ μ T	$\sim 0,3$ μ T
	Частота вибірки	2 Гц – 30 Гц	20 Гц
Sensor Fusion	Вихідна частота даних fusion	–	100 Гц

Як видно з таблиці, у режимі роботі Sensor Fusion діапазон сенсорів зафіксований на певному рівні незалежно від програмних налаштувань. Спроби запису у регістр який контролює параметри сенсорів буде ігноруватись прошивкою, а перехід з режиму конфігурацію назад у будь який режим роботи Sensor Fusion призведе до повернення налаштувань до значень за замовченням [23][24]. Ці обмеження диктує математична модель алгоритму fusion.

У практичному плані навіть з обмеженнями режимів де задіяний алгоритм Sensor Fusion верхня межа лінійного прискорення становить приблизно 40 м/с²

по кожній з осей. Для типових сценаріїв визначення динаміки руху наземного транспорту цього діапазону більш ніж достатньо. Лише для сценаріїв ударів падінь та зіткнень, де миттєві прискорення можуть перевищувати 40 м/с^2 , призведуть до насичення показів акселерометра, що необхідно враховувати при проєктуванні алгоритмів обробки даних подів

BNO055 підтримує два типи режимів роботи non-fusion – який дозволяє отримати сирі дані сенсорів, та fusion режими які передбачають комплексну обробку вхідних величин. Повний перелік надано в таблиці 2.2

Для задач даного дипломного проєкту обрано режим IMU, що використовує лише акселерометр та гіроскоп без залучення магнітометра. Такий вибір зумовлений специфікою експлуатації системи на двоколісному транспортному засобі: безпосередня близькість до елементів металоконструкції ТЗ, акумулятора та електросистем спричинятиме спотворення магнітного поля, що унеможливить коректну роботу магнітометра та зробить його покази непридатними для обчислення абсолютної орієнтації. Додатковою причиною відмовитись від використання магнітометра є необхідність в його калібрації у рухах у формі цифри 8 перед використанням.

Натомість режим IMU забезпечує визначення відносної орієнтації модуля у просторі на основі даних акселерометра та гіроскопа, що повністю відповідають вимогам системи активної індикації руху ТЗ. Для виявлення розгонів та сповільнень достатньо знати значення лінійного прискорення системи, а повороти та крени виявлятимуться за допомогою Ейлєревих кутів. Режим IMU надає повний набір необхідних вихідних даних кватерніон та кути Ейлєра, та вектор лінійного прискорення з вирахованою гравітаційною складовою.

Таблиця 2.2 – Режими роботи BNO055[22]

Режим	Тип	Активні сенсори	Вихідні данні
CONFIG	Конфігураційний	—	—
ACCONLY	Non-fusion	Акселерометр	Сирі дані
MAGONLY	Non-fusion	Магнітометр	Сирі дані
GYROONLY	Non-fusion	Гіроскоп	Сирі дані
ACCMAG	Non-fusion	Акселерометр, магнітометр	Сирі дані
ACCGYRO	Non-fusion	Акселерометр, гіроскоп.	Сирі дані
MAGGYRO	Non-fusion	Магнітометр, гіроскоп	Сирі дані
AMG	Non-fusion	Усі три	Сирі дані
IMU	Fusion	Акселерометр, гіроскоп.	Кватерніон, кути Ейлера. Відносна орієнтація
COMPASS	Fusion	Акселерометр, магнітометр	Абсолютна орієнтація
M4G	Fusion	Акселерометр, магнітометр	Відносна орієнтація
NDOF_FMC_OFF	Fusion	Усі три (без калібрацій)	Абсолютна орієнтація
NDOF	Fusion	Усі три	Абсолютна орієнтація

Електричні та фізичні характеристики наведено в таблиці 2.3.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

31

Таблиця 2.3 – Електричні та фізичні характеристики BNO055[22, 24]

Категорія	Параметр	Значення
Фізичні характеристики	Корпус	LGA-28
	Розміри	$3,8 \times 5,2 \times 1,1$ мм
	Робочий діапазон температур	$-40 \dots +85$ °C
Електричні характеристики	Напруга живлення	2,4 ... 3,6 В
	Напруга логічного рівня	1,7 ... 3,6 В
	Споживання у режимі IMU	~12,3 мА
	Споживання в режимі енергозбереження	~ 0.4 мА
Інтерфейси	Підтримувані інтерфейси	I ² C, UART, HID I ² C
	Адреса на шині I ² C	0x28 / 0x29

Узагальнюючи розглянуті властивості мікросхеми BNO055, можна виділити такі переваги його застосування у даному дипломному проєкті

1. Апаратний Sensor Fusion – обчислення кватерніонів, кутів Ейлера, вектора гравітації, та лінійного прискорення виконуються вбудованим мікроконтролером, що звільняє ядро основного мікроконтролера від ресурсомістких задач обробки сигналів
2. Готові фізичні вихідні величини – модуль надає вже підготовані дані без гравітації, та абсолютну або відносну орієнтацію в просторі. Без необхідності у проміжній обробці.
3. Інтегроване виконання трьох сенсорів в одному корпусі із заздалегідь узгодженою системою координат, що усуває похибку через різницю у вимірах через геометричне положення компонентів.

4. Стандартні інтерфейси I2C та UART для підключення достатньо двох сигнальних ліній, що мінімізує задіяні виводи мікроконтролера та полегшує розведення друкованої плати.
5. Автоматичне калібрування в деяких режимах Fusion.

Поєднання апаратного виконання алгоритму Sensor Fusion, готового до використання формату вхідних даних, стандартних інтерфейсів робить BNO055 оптимальним вибором для задач визначення динамічного стану транспортного засобу в межах даного проєкту.

2.3 Світлодіодна матриці на основі WS2812B

Світлодіоди серії WS2812B, розроблені компанією Worldsemi, є інтегрованими адресними RGB – світлодіодами, що поєднуються у одному корпусі типорозміру 5050 повноцінний RGB-чіп та інтелектуальний керуючий контролер з вбудованим протоколом обміну даними[25]. Це виділяє WS2812B з поміж класичних рішень візуальної індикації, де для керування кожним окремим світлодіодом потребує окремої лінії GPIO або зовнішнього драйвера-мультиплексора. Завдяки повністю інтегрованому контролеру, у кожному окремому світлодіоді, побудова матриці довільного розміру та форми зводиться до послідовного каскадного з'єднання компонентів. Що робить WS2812B оптимальним рішенням для задач інформативної кольорової індикації з мінімальними апаратними затратами на боці керуючого мікроконтролера.



Рис. 2.5 – Світлодіод WS2812B

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
33

Кожен світлодіод серії WS2812b побудований як інтегрована схема що містить три кристали LED основних кольорів(червоний , зелений, синій) , вбудований цифровий порт прийому-передачі даних, схему регенерації даних, внутрішній 24-бітний регістр-затвор та схеми керування широтно імпульсної модуляції для регулювання яскравості кожного кольорового каналу[25]. Світлодіод має лише чотири виводи VDD (плюсовий полюс живлення), VSS (загальний контакт землі), DIN – вхід даних та DOUT вихід даних, що дозволяє керувати довільною кількістю світлодіодів через єдину сигнальну лінію від мікроконтролера. Принцип передавання даних побудований за схемою “перший байт лишається решта пересилається далі” фактично перший пристрій в ланцюгу зберігає у внутрішньому регістрі перші три байти інформації а решта повторюється на порті DOUT що підключено до наступного пристрою.

Cascade method:

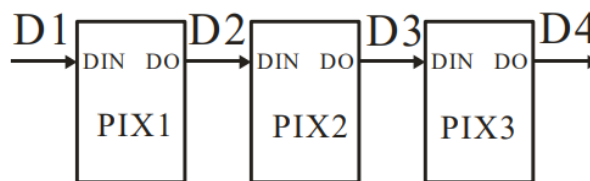


Рис. 2.6 – Схема підключення світлодіодів з офіційного даташиту [25]

Завдяки вбудованій схемі регенерації сигналу форма імпульсу відновлюється на кожному світлодіоді ланцюга, що повністю усуває проблему деградації сигналу та накопичення часових помилок, характерну для довгих ліній передачі даних.

Обмін даними між мікроконтролером та світлодіодами WS2812B здійснюється за однопровідним протоколом з NRZ – кодуванням (Non-Return-to-Zero), у якому інформаційний біт визначається не самим логічним рівнем сигналу, а тривалістю його високого рівня в межах одного бітового періоду. Точні часові параметри протоколу наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 Часові параметри протоколу WS2812B[27]

Позначення	Опис	Тривалість	Допуск
T0H	Логічна одиниця при передачі біта 0	0,4 мкс	±150 нс
T0L	Логічний нуль при передачі біта 0	0,85 мкс	
T1H	Логічна одиниця при передачі біта 1	0,8 мкс	
T1L	Логічний нуль при передачі біта 1	0,45 мкс	
T_reset	Низький рівень для фіксації кадру	≥50 мкс	—
Період біта	Загальна тривалість одного біта	~ 1,25 мкс	—
Частота передачі даних	Швидкість потоку даних	800 кГц	—

Кожен світлодіод WS2812B приймає 24-бітний пакет у нестандартному порядку G-R-B (зелений червний синій), з схемою передачі старшого біта першим. Цей порядок відрізняється від стандартного тому потребує окремої уваги під час реалізації прошивки. Кадр оновлення для всього ланцюга формується послідовністю 24-бітних пакетів кількість яких дорівнює кількості світлодіодів у ланцюгу.

Окремої уваги заслуговують оптичні характеристики світлодіода які безпосередньо визначають придатність WS2812B для побудови індикатора активної безпеки на дорожньому ТЗ. Згідно з інформацією виробника кожен з трьох кольорових каналів має різну силу світла при нормальному робочому струмі[25]. Червоний канал випромінює світло з довжиною хвилі 620-625 нм та забезпечує силу світла від 390 до 420 мілі-кандел при тому ж робочому струмі 16мА та прямій напрузі 2,0- 2,2 В. Зелений канал працює в спектральному діапазоні 522-525 нм демонструючи силу світла від 660 до 720 мілікандел при тому ж робочому струмі та прямій напрузі 3,0-3,4 В. Синій канал випромінює світло з довжиною хвилі 465-467 нм і забезпечує силу світла від 180 до 200 мілікандел при тій же прямій напрузі що і зелений

Така асиметрія між кольоровими каналами зумовлена фізичними особливостями людського зору сприйняття та технологіям виготовлення напівпровідникових кристалів.

Найвища сила світла зеленого каналу відповідає піку чутливості людського ока, що припадає на довжину хвилі близько 555 нм у денних умовах освітлення. Червоний канал, хоча й має нижчу силу світла за зелений, забезпечує найбільш енергоефективну роботу завдяки найменшій серед трьох каналів прямій напрузі, і водночас є універсально розпізнаваним як сигнал гальмування в усіх стандартах автомобільної світлотехніки

Узагальнюючи розглянуті властивості адресних світлодіодів WS2812B, можна виділити такі переваги їх застосування:

1. Мінімальна кількість сигнальних ліній для керування, для роботи з довільною кількістю світлодіодів достатньо однієї лінії DIN, що звільняє виводи мікроконтролера для інших задач та спрощує розведення друкованої плати.
2. Інтегрований контролер у кожному світлодіоді – відсутність необхідності встановлення зовнішніх драйверів або мультиплексорів для керування
3. Каскадне з'єднання довільної топології – можливість формувати лінійки, кільця, матриці, та довільні фігури за єдиним протоколом керування
4. Висока глибина кольору – 24 -бітне керування з 256 градаціями яскравості на кожен з трьох кольорових каналів забезпечує плавні переходи яскравості та можливість відображення інформативної кольорової індикації
5. Достатня яскравість світлодіодів для використання в якості індикатора.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

36

2.4 Мова програмування С як підмножина С++

Розробка прошивки мікроконтролера у межах даного дипломного проєкту буде виконана мовою С, яка компілюється в середовищі STM32CubeIDE. Особливістю обраного підходу є те, що вихідний код написаний за синтаксисом мови С, обробляється компілятором С++ , що технічно реалізує концепцію використання мови С як підмножини мови С++. Така стратегія є типовою для розробки вбудованого програмного забезпечення на платформі STM32 і дозволяє отримати переваги двох мов одночасно.

Історично мова С була створена Деннісом Рітчі у лабораторіях Bell Labs на початку 1970-х років для потреб розробки операційної системи UNIX. З того часу вона еволюціонувала у фактичний стандарт для системного програмування, розробки операційних систем, драйверів та прошивок вбудованих пристроїв. Принципи закладені у її основу мінімальна абстракція над архітектурою процесора, прямий доступ до пам'яті та апаратних регістрів , передбачуване відображення мовних конструкцій на машинний код – виявились настільки вдалими, що за понад пів століття існування мова не втратила актуальності та продовжує домінувати у нішах, де критично важливі продуктивність контроль ресурсів та детермінованість виконання.

Мова С++, розроблена пізніше Б'ярном Страуструпом як надбудова над С, успадкувала більшу частину синтаксису та семантики попередниці, що забезпечило практично повну зворотну сумісність та можливість поступового переходу між цими мовами у межах одного проєкту.

Окремої уваги заслуговує екосистема розробки, що склалася навколо мікроконтролерів STM32. Усі офіційні бібліотеки STMicroelectronics – як високорівневий HAL, так і низькорівнева LL – реалізовані саме мовою С. Аналогічно мовою С написана переважна більшість драйверів зовнішніх сенсорів, що постачаються виробниками компонентів.

Компіляція коду С компілятором для С++ надає додаткові переваги що не вимагають змін у стилі написання коду. Більш сувора типізація мови С++ - заборона на неявне приведення між несумісними типами вказівників, та між

цілочисловими і перерахованими типами. Також у проєкті стають доступні елементи синтаксису C++ які підвищують зручність та якість розробки, розширена семантика ключових слів inline та const, підтримка директиви #pragma once. Також великим плюсом є можливість використовувати елементи об'єктно орієнтованого-програмування , інкапсуляція драйверів та блоків програмного коду у класи спрощує структуру коду та дозволяє покластись на механізми мови C++ для керування доступом до імен , замість ключового слова static.

Висновки до розділу

Узагальнюючи розглянуті аспекти, можна виокремити ключові підстави для обраного підходу до розробки прошивки:

1. Відповідність вимогам вбудованих систем – мова C залишається де-факто стандартом системного програмування завдяки мінімальній абстракції над апаратурою, передбачуваному відображенню коду на машинні інструкції та детермінованості виконання.
2. Безпосередня інтеграція з екосистемою STM32 – офіційні бібліотеки HAL і LL від STMicroelectronics а також драйвери зовнішніх сенсорів реалізовані мовою C, що забезпечує сумісність та повторне використання коду.
3. Швидкодія та ефективність , мова C дає можливість писати високопродуктивний код що безпосередньо взаємодіє з апаратним забезпеченням без затримок.
4. Можливість оперувати регістрами, управляти векторами переривань, конфігурувати зовнішню периферію використовуючи прямий доступ до пам'яті, мова C дає всі ці можливості в руки розробника.
5. Узгодженість із галузевими стандартами розробки – мова C є де факто стандартом для створення прошивок у даному проєкті забезпечує відповідність прийнятим у галузі інженерним практикам та підвищує прикладну цінність розробленого рішення.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

38

ПРОГРАМНО АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ПІДТРИМКИ ВОДІЯ З ІНДИКАЦІЄЮ ПРИСКОРЕННЯ

3.1 Архітектура програмно апаратного комплексу

Програмно апаратний комплекс підтримки водія що було розроблено являє собою поєднання інтегровану схему на друкованій платі, та світлодіодну матрицю яка використовується в якості дисплею що кріпиться на спину , рюкзак, або жорстко прикріплюється до ТЗ. Комплекс побудований таким чином щоб у разі його модернізації можна було мінімізувати витрати та не мати необхідності в повній переробці апаратної частини.

Архітектура комплексу складається з двох модулів, керуючої плати що розміщується на кермі або у зручному для водія місці, та дисплею у вигляді LED матриці який підключається до USB DCP джерела живлення: павербанку, адаптеру зарядки, тощо. Живлення на керуючий модуль подається через кабель що підключається в порт USB type-C на керуючому модулі. Матриця світлодіодів виконує основну функцію індикації маневрів ,а також є середньою ланкою в постачанні живлення до керуючої плати



Рис. 3.1 – Керуючий модуль комплексу в корпусі надрукованому на FDM принтері

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

39

Основою керуючого модуля є мікроконтролер STM32F103C8T6 (Виробництва STMicroelectronics). Він відповідає за обробку вводу від користувача, опитування сенсорів, обробку даних з них, та виведення інформації через контроль світлодіодного дисплею. Данна платформа була обрана через високу ефективність обчислень, широкий спектр наявної периферії та розповсюдженість екосистеми STMicroelectronics, наявність базових бібліотек HAL та LL, нативної середовища розробки STM32CubeIDE та генератора коду STM32CubeMX.

Модуль індикації реалізовано на основі світлодіодної матриці з 256 адресних світлодіодів WS2812B у конфігурації 16x16 (рис 3.2). Технічні характеристики яких наведено у підрозділі 2.3

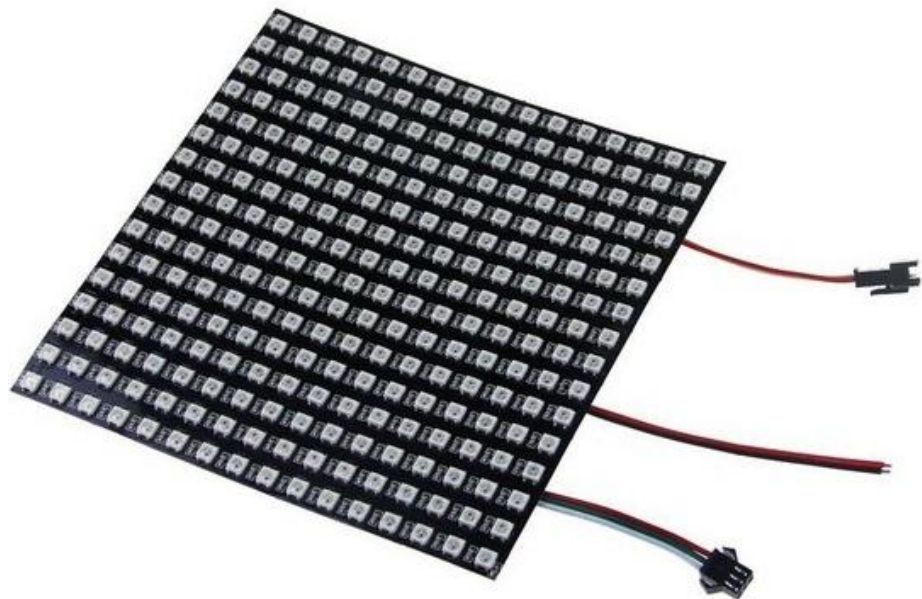


Рис. 3.2 – Зовнішній вигляд використаної матриці

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
40

Матриця виконана на гнучкій друкованій платі, що містить полігони живлення та землі, розв'язувальні конденсатори для світлодіодів, мікросхеми WS2812B , а також три групи контактних майданчиків для підключення зовнішніх кабелів. Усі три групи призначені для подачі живлення на матрицю проте функціонально відрізняються між собою:

- Перша група (Вхідна) – окрім стандартних контактів живлення +5В та GND(Земля, нульовий потенціал) , містить контакт DIN для подачі сигнальної лінії керування ланцюгом світлодіодів.
- Центральна група – використовується для додаткового підключення живлення з метою запобігання падінню напруги вздовж ланцюга та забезпечення рівномірної яскравості світлодіодів по всій площині матриці
- Третя група (вихідна) – окрім контактів живлення містить контакт DOUT для подальшого розширення ланцюга світлодіодів додатковими секціями.



Рис. 3.3 – Контактні майданчики матриці

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
41

Виконання на гнучкій друкованій платі , забезпечує універсальність кріплення модуля: матрицю можна закріпити на рюкзаку нашити на спину куртки або встановити у жорсткий корпус для безпосереднього монтажу на транспортному засобі.

Живлення пристрою організовано від зовнішнього джерела стандарту USB DCP (Dedicated Charging Port) – павербанку, мережевого адаптеру, або іншого сумісного джерела. Для підключення до джерела живлення до контактів +5 В та GND підключено кабель USB Type-A (male), у якому сигнальні лінії D+ та D- замкнені між собою. Таке замикання сигнальних ліній відповідає специфікації USB Battery Charging 1.2 та ідентифікує пристрій як стандартного споживача, що не підтримує комунікації по сигнальних лініях, що дозволяє джерелу живлення видавати номінальний струм без обмежень з боку контролера USB.

Від матриці за топологією зірка відходить другий кабель – USB Type-C (male), що призначений для з'єднання з керуючим модулем. У цьому кабелі контакти +5 В та GND підключені паралельно до контактів живлення матриці, забезпечуючи передачу живлення на керуючий модуль, а замкнені між собою лінії D+ та D- підключені до контакту DIN світлодіодної матриці. Саме цими лініями передається прецизійний сигнал керування у форматі протоколу WS2812B , що формується керуючим модулем.

Така схема підключення дозволяє використовувати стандартні кабелі та роз'єми які є зручними та звичними для користувача, для нестандартної задачі. Це спрощує конструкцію модулів виробу, та забезпечує надійне механічне з'єднання компонентів комплексу.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
42

3.2 Апаратна частина – керуючий модуль

Керуючий модуль програмно апаратного комплексу базується на основі мікроконтролера STM32F103C8T6, інерціального вимірювального модуля BNO055, кнопок користувацького інтерфейсу та роз'єму USB Type-C

Така конструкція керуючого модуля може бути реалізована трьома способами, на макетній платі з готових компонентів (приклад на Рис 3.4 та Рис 2.3), на платі-носії з установленням готових модулів через гребінки, або на власній друкованій платі з мікросхемами на штатних посадкових місцях. Аналіз перших двох варіантів показує, що вони не відповідають вимогам експлуатації виробу на транспортному засобі, що обґрунтовує доцільність розробки власної плати.

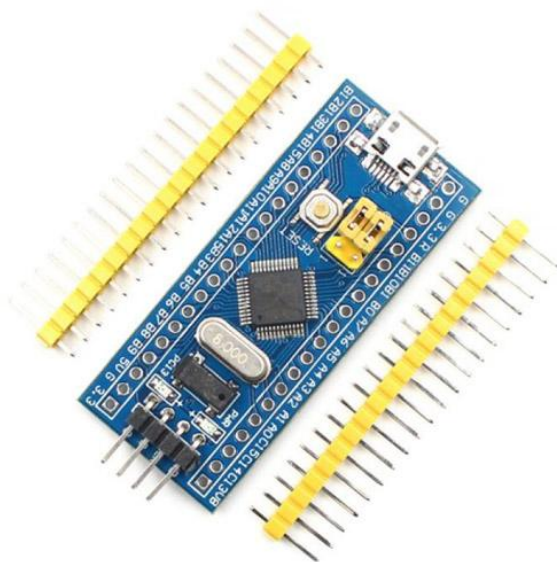


Рис. 3.4 – Готові модулі мікроконтролера та інерційного вимірювального модуля

Складання на макетній платі передбачає з'єднання готової плати мікроконтролера, модуля з BNO055 та тактових кнопок монтажним проводом. Такий варіант придатний лише для лабораторної перевірки працездатності схеми: контакти макетної плати утримуються тертям і втрачають надійність під дією вібрацій, а габарити конструкції унеможливають її розміщення на кермі.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

43

Друкована плата носій з установленими через гребінки готовими модулями усуває проблему ненадійних з'єднань, проте має три суттєві недоліки:

1. Надлишкові габарити. Готові плати мікроконтролера містять компоненти що значно більше самої мікросхеми та мінімально необхідної обв'язки мікроконтролера – кварцовий резонатор, індикаційні світлодіоди, перемичками вибору режиму завантаження та двосторонні контактні гребінки, які додатково збільшують висоту збірки.
2. Висока ціна модулів, готовий розведений на друкованій платі модуль коштує значно більше за окрему мікросхему і необхідну їй обв'язку.
3. Відповідність дипломному завданню. Кваліфікаційна робота передбачає самостійну розробку електронного виробу, а не інтеграцію готових модулів сторонніх виробників. Власне розведення плати охоплює повний цикл проєктування – формування принципової схеми, вибір елементної бази, трасування, передачі плати на виробництво та налагодження – що відповідає змісту дипломного проєкту й дозволяє повноцінно розкрити отримані навички та здібності.

З огляду на викладене, для керуючого модуля було розроблено власну друковану плату на якій безпосередньо розміщено обраний мікроконтролер, інерційний вимірювальний модуль BNO055, кнопки для взаємодії з користувачем, роз'єм USB Type – C, та реалізована система живлення. Таке рішення забезпечує такі результати недосяжні при використанні готових модулів габарити, нижчу ціну всього виробу, можливість розробки ергономічного корпусу з урахування реального розташування на ТЗ.

Результатом розробки друкованої плати керуючого модуля з установленими компонентами наведено на рис. 3.5.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

44

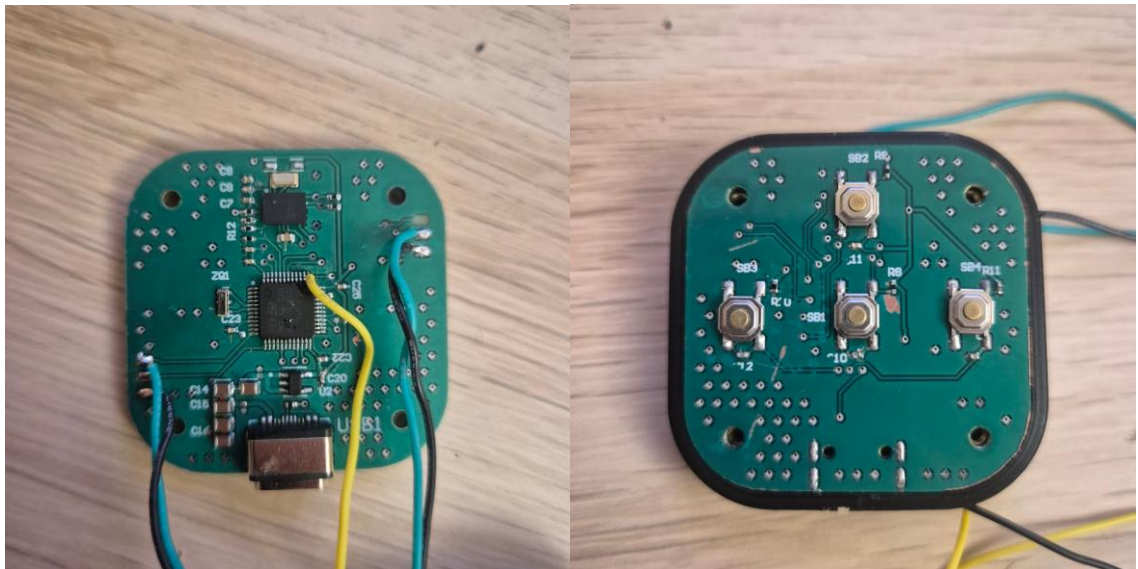


Рис. 3.5 – Розроблена друкована плата з компонентами

Друковану плату виконано у формі квадрату зі стороною 45 мм та заокругленими кутами радіусом 10 мм. Така форма була обрана з міркувань компактності та зручності приладу. У кожному з чотирьох кутів плати передбачено отвір М2 для закріплення плати в корпус.

Для виготовлення обрано двошарову друковану плату. Основним фактором такого вибору стала можливість швидкого виробництва в межах України, що суттєво скорочує цикл розробки та дозволяє пройти декілька ревізій плати за час, який зайняло б одне замовлення з-за кордону. Додатковими факторами стали низька вартість двошарових плат – при замовленні великої партії у виробника на кшталт JLCPCB ціна однієї плати може складати близько 10 центів США – а також відсутність необхідності у більшій кількості шарів на поточному етапі розробки. Трасування на чотиришаровій платі дозволило б досягти кращих електричних характеристик, проте збільшило б вартість і час виробництва, не даючи при цьому суттєвого спрощення розведення для схеми такої складності.

Виготовлення плати для прототипу замовлено у вітчизняного сервісу експрес-виробництва друкованих плат PCB24, що дозволяє суттєво скоротити цикл розробки порівняно з замовленням з-за кордону. Розведення виконано з урахуванням технологічних обмежень виробника, наведених у таблиці 3.1.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

45

Таблиця 3.1 Технологічні обмеження виробника РСВ24

Параметр	Значення , мм
Доступна товщина плати	0,8 ; 1,0 ;1,5
Мінімальна ширина доріжки	0,2
Мінімальна відстань між доріжками	0,2
Мінімальний діаметр отвору	0,3
Мінімальний діаметр металізованого отвору	0,3
Мінімальний діаметр фрезерованого отвору	0,6
Максимальне відхилення центра отвору	0,15
Крок діаметрів отворів	0,1
Мінімальна товщина Шовкографії	0,15

Наведених технологічних обмежень виробника достатньо для розведення плати з обраною елементною базою. Мікроконтролер STM32F103C8T6 у корпусі LQFP-48 має крок виводів 0,5 мм та ширину контактної майданчика у 0,2мм згідно документації виробника[11]. Мікросхема BNO055 у свою чергу виконана в корпусі LGA-28 з аналогічним кроком виводів та шириною контактної майданчика в 0,25мм[22]. Мінімальна ширина доріжки 0,2 мм та мінімальний зазор 0,2 мм що підтримується виробником, задовольняють такі вимоги.

Данні параметри безпосередньо вплинули під час вибору ширини провідників для трасування. Усі сигнальні лінії – інтерфейси I²C , лінії керування світлодіодної матриці – виконано доріжками шириною в 0,2 мм, що відповідає мінімально можливій ширині яку підтримує обраний виробник.

Для ліній живлення обрано більшу ширину доріжок, на основі сумарного споживання всіх мікросхем на платі [11][22], реальне споживання приладу не буде перевищувати приблизно 70 мА, за стандартом IPC-2221 при товщині зовнішнього шару міді 35 мкм (Стандарт який використовується РСВ24), та допустимому нагріву 10 градусів за Цельсієм , доріжка 0,4 мм витримує близько

1 А , що створює більш ніж десятикратний запас – такий значний запас за струмонесучою здатністю обрано свідомо з двох міркувань:

- Можливість майбутньої модифікації – під час подальшої розробки приладу відсутність необхідності повторного трасування системи живлення, значно зменшить час на розробку та імплементацію нових рішень
- Ширина доріжки 0,4 мм геометрично узгоджена з типорозміром обраних пасивних компонентів в корпусі 0402, Завдяки цьому при трасуванні ліній живлення доріжка плавно переходить у контактний майданчик пасивного компонента без зміни ширини. Це усуває характерну для переходів “вузька доріжка – широкий майданчик” проблему непротравлених кутів у місці стику, які виникають через обмежену роздільну здатність процесу хімічного травлення міді.

Окремим конструктивним рішенням став вибір товщини друкованої плати. З трьох доступних у виробника варіантів обрано найбільшу товщину 1,5 мм. Підставо. Такого вибору стала специфіка експлуатації керуючого модуля. Плата має невеликі габарити та жорстко закріплюється гвинтами М2 в корпусі який монтується на ТЗ. У таких умовах плата піддається постійним вібраційним навантаженням, що передаються від конструкції транспортного засобу

Збільшення товщини плати до 1,5 мм підвищує її механічну жорсткість та опір на згинання. Такі властивості мінімізують ризик появи тріщин, у припаяних з'єднаннях компонентів та мідній фользі.

Результати трасування друкованої плати керуючого модуля у двох шарах наведено на рис 3.6. Електричну схему можна побачити в додатку 1. Трасування виконано для всіх сигнальних ліній, лінії живлення окремо розведені доріжками шириною в 0,4 мм. Трасування землі виконано полігонами на верхньому та нижньому шарі. На лицьовій стороні плати знаходяться всі основні мікросхеми, система живлення та порт USB Type-C. Зворотна сторона містить інтерфейс для взаємодії з користувачем, чотири кнопки та розв'язуючі конденсатори та резистори для них.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

47

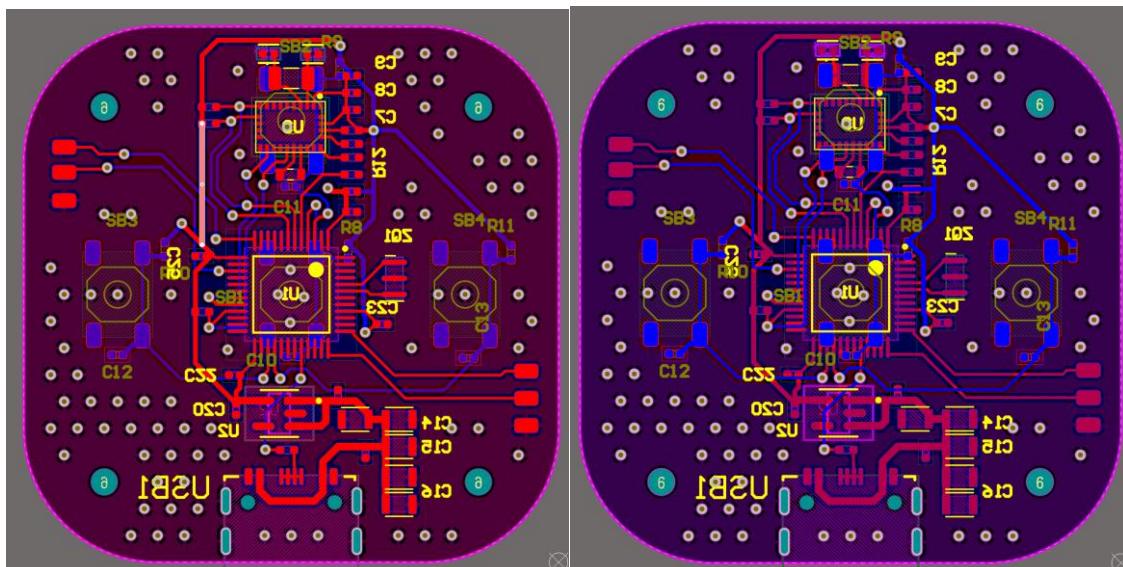


Рис. 3.6 – Верхній та нижній шари друкованої плати після трасування

Для майже всіх пасивних компонентів, окрім банку фільтруючих конденсаторів у корпусі 0805 та конденсатору для струмового насоса акселерометра, обрано типорозмір 0402. Цей вибір є компромісом між щільністю монтажу та складністю ручного збирання приладу.

З однієї сторони обмежена площа плати та значна кількість пасивних компонентів вимагає компактного типорозміру. При застосуванні компонентів в корпусах 0805 або 0603 в деяких місцях, такі як годинниковий кварц BNO055 конфігураційні резистори цієї ж мікросхеми, виникали б надмірні ущільнення трасування. З іншого боку даний типорозмір все ще лишається придатним для ручного або напівавтоматичного монтажу під час складання прототипу. Що дозволить продемонструвати свої навички у даній кваліфікаційній роботі.

3.2.1 Система живлення керуючого модуля

Живлення внутрішніх кіл керуючого модуля організовано від єдиного USB DCP джерела, що надходить від світлодіодної матриці через роз'єм USB Type-C, та понижується до робочої напруги 3,3 В лінійним стабілізатором напруги. Як такий стабілізатор було обрано AP2112K-3.3 – лінійний регулятор з малим просіданням напруги LDO та вихідним струмом до 600 мА. Що є надлишковим для даної версії модуля. Проте даний регулятор є стандартом для подібних

вбудованих систем відповідно – він дуже дешевий та розповсюджений, тому було прийнято рішення про недоцільність пошуку альтернативи яка була б менш надлишковою.

Вибір лінійного стабілізатора замість імпульсного перетворювача зумовлений такими міркуваннями – сумарне споживання всіх мікросхем на платі не перевищує приблизно 70 мА, тож втрати на лінійному стабілізаторі будуть не значними. Додатково лінійний стабілізатор не вносить високочастотних пульсацій у вихідну напругу , на відміну від імпульсного перетворювача, це критично важливо для живлення інерційного вимірювального модуля, через його чутливі MEMS сенсори та внутрішні АЦП які вимагають низько шумного джерела живлення. Застосування DC-DC перетворювача не мало б ніякого практичного сенсу ще з тієї причини що основна напруга яку ми отримуємо з USB DCP джерела, вище за напругу живлення всіх мікросхем на платі, відповідно відсутня необхідність в підвищенні напруги, а значить можна обійтись звичайним LDO.

На вході системи живлення , безпосередньо біля контактів +5 В розміщено банк фільтруючих конденсаторів ($5 \times 10\text{мкФ}$) та один конденсатор в 100 нФ. Велика ємність на вході стабілізує напругу живлення при імпульсних навантаженнях пов'язаних з роботою світлодіодної матриці, конденсатор низької ємності в свою чергу пригнічує більш високочастотні завади.

На вході та виході стабілізатора встановлено конденсатори по 1 мкФ, номінали та розміщення яких чітко відповідають рекомендаціям зазначених в документації виробника мікросхеми.

3.2.2 Обв'язка мікроконтролера STM32F103C8T6

Для генерації тактового сигналу використовується керамічний резонатор з номінальною частотою 16 МГц та інтегрованими конденсаторами навантаження. Застосування такого компонента спрощує трасування. Точність обраного керамічного резонатора (близько 0.5%) є цілком достатньою для задач цього

проєкту: вбудований USB функціонал мікроконтролера не задіюється, а отже відсутня доволі жорстка вимога до стабільності тактової частоти.

Впритул до контактів живлення підключені розв'язуючі конденсатори в 100нФ, задача яких пригнічувати високочастотні шуми по лініям живлення. А також на лінії знаходиться один конденсатор великої ємності в 1мкФ для фільтрування низькочастотних завад. Така комбінація забезпечує стабільне живлення мікросхеми, та зменшує вплив шумів по лініях живлення на її роботу.

Вивід Вибору режиму завантаження BOOT0 підключено до землі через резистор 10 кОм. Низький рівень на цьому виводі задає режим завантаження мікроконтролера з вбудованої флеш-пам'яті – штатний режим роботи прошивки.

Вивід апаратного скидання, використовує вбудовану підтяжку мікроконтролера та доступний для скидання через інтерфейс програмування.

3.2.3 Інтерфейси прошивки та налагодження.

Для прошивки та апаратного налагодження виведено інтерфейс SWD (Serial Wire Debug), що використовує контакти SDWIO та SWCLK. Ці лінії виведено на зовнішні контактні майданчики для підключення програматора.

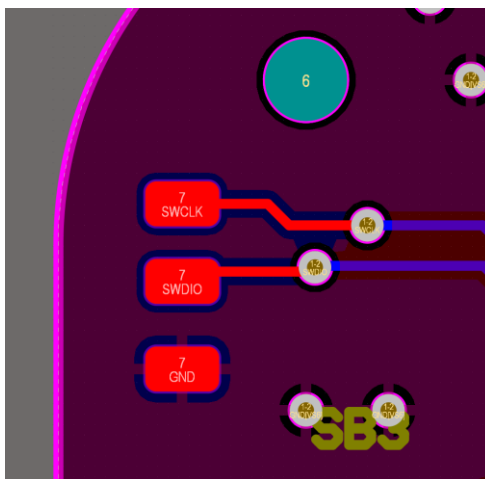


Рис. 3.7 – Контактні майданчики інтерфейсу програмування.

Як додатковий діагностичний канал виведено інтерфейс UART. Його лінії RX та TX, виведено на контактні майданчики. Через цей інтерфейс у

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
50

спеціальному режимі роботи , штатна прошивка приладу передає повідомлення про стан системи, значення сенсорів, та проміжні результати обробки сигналів. Наявність другого каналу для від лагодження є особливо важливою для систем реального часу оскільки використання штатного інтерфейсу від лагодження SWD порушує часову поведінку системи.

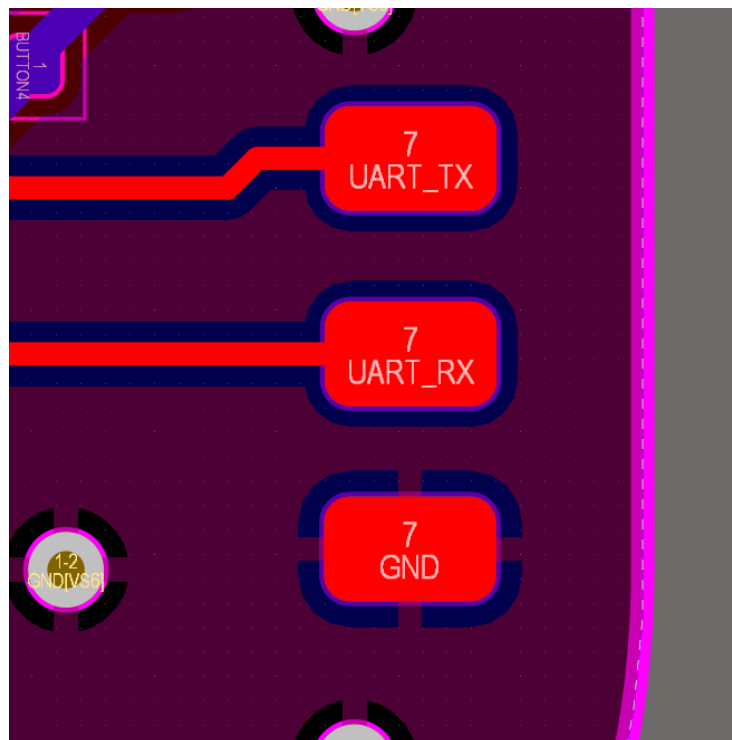


Рис. 3.8 – Контактні майданчики інтерфейсу UART

3.2.4 Обв'язка BNO055

Данна мікросхема підключена до мікроконтролера по інтерфейсу I²C. Лінії шини I²C підтягнуті резисторами номіналом 3,3 кОм. Цей номінал ,який є меншим за типові 4,7-10 кОм, обрано для забезпечення якості фронтів в режимі швидкості fast-mode (400 кГц).

Вибір протоколу який буде використовувати мікросхема задається апаратно станом виводів PS0 та PS1, рівні яких зафіксовано резисторами підтяжки у 10 кОм згідно таблиці вибору протоколу у документації мікросхеми[22]. Це переведе мікросхему у режим спілкування по I²C.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
51

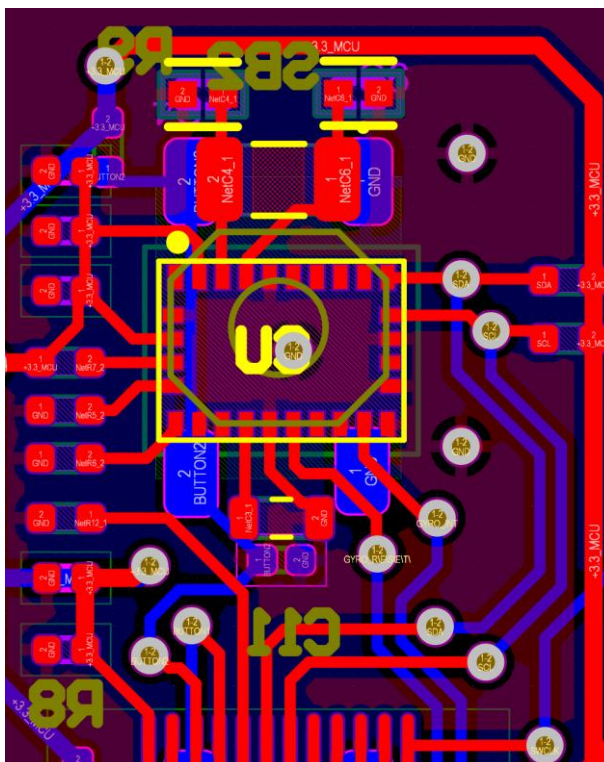


Рис. 3.9 – Мікросхема BNO055 з сигнальними провідниками та компонентами обв'язки.

Сигнальні лінії керування модулем виведено на мікроконтролер: вивід переривання INT що дозволяє сповістити про готовність даних без потреби у постійному опитуванні, лінію скидання NRESET також з'єднано з виводом мікроконтролера для можливості програмно перезавантажувати модуль.

Вивід NBOOT_LOAD_PIN підключено до +3,3 В через резистор 10 кОм для штатного завантаження вбудованої прошивки. На вивід CAP встановлено конденсатор в 150 нФ відповідно документації [22].

Орієнтація корпусу узгоджена з прийнятою системою координат T3, так щоб осі акселерометра і гіроскопу, відповідали поздовжньому та поперечному напрямкам руху. Що спрощує подальшу інтерпретацію даних.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
52

3.2.5 Кнопки інтерфейсу користувача

Взаємодію з користувачем пристрою реалізовано чотирма кнопками в корпусі (TS-1087S), підключеними до виводів мікроконтролера. Для кожної з кнопок передбачено апаратне усунення дзвону контактів – резистор підтяжки в 10 кОм що задає високий рівень на лінії в неактивному стані, а підключений паралельно конденсатор в 100 нФ формує разом з резистором RC фільтр

$$t = R \times C = 10000 \, \Omega \times 100 \, \text{нФ} \times 10^{-9} = 0,001 \, \text{с} = 1 \, \text{мс}$$

Стала часу такого фільтру становить близько 1 мс, що достатньо для згладжування брязкітку механічних контактів. Такий фільтр спрощує подальшу програмну обробку стану кнопок, і зменшує ймовірність хибних натискань.

3.2.6 Сигнал керування світлодіодною матрицею

Формування сигналу керування світлодіодною матрицею покладено на апаратний SPI1, лінію MOSI якого виведено з мікроконтролера на роз'єм. Як обґрунтовано у підрозділі 2.1.3 апаратний SPI використано як драйвер для відтворення часової послідовності протоколу WS2812B з NRZ – кодуванням. Кожному біту цільового протоколу відповідає розрахована послідовність біт на лінії MOSI.

Особливістю конструкції модуля керування є передача сигналу керування через стандартний роз'єм USB-C. Сигнал з виводу MOSI проходить через резистор 200 Ω , який виконує дві функції, обмежує струм виводу мікроконтролера в разі помилкового підключення модуля до несумісного пристрою, USB-хоста чи зарядного пристрою, $3,3 \, \text{В} / 200 \, \Omega \approx 16,6 \, \text{мА}$ що лишається в межах допустимого для одного виводу STM32 і захищає його від перевантаження. Також послідовний резистор придушує дзвін і відбиття в лінії передачі, оскільки кабель яким світлодіодний модуль підключається до керуючого має значну довжину.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

53

3.3 Програмне забезпечення STM32

Програмне забезпечення мікроконтролера реалізовано мовою C з використанням деяких конструкцій C++, що компілюється компілятором C++ , у середовищі STM32CubeIDE, із застосування бібліотеки апаратної абстракції STM32 Hardware Abstraction Layer (HAL). Прошивка працює без операційної системи реального часу, що зумовлено детермінованим характером задач системи.

3.3.1 Загальна архітектура програмного забезпечення

Програмне забезпечення побудоване за багаторівневою архітектурою, що забезпечує розділення відповідальності, повторне використання коду та зручність супроводу. Можна виділити три рівні:

1. Рівень апаратної абстракції (STM32 HAL) – згенерований засобом STM32CubeMX код ініціалізації периферії, інкапсулює прямий доступ до регістрів мікроконтролера
2. Рівень драйверів пристроїв – об’єктно-орієнтовані драйвери зовнішніх компонентів: драйвери для клавіатури, світлодіодної матриці, інерційного вимірювального модуля, загорнуті в класи.
3. Рівень обробки сигналів та прийняття рішень – цифрова фільтрація даних акселерометра та кутів орієнтації, детектори подій з гістерезисом і подвійним підтвердженням за часом. Скінченний автомат станів з пріоритетним арбітром та охоронними переходами, що визначає поточний режим роботи.
4. Рівень візуалізації та телеметрії – формування кадрів для світлодіодної матриці-дисплею відповідно до стану, та передавання діагностичних даних за необхідності
5. Конфігураційні параметри – порогові значення детекторів, періоди задач, розміри фільтрів, часи охоронних інтервалів, винесено в окремий конфігураційний файл. Зображення які виводяться на матрицю окремо винесені в заголовочний файл і підлягають конфігурації

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

54

3.3.2 Планування задач

Замість операційної системи реального часу застосовано кооперативний супер цикл з часовим планування задач на основі системного лічильника HAL_GetTick() що інкрементується кожену мілісекунду. Кожна задача має власний період і виконується лише тоді, коли від попереднього виклику минув заданий інтервал:

```
{  
  
    if (now - last_kb_ms >= KB_PERIOD_MS) { last_kb_ms = now; keyboard_update();}  
  
}
```

Такий підхід забезпечує псевдо паралелізм виконання задач без витрат на перемикання контексту та синхронізацію. Періоди задач підібрано відносно до фізичної природи процесів.

Таблиця 3.2 – Періодичність задач прошивки

Задача	Період, мс	Частота , Гц	Призначення
Опитування клавіатури	10	100	Зчитування вводу користувача
Зчитування показів IMU	10	100	Отримання даних сенсорів
Відображення на світлодіодній матриці	62	16	Оновлення кадру на матриці
Телеметрія по UART	50	20	Діагностичний вивід

Вибір періоду IMU в 10 мс узгоджений із частотою оновлення вихідних даних BNO055 у режимі fusion. Частота оновлення кадру на матриці в приблизно 62 мс або 16 Гц достатня для плавного сприйняття анімації людським оком, до того ж така швидкість оновлення узгоджена з фізичними характеристиками обраної матриці розміром 16 на 16 світлодіодів.

3.3.3 Отримання та обробка даних з інерційного модуля BNO055

Модуль використовується в режимі IMU , характеристики та обґрунтування вибору якого пояснено у розділі 2.2. Обмін даними здійснюється інтерфейсом I²C на швидкості 400 кГц.

Для коректної роботи вбудованого алгоритму fusion під час початкової конфігурації мікросхеми встановлюється режим заміни координатних осей. Згідно до документації [22] відповідно до орієнтації сенсору в корпусі реального приладу підходить режим пере визначення координатних осей P6.

Цифрова фільтрація повздовжнього прискорення відбувається в два етапи – Медіанний фільтр з бігучим вікном у 5 замірів (MED_N = 5). Медіанна фільтрація обрана замість фільтра ковзного середнього , оскільки під час руху ТЗ сенсор буде зчитувати короточасні ударні викиди від вібрацій або нерівностей дороги. Медіанний фільтр повністю відкидає одиничні викиди, тоді як ковзне середнє або цифровий фільтр низьких частот розмазував б їх у часі.

Мертва зона у $\pm 0,3 \text{ м/с}^2$: значення менші за поріг за модулем відкидаються що усуває дрейф та шум акселерометра. У режимі IMU рівень шуму заявлений якраз на рівні $\pm 0,3 \text{ м/с}^2$

Аналогічний медіанний фільтр з вікном 5 застосовано до кута крену для визначення крену транспортного засобу. Для встановленого на транспортному засобі положення сенсора прийнято таку угоду –від’ємні значення кута крену відповідають нахилу транспортного засобу право, відповідно додатнє праворуч. Ця угода є конфігуровано оскільки при використанні пристрою на 4 колісному транспорті замінивши стони схилення місцями можна визначати повороти по схилу кузову відносно землі під час відпрацювання підвіски ТЗ.

Виявлення фізичних подій (прискорення, гальмування, екстрене гальмування нахил) реалізовано уніфікованою функцією `update_chanel()` яка поєднує два механізми стабілізації: Порогова петля – подія активується при перевищенні порогу ввімкнення і деактивується лише при падінні суттєво нижчого окремого порогу вимкнення. Це запобігає брязкоту стану поблизу порогів. Подвійне підтвердження за часом – для переходу у відповідний стан та

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

56

з цього стану умова має утримуватись протягом певного часу, параметри таких переходів є конфігурованими через загальний конфігураційний файл.

3.3.4 Скінченний автомат станів

Логіку керування режимами індикації реалізовано у вигляді скінченного автомату станів. Автомат має десять станів визначених переліком:

```
enum State { IDLE, ACCELERATING, AUTO_TURN_RIGHT, AUTO_TURN_LEFT,
MANUAL_TURN_RIGHT, MANUAL_TURN_LEFT, MANUAL_UTURN, MANUAL_HAZARD, BRAKE, ESS };
```

Стани поділяються на автоматичні, що активуються за даними сенсора, та ті що активуються вводом від користувача. Окремо слід розрізняти два режими аварійного характеру – режим ручної аварійної сигналізації, яку водій вмикає кнопкою, і ESS – автоматичний режим, що спрацьовує від різкого гальмування за даними акселерометра.

Для вибору поточного стану використовується пріоритетний арбітр, оскільки декілька подій можуть бути активні одночасно, вибір поточного стану здійснює функція арбітр, що реалізовує строгий пріоритет за критерієм безпеки: екстрене гальмування > гальмування > ручна аварійна сигналізація > розворот > індикація повороту від користувача > автоматичний індикатор повороту > прискорення > спокій.

Оскільки сам по собі пріоритетний арбітр не враховує історію попередніх станів це може призводити до небажаних переходів. Тому додано рівень охоронних правил, який відстежує попередній стан та реалізує часові обмеження переходів.

Такий гібридний підхід поєднує простоту й передбачуваність пріоритетної логіки з врахуванням передісторії без необхідності побудови таблиць переходів між усіма станами

3.3.5 Емуляція WS2812B протоколу засобами SPI

Проблема проколу WS2812B полягає в необхідності програмно кодувати кожен біт часовими періодами на лінії для створення необхідною послідовності логічних 0 та 1, і додатково утримувати лінію протягом 50 мкс. Формування

					ІАЛЦ.045480.004 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

таких імпульсів на загальних контактах введення-виведення GPIO, є ненадійним будь яке переривання спотворює часові інтервали що призводить до помилок в передачі. Вирішення цієї проблеми – відключення переривань під час спілкування хоч і вирішує проблему ненадійності проте призводить до значних витрат процесорного часу ядра на рутинну задачу керування світлодіодом.

Тому було прийнято рішення про застосування емуляції NRZ протоколу обраних світлодіодів засобами апаратного інтерфейсу SPI1. Принцип кодування – 1 біт протоколу WS2812B кодується 3 бітами SPI. Кожен біт WS2812B подається як наступні послідовності біт SPI “100” – логічний 0 NRZ протоколу “110” – логічна 1.

Один байт кольорового каналу (8 біт WS2812B) перетворюється на 24 біти SPI. Оскільки кожен світлодіод має три канали кольору (порядок передачі G-R-B) на один світлодіод припадає 9 байт SPI. Період одного біта SPI має дорівнювати третині періоду біта цільового протоколу, відповідно для протоколу WS2812B (Табл. 2.4) частота SPI для емуляції має дорівнювати 2,4 МГц. Тоді тривалість одного біту SPI $\approx 0,444$ мкс . Відповідно часові параметри комбінацій зазначених в минулому абзаці відповідають параметрам протоколу WS2812B зазначені в Табл. 2.4.

Структура буфера передавання. Для матриці на 256 світлодіодів розмір буфера було обчислено наступним чином: Кількість біт для скидання кадру + кількість світлодіодів помножена на 9 + кадр скидання = $60 + 256 \times 9 + 60 = 2424$ байти.

Поля скидання по 60 байт забезпечують утримання низького рівня до й після кардрів що гарантовано фіксує передані світлодіодам дані

Сформований буфер у 2424 байти передається через апаратний SPI1, для розвантаження процесорного ядра мікроконтролера задачу пересилання даних було передано на DMA контролер 1, в режимі пам'ять до периферії з інкрементом адреси пам'яті. Час повної передачі кадру $\approx 8,6$ мс що значно менше періоду оновлення. За рахунок використання DMA контролера під час передавання

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
58

процесор повністю вільний до виконання інших задач що у поєднанні з часовим плануванням задач дозволяє досягти псевдо паралелізму

Вкрай важливим пунктом драйверу є контроль споживання матрицею світлодіодів. Драйвер містить функцію яка декодує сформований буфер прямо перед відправкою його на DMA контролер, і оцінює сумарний струм який буде споживатись матрицею при відображенні кадру що мав надсилатись. Якщо значення виходить за ліміти споживання через USB DCP порт , процес передачі буде перервано. Це дозволяє гарантувати стабільність роботи системи та захистити зовнішнє джерело живлення.

Висновки до розділу

У розділі виконано повний цикл розробки комплексу – від схемотехніки до трасування та замовлення власної друкованої плати, обґрунтовано рішення про відмову від готових налагоджувальних модулів на користь власної плати.

Спроектовано плату формфактору 45×45 мм під технологічні допуски виробника PCB24 з елементною базою – мікроконтролером STM32 та IMU BNO055. Проведено трасування сигнальних ліній та живлення, трасування землі проведено полігонами з подальшою прошивкою шарів між собою за допомогою перехідних отворів. Створено систему живлення на лінійному стабілізаторі AP2112K-3.3, обв'язку мікроконтролера з керамічним резонатором 16 МГц, виведені на контактні майданчики інтерфейси SWD і UART, підключення BNO055 по I2C, а також передачу сигналу керування матрицею через нестандартно використаний роз'єм USB Type-C. Результатом апаратної частини є виготовлений і змонтований прототип плати.

Розроблено прошивку мікроконтролера без використання RTOS , створено систему з плануванням задач за системним лічильником. Ключовими програмними рішеннями є апаратна емуляція часозалежного протоколу WS2812B засобами SPI та DMA. У поєднанні з апаратним Sensor Fusion модуля BNO055 ядро мікропроцесора звільнене від критичних за часом і ресурсоемких операцій. Достовірність індикації забезпечено двоступеневою фільтрацією

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
59

сигналів (медіанний фільтр та мертва зона) , детекторами з пороговими петлями та подвійне підтвердженням за часом у поєднанні з скінченним автоматом з десяти станів з пріоритетним арбітром та чіткими правилами переходів, забезпечують мінімальний відсоток хибних спрацювань та забезпечують високу надійність системи.

					ІАЛЦ.045480.004 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

4. ВИПРОБУВАННЯ ТА ОЦІНКА СТВОРЕНОЇ СИСТЕМИ

4.1 Демонстрація працездатності комплексу

Для перевірки працездатності розробленого комплексу зібрано випробувальний стенд що складається з керуючого модуля , світлодіодної матриці 16×16 та зовнішнього джерела живлення стандарту USB DCP. Керуючий модуль додатково з'єднано з комп'ютером розробника по інтерфейсу UART.



Рис. 4.1 – Випробувальний стенд з живленням від павербанку – в режимі аварійної індикації

Діагностичний UART з бод рейтом 115200 передає дані з періодом 50 мс. Для візуалізації потоку інформації використано програму Serial Studio Pro, що використовується для вчитування текстових даних з COM порту та відображення їх в зручному форматі консолі. Виводяться данні крену , тангажу, вектори лінійного та чистого прискорення і вектор гравітації, також виводиться орієнтовний азимут

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
61

```

----- T:673654 ms -----
Orientation Roll: -0.56 Pitch: -1.81 Yaw: 71.62 deg
Linear accel LX: -0.030 LY: 0.060 LZ: -0.060 m/s2
Raw accel AX: -0.120 AY: -0.240 AZ: 9.740 m/s2
Gravity GX: -0.090 GY: -0.310 GZ: 9.800 m/s2

----- T:673715 ms -----
Orientation Roll: -0.56 Pitch: -1.81 Yaw: 71.62 deg
Linear accel LX: -0.020 LY: 0.060 LZ: -0.040 m/s2
Raw accel AX: -0.120 AY: -0.240 AZ: 9.750 m/s2
Gravity GX: -0.090 GY: -0.310 GZ: 9.800 m/s2

----- T:673776 ms -----
Orientation Roll: -0.56 Pitch: -1.81 Yaw: 71.62 deg
Linear accel LX: -0.050 LY: 0.060 LZ: -0.050 m/s2
Raw accel AX: -0.140 AY: -0.240 AZ: 9.750 m/s2
Gravity GX: -0.090 GY: -0.310 GZ: 9.800 m/s2

```

Рис. 4.2 – Значення ІМУ в стані спокою

Зі значень що можна побачити з значень на рис. 4.2 видно, що було обрано правильний режим пере визначення осей сенсору, ми чітко можемо побачити вектор гравітації по осі Z який співпадає з прискоренням вільного падіння. Для додаткової перевірки встановимо модуль керування під нахилом 45 градусів в ліво за допомогою транспортера

```

----- T:7959289 ms -----
Orientation Roll: -45.06 Pitch: 1.50 Yaw: 353.88 deg
Linear accel LX: 0.100 LY: -0.030 LZ: 0.080 m/s2
Raw accel AX: -6.840 AY: 0.150 AZ: 7.000 m/s2
Gravity GX: -6.940 GY: 0.180 GZ: 6.910 m/s2

Orientation Roll: -45.06 Pitch: 1.50 Yaw: 353.88 deg
Linear accel LX: 0.090 LY: -0.020 LZ: 0.120 m/s2
Raw accel AX: -6.840 AY: 0.160 AZ: 7.040 m/s2
Gravity GX: -6.940 GY: 0.180 GZ: 6.910 m/s2

Orientation Roll: -45.12 Pitch: 1.50 Yaw: 353.94 deg
Linear accel LX: 0.050 LY: -0.020 LZ: 0.050 m/s2
Raw accel AX: -6.890 AY: 0.160 AZ: 6.960 m/s2
Gravity GX: -6.950 GY: 0.180 GZ: 6.910 m/s2

```

Рис. 4.3 – Значення ІМУ при нахилі керуючого модуля в 45°

На рисунку 4.3 можна чітко побачити кут нахилу 45° в ліво з узгодженим в пункті 3.3.3 знаком. Додатково можна підмітити кут напрямку який змінив своє значення з 70° до 354°, це є особливістю роботи в режимі ІМУ через незадіяний магнітометр мікросхема не здатна отримати точний кут відносно магнітного полюсу землі.

Додатковим маркером працездатності приладу є коротка світлова індикація під час запуску, якщо всі ініціалізації були пройдені успішно матриця загориться зеленим кольором на короткий період часу.

Всі інші функціональні тести відбувались в реальних умовах на транспортних засобах. Окремо треба відмітити можливість використання навіть

під час руху автомобілем, при інверсії угоди про значення поворотів за рахунок крену кузова авто – уклон в протилежну повороту сторону за рахунок відпрацювання підвіски.

4.2 Функціональні можливості та режими роботи комплексу

Результатом розробки є діючий прототип програмно-апаратного комплексу активної світлової індикації, що складається з керуючого модуля на власній друкованій платі та індикаційного елемента. Комплекс автоматично визначає динамічний стан транспортного засобу за даними інерційного вимірювального модуля та відображає відповідні світлодіодні сигнали, доповнюючи штатну світлотехніку засобу, якщо така присутня.

Комплекс реалізує такі функції індикації. До автоматичних режимів, що активуються без участі водія за даними сенсора, належать індикація розгону, індикація гальмування, аварійний сигнал екстреного гальмування при різкому сповільненні, а також автоматична індикація поворотів за кутом крену транспортного засобу. До ручних режимів, що активуються кнопками користувацького інтерфейсу, повороти та розворот які водій може увімкнути в будь який час, проте реальний стан індикації буде визначено арбітром пріоритету відповідно до правил пояснених в пункті 3.3.4.

Гнучкість конфігурації комплексу не обмежує його застосування лише мотоциклами чи мопедами. Оскільки порогові значення детекторів угоди про значення осей, час на перехід, параметри фільтрації винесено в конфігураційний файл, поведінку системи можна адаптувати під інші ТЗ без необхідності в повторній розробки логіки роботи ПЗ.

Логіку формування світлових сигналів комплексу побудовано з орієнтацією на вимоги правил ООН №78 (UN Regulation No. 78) [26], що регламентують встановлення приладів освітлення та світлової індикації для мотоциклів та мопедів. Зокрема реалізовано режим екстреного гальмування ESS, згідно до загальних принципів його активації зазначених в цьому регламенті – автоматична індикація при виявленні події різкого сповільнення з характерним

миготливим сигналом, що має привертати увагу водіїв позаду. Частоту миготіння в цьому режимі вибрано 5 Гц. Правила ООН встановлюють для аварійного сигналу гальмування частоту в 4,0 Гц $\pm$ 1,0Гц, тобто допустимий діапазон від 3 до 5 Гц. Обрана частота 5 Гц лежить у верхній межі дозволеного діапазону тому що забезпечує максимально інтенсивне сприйняття сигналу спостерігачем, аналогічна частота миготіння також застосовується і в серійних системах що встановлюються на ТЗ як штатні.

Слід зазначити, в межах дипломного проєкту комплекс не проходить процедуру офіційного затвердження типу, тому вимоги даних правил використано як галузевий орієнтир під час проєктування логіки роботи , а не як підставу для сертифікаційного твердження.

Принципово важливим аспектом є правовий статус розробленого пристрою Згідно з пунктом 31.4.3[27] Правил дорожнього руху України, експлуатація транспортного засобу забороняється, якщо кількість , тип колір, розміщення та режим роботи зовнішніх світлових приладів не відповідають вимогам конструкції транспортного засобу, при цьому перелік і параметри обов'язкових світлових приладів визначається державними й міжнародними стандартами та Конвенцією про дорожній рух. З огляду на вищесказане розроблений комплекс свідомо позиціонується як доповняльний засіб інформування учасників руху , а не замінює та не дублює її з відключенням штатних приладів. Така концепція дозволяє підвищити помітність та можливість комунікації водія, не вступаючи в суперечність із чинними вимогами до конструкції світлотехніки ТЗ.

4.3 Оцінка собівартості та економічна доцільність

Собівартість прототипу керуючого модуля та індикаційної матриці оцінено за роздрібними цінами компонентів станом на час розробки. Оскільки виріб виготовлено в одиничному екземплярі з ручним монтажем, наведені значення відповідають роздрібні закупівлі без урахування знижок за обсяг, вартість монтажних робіт не закладалася оскільки монтаж виконувався

					ІАЛЦ.045480.004 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

самостійно. Орієнтовний курс перерахунку прийнято на рівні 44 грн за долар США

Таблиця 4.1 Орієнтовна вартість прототипу.

Позиція	Орієнтовна вартість
BNO055	12 USD
Світлодіодна матриця 16 × 16 WS2812B	11,4 USD
Друкована плата керуючого модуля	6,8 USD
Мікроконтролер STM32	5 USD
Стабілізатор AP2112K-3.3, резонатори (16 МГц, 32,768 кГц), роз'єм USB-C, кнопки, пасивні компоненти 0402/0805	3 USD
Корпус (FDM – друк)	1 USD
Загалом	≅ 39 USD

Найвагомішими позиціями є BNO055 та світлодіодна матриця, що разом формують більше половини вартості. При переході до дрібно серійного виробництва із замовленням компонентів партіями та автоматизованим монтажем собівартість суттєво знижуються – насамперед за рахунок ціни на мікроконтролер та інерційний вимірювальний модуль, друковану плату з пасивними компонентами при більших обсягах закупок.

В порівнянні з наявними комерційними рішеннями розглянутими в першому підрозділі, найдешевше рішення коштує близько 75 євро, а ближчі за функціоналом прилади коштують 6-7 раз дорожче у випадку InView, та у приблизно 17 разів дорожче у випадку смарт шолома.

Окрім прямої вартісної переваги, розроблений комплекс має нематеріальні переваги, зумовлені відкритістю архітектури. На відміну від комерційних рішень із закритим ПЗ, схемотехніка та прошивка комплексу знаходяться у відкритому доступі, що дозволяє адаптувати пристрій під конкретні вимоги кожного

окремого користувача, додати нові режими індикації чи інтегрувати нові сенсори.

Таким чином з огляду як на пряму вартісну перевагу, так і на гнучкість подальшого розвитку, розроблений комплекс є економічно доцільним рішенням, що поєднує низьку собівартість із функціональністю, наближеною до комерційних аналогів вищого цінового сегменту. А також вносить унікальний функціонал який відсутній у розглянутих комерційних системах.

4.4 Можливості модернізації

Розроблений вибір є робочим прототипом, тому частину рішень свідомо лишено для наступних ревізій. Нижче окреслено основні напрями розвитку.

Перехід на чотиришарову плату. У поточній версії свідомо обрано двошарову плату – заради низької ціни та швидкого виробництва в межах України. Однак двошарова конструкція накладає обмеження : при трасуванні землі полігонами лінії живлення починають фрагментувати полігон, що порушує цілісність зворотного шляху для струмів. Чотиришарова плата дозволяє уникнути цього недоліку, два внутрішні полігони землі перетворюють всі сигнальні провідники на платі у ко-планарні лінії, значно покращуючи електричні характеристики плати, зменшуючи вплив паразитних наводок, та покращує стійкість зовнішнім завадам.

Висновки до розділу

Перехід на безпроводні модулі – найваговішим конструктивним недоліком даного приладу у його поточному стані є кабель що з'єднує керуючий та індикаційний модуль між собою, він має тягнутись вздовж тіла водія, чіпляється за одяг, і спорядження, та лишається найуразливішим до пошкоджень елементом. Його можна уникнути лише перейшовши на повністю автономні безпроводні модулі.

При такій архітектурі керуючий модуль перетвориться на компактний передавач з власним акумулятором, який так само керує станом індикації але

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.

66

замість формування керуючої послідовності для світлодіодів він лише передає необхідні команди на приймач вбудований в модуль індикації, який теж перетворюється в модуль з власним мікроконтролером приймач-передавачем, і акумулятором. Даний підхід дозволяє лишити інерційний вимірювальний модуль закріпленим до ТХ, усуваючи проблему хибних спрацювань від рухів водія, вирішуючи головний конструктивний недолік та покращуючи ергономіку приладу.

Ще одним напрямком можливих модифікацій є додавання нових елементів в апаратну частину приладу. Через грамотну реалізацію ПЗ, обраний мікроконтролер має значний запас вільної периферії та обчислювальних можливостей, що дозволяє нарощувати функціонал додавання нових мікросхем без значних апаратних змін, або заміни ядра системи. Найочевиднішим рішенням є встановлення приймача супутникової навігації (GPS) у поєднанні з встановленням Bluetooth модуля, додавання цих елементів дозволило б використовуючи наявний сенсор, фіксувати небезпечні події, такі як екстрені гальмування і удари, та передавати ці дані на телефон водія, для подальшої пересилки довіреним контактом. Окремим плюсом можливостей знати свої точні координати в просторі є можливість знати свою точну швидкість руху, не застосовуючи складних математичних методів отримання даної інформації з даних IMU.

Також відкритий шлях доопрацювання наявної апаратної частини. Низка дрібних удосконалень можна зробити без значних змін у загальну будову приладу. Насамперед фільтрація живлення феритовими бідами. Сюди ж належить узгодження логічних рівнів між матрицею та мікроконтролером. Подібні точкові покращення підвищують надійність та завадостійкість виробу за мінімальних змін у конструкції.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті розроблено програмно-апаратний комплекс підтримки водія з індикацією прискорення, призначений для підвищення безпеки та помітності водіїв двоколісного транспорту в дорожньому потоці. Поставлену мету, досягнуто, усі завдання проєкту виконано.

У результаті аналізу статистичних досліджень аварійності (MAIDS, MCCS дані NHTSA) встановлено що одним з ключових факторів високої смертності водіїв двоколісного транспорту є низька помітність таких засобів та помилки сприйняття з боку інших учасників руху. Аналіз існуючих комерційних рішень показав що наявні на ринку прилади обмежені або високою ціною, або закритою архітектурою, або високою ціною, або вузькою сумісністю з конкретними типами транспортних засобів, що обґрунтовує доцільність розробки доступного рішення з відкритою архітектурою.

На основі проведеного аналізу обрано та обґрунтовано елементи бази комплексу, мікроконтролер STM32F103C8T6, IMU BNO055 з алгоритмом Sensor Fusion та адресну світлодіодну матрицю на основі WS2812B. Розглянуто доступні комунікаційні інтерфейси, та апаратні можливості обраного мікроконтролера що визначило архітектурні рішення проєкту.

Виконано повний цикл розробки апаратної частини – від формування принципової схеми та вибору елементної бази до трасування власної двошарової плати формфактору 45×45 мм, її виготовлення у вітчизняного виробника та ручного монтажу робочого прототипу. Спроектовано систему живлення, обв'язки мікроконтролера та IMU, а також реалізовано нестандартне використання роз'єму USB-Type-c.

Розроблено прошивку мікроконтролера на мові C/C++ без застосування операційної системи реального часу, з кооперативним плануванням задач за системним лічильником. Ключовим технічним рішенням стала апаратна емуляція часозалежного протоколу WS2812B засобами апаратного SPI.

					ІАЛЦ.045480.004 ПЗ	Арк.
						68
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Достовірність індикації забезпечено двоступеневою фільтрацією сигналів – медіанним фільтром з ковзним вікном та мертвими зонами , детекторами подій з пороговими петлями й часовим підтвердженням, а також скінченням автоматом з десяти станів з пріоритетним арбітром та охоронними правилами переходів , що мінімізує кількість хибних спрацювань

Працездатність комплексу підтверджено випробуванням на стенді та в реальних умовах експлуатації на ТЗ. Логіку роботи приладу зокрема режим екстреного гальмування ESS , побудовано орієнтуючись на вимоги міжнародних правил [26], а сам пристрій класифіковано як доповняльний засіб інформування, що не суперечить чинним ПДР України [27].

Оцінка собівартості прототипу близько 39 доларів США показала , що розроблений комплекс у 6 – 17 разів дешевший за функціонально близькі комерційні аналоги, зберігаючи при цьому переваги відкритої архітектури та можливість адаптації під різні ТЗ через конфігуруванні параметри.

Отримані результати роблять проєкт придатним як для індивідуального використання водіями двоколісного транспорту, так і для подальшого доопрацювання до дрібносерійного виробництва чи наукових застосувань у сфері активної безпеки дорожнього руху.

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
69

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проєкт розвитку транспортної інфраструктури міста Києва [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://kyivcity.gov.ua/kyiv_ta_miska_vlada/struktura_150/vikonavchiy_organ_kivsko_misko_radi_kivska_miska_derzhavna_administratsiya/departamenti_ta_upravlinnya/departament_transportnoi_infrastruktury/obgovorenya_proyektu_misko_tsilovo_programi/proyekt_mtsp_rozvitku_transportno_infrastrukturi_kiyeva_na_2024_2025/
2. NHTSA Motorcyclist Fatality Rate report [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.nhtsa.gov/press-releases/motorcycle-safety-awareness-month-motorcyclist-fatality-rate>
3. IIHS Fatality Facts 2023 Motorcycles and ATVs [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.iihs.org/research-areas/fatality-statistics/detail/motorcycles-and-atvs>
4. MAIDS Final Report v2.0 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.maids-study.eu/pdf/MAIDS2.pdf>
5. MCCS Final Report [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/18064/>
6. Cosmo Ride: Smart Lighting with Ride Sharing [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://cosmoconnected.com/en/pages/cosmo-ride>
7. Cosmo Ride Technical Specifications [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://int.cosmoconnected.com/en/products-ride/cosmo-ride \](http://int.cosmoconnected.com/en/products-ride/cosmo-ride)
8. LIVALL MC1 Pro Carbon Fiber Motorcycle Smart Helmet [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://livall.com/products/mc1-pro-smart-motorcycle-helmet>
9. LIVALL MC1 Pro Smart Motorcycle Helmet: User Guide [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://device.report/manual/13012584>

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

Арк.
70

10. InView® Helmet Brake and Turn Signal Light [Електронний ресурс] : офіційний сайт виробника– Режим доступу: <https://thirdeyedesigninc.com>
11. STM32F103x8/STM32F103xB Datasheet (DS5319 Rev 20) [Електронний ресурс] : офіційний даташит STMicroelectronics. – Режим доступу: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>
12. STM32F103C8 – Mainstream Performance line MCU with Arm® Cortex®-M3 core [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html>
13. STM32CubeIDE – Integrated Development Environment for STM32 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>
14. UM10204 I²C-bus specification and user manual, Rev. 7.0 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
15. Basics of the I²C Communication Protocol [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/>
16. STM32F10xxx Reference Manual RM0008, Rev 21 [Електронний ресурс] –Режим доступу: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0008-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf
17. Getting started with SPI [Електронний ресурс] :офіційна Wiki STMicroelectronics. – Режим доступу: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/Getting_started_with_SPI
18. SPI Protocol: Revolutionizing Data Communication in Embedded Systems [Електронний ресурс] : Wevolver technical reference. – Режим доступу: <https://www.wevolver.com/article/spi-protocol>

19. SPI Protocol Explained: Clock, MISO, MOSI & CS [Електронний ресурс] : Zbotic Technical Reference. – Режим доступу: <https://zbotic.in/spi-protocol-explained-clock-miso-mosi-cs-for-beginners>
20. An Overview of UART Protocols [Електронний ресурс] : Ezurio technical reference. – Режим доступу: <https://www.ezurio.com/resources/blog/an-overview-of-uart-protocols>
21. UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter [Електронний ресурс] : Analog Dialogue, Analog Devices. – Режим доступу: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/uart-a-hardware-communication-protocol.html>
22. BNO055 Intelligent 9-axis absolute orientation sensor: Data sheet [Електронний ресурс] : офіційний даташит Bosch Sensortec. – Режим доступу: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bno055-ds000.pdf>
23. BNO055 acceleration range in Fusion mode limited to $\pm 4G$ [Електронний ресурс] : офіційний форум технічної підтримки Bosch Sensortec. – Режим доступу: <https://community.bosch-sensortec.com/t5/MEMS-sensors-forum/BNO055-acceleration-range-in-Fusion-mode-limited-to-4G/td-p/10971>
24. BNO055: power modes, accelerometer and motion interrupt [Електронний ресурс] : Mischianti technical reference. – Режим доступу: <https://mischianti.org/bno055-power-modes-accelerometer-and-motion-interrupt-4/>
25. WS2812B Intelligent Control LED Integrated Light Source: Data sheet [Електронний ресурс] : офіційний даташит Worldsemi. – Режим доступу: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812B.pdf>

26. UN Regulation No. 78 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles of category L with regard to braking [Електронний ресурс] : офіційний текст UNECE. – Режим доступу: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2018/R078r2e.pdf>
27. Правила дорожнього руху України ,п. 31.4.3 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-%D0%BF>

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

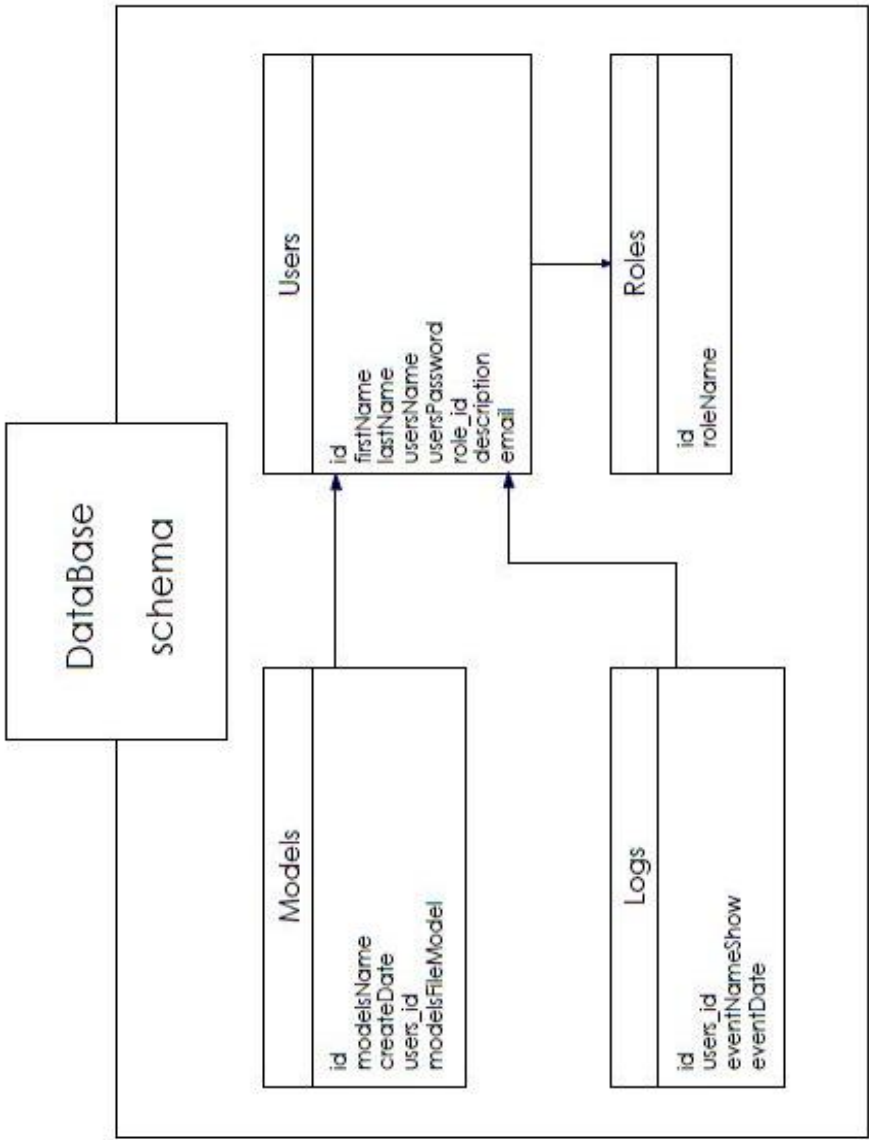
ІАЛЦ.045480.004 ПЗ

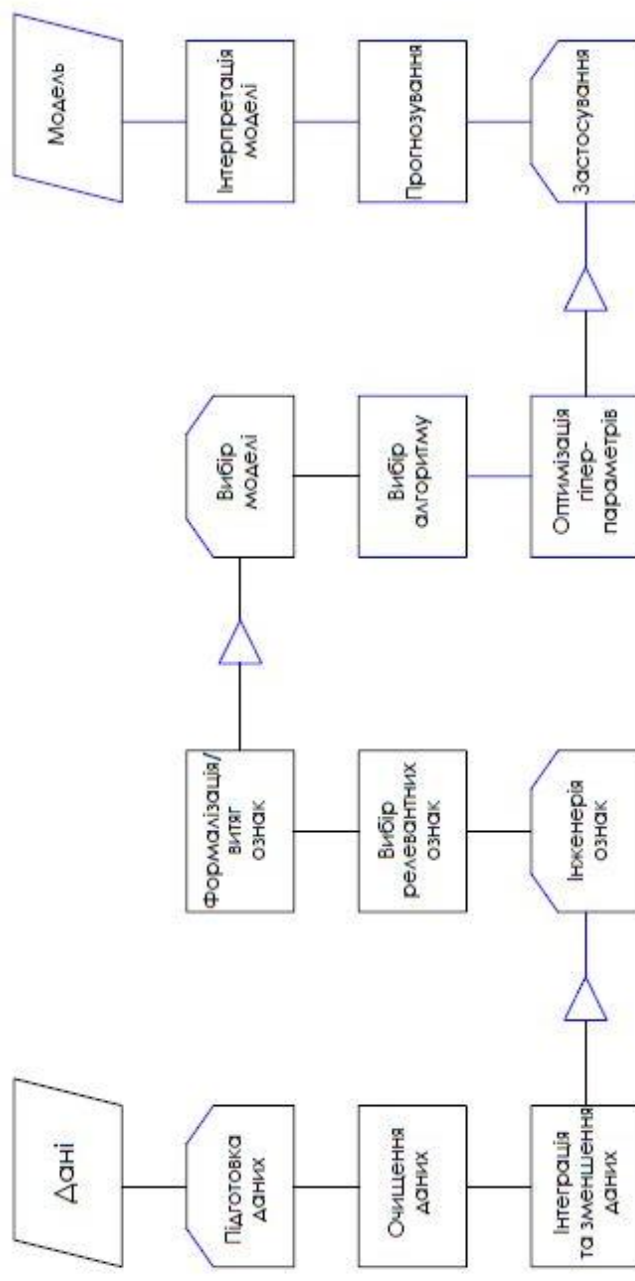
Арк.

73

ДОДАТКИ

ДОДАТОК 1
Копії графічних матеріалів





ІАЛЦ.045480.006 Д2									
Загальна схема побудови моделі МН									
№	Підрозділ	Місце	Дата	№	Місце	Дата	№	Місце	Дата
1	1	1	1	2	2	2	3	3	3
2	2	2	2	3	3	3	4	4	4
3	3	3	3	4	4	4	5	5	5
4	4	4	4	5	5	5	6	6	6
5	5	5	5	6	6	6	7	7	7
6	6	6	6	7	7	7	8	8	8
7	7	7	7	8	8	8	9	9	9
8	8	8	8	9	9	9	10	10	10
9	9	9	9	10	10	10	11	11	11
10	10	10	10	11	11	11	12	12	12
11	11	11	11	12	12	12	13	13	13
12	12	12	12	13	13	13	14	14	14
13	13	13	13	14	14	14	15	15	15
14	14	14	14	15	15	15	16	16	16
15	15	15	15	16	16	16	17	17	17
16	16	16	16	17	17	17	18	18	18
17	17	17	17	18	18	18	19	19	19
18	18	18	18	19	19	19	20	20	20
19	19	19	19	20	20	20	21	21	21
20	20	20	20	21	21	21	22	22	22
21	21	21	21	22	22	22	23	23	23
22	22	22	22	23	23	23	24	24	24
23	23	23	23	24	24	24	25	25	25
24	24	24	24	25	25	25	26	26	26
25	25	25	25	26	26	26	27	27	27
26	26	26	26	27	27	27	28	28	28
27	27	27	27	28	28	28	29	29	29
28	28	28	28	29	29	29	30	30	30
29	29	29	29	30	30	30	31	31	31
30	30	30	30	31	31	31	32	32	32
31	31	31	31	32	32	32	33	33	33
32	32	32	32	33	33	33	34	34	34
33	33	33	33	34	34	34	35	35	35
34	34	34	34	35	35	35	36	36	36
35	35	35	35	36	36	36	37	37	37
36	36	36	36	37	37	37	38	38	38
37	37	37	37	38	38	38	39	39	39
38	38	38	38	39	39	39	40	40	40
39	39	39	39	40	40	40	41	41	41
40	40	40	40	41	41	41	42	42	42
41	41	41	41	42	42	42	43	43	43
42	42	42	42	43	43	43	44	44	44
43	43	43	43	44	44	44	45	45	45
44	44	44	44	45	45	45	46	46	46
45	45	45	45	46	46	46	47	47	47
46	46	46	46	47	47	47	48	48	48
47	47	47	47	48	48	48	49	49	49
48	48	48	48	49	49	49	50	50	50
49	49	49	49	50	50	50	51	51	51
50	50	50	50	51	51	51	52	52	52
51	51	51	51	52	52	52	53	53	53
52	52	52	52	53	53	53	54	54	54
53	53	53	53	54	54	54	55	55	55
54	54	54	54	55	55	55	56	56	56
55	55	55	55	56	56	56	57	57	57
56	56	56	56	57	57	57	58	58	58
57	57	57	57	58	58	58	59	59	59
58	58	58	58	59	59	59	60	60	60
59	59	59	59	60	60	60	61	61	61
60	60	60	60	61	61	61	62	62	62
61	61	61	61	62	62	62	63	63	63
62	62	62	62	63	63	63	64	64	64
63	63	63	63	64	64	64	65	65	65
64	64	64	64	65	65	65	66	66	66
65	65	65	65	66	66	66	67	67	67
66	66	66	66	67	67	67	68	68	68
67	67	67	67	68	68	68	69	69	69
68	68	68	68	69	69	69	70	70	70
69	69	69	69	70	70	70	71	71	71
70	70	70	70	71	71	71	72	72	72
71	71	71	71	72	72	72	73	73	73
72	72	72	72	73	73	73	74	74	74
73	73	73	73	74	74	74	75	75	75
74	74	74	74	75	75	75	76	76	76
75	75	75	75	76	76	76	77	77	77
76	76	76	76	77	77	77	78	78	78
77	77	77	77	78	78	78	79	79	79
78	78	78	78	79	79	79	80	80	80
79	79	79	79	80	80	80	81	81	81
80	80	80	80	81	81	81	82	82	82
81	81	81	81	82	82	82	83	83	83
82	82	82	82	83	83	83	84	84	84
83	83	83	83	84	84	84	85	85	85
84	84	84	84	85	85	85	86	86	86
85	85	85	85	86	86	86	87	87	87
86	86	86	86	87	87	87	88	88	88
87	87	87	87	88	88	88	89	89	89
88	88	88	88	89	89	89	90	90	90
89	89	89	89	90	90	90	91	91	91
90	90	90	90	91	91	91	92	92	92
91	91	91	91	92	92	92	93	93	93
92	92	92	92	93	93	93	94	94	94
93	93	93	93	94	94	94	95	95	95
94	94	94	94	95	95	95	96	96	96
95	95	95	95	96	96	96	97	97	97
96	96	96	96	97	97	97	98	98	98
97	97	97	97	98	98	98	99	99	99
98	98	98	98	99	99	99	100	100	100
99	99	99	99	100	100	100	101	101	101
100	100	100	100	101	101	101	102	102	102
101	101	101	101	102	102	102	103	103	103
102	102	102	102	103	103	103	104	104	104
103	103	103	103	104	104	104	105	105	105
104	104	104	104	105	105	105	106	106	106
105	105	105	105	106	106	106	107	107	107
106	106	106	106	107	107	107	108	108	108
107	107	107	107	108	108	108	109	109	109
108	108	108	108	109	109	109	110	110	110
109	109	109	109	110	110	110	111	111	111
110	110	110	110	111	111	111	112	112	112
111	111	111	111	112	112	112	113	113	113
112	112	112	112	113	113	113	114	114	114
113	113	113	113	114	114	114	115	115	115
114	114	114	114	115	115	115	116	116	116
115	115	115	115	116	116	116	117	117	117
116	116	116	116	117	117	117	118	118	118
117	117	117	117	118	118	118	119	119	119
118	118	118	118	119	119	119	120	120	120
119	119	119	119	120	120	120	121	121	121
120	120	120	120	121	121	121	122	122	122
121	121	121	121	122	122	122	123	123	123
122	122	122	122	123	123	123	124	124	124
123	123	123	123	124	124	124	125	125	125
124	124	124	124	125	125	125	126	126	126
125	125	125	125	126	126	126	127	127	127
126	126	126	126	127	127	127	128	128	128
127	127	127	127	128	128	128	129	129	129
128	128	128	128	129	129	129	130	130	130
129	129	129	129	130	130	130	131	131	131
130	130	130	130	131	131	131	132	132	132
131	131	131	131	132	132	132	133	133	133
132	132	132	132	133	133	133	134	134	134
133	133	133	133	134	134	134	135	135	135
134	134	134	134	135	135	135	136	136	136
135	135	135	135	136	136	136	137	137	137
136	136	136	136	137	137	137	138	138	138
137	137	137	137	138	138	138	139	139	139
138	138	138	138	139	139	139	140	140	140
139	139	139	139	140	140	140	141	141	141
140	140	140	140	141	141	141	142	142	142
141	141	141	141	142	142	142	143	143	143
142	142	142	142	143	143	143	144	144	144
143	143	143	143	144	144	144	145	145	145
144	144	144	144	145	145	145	146	146	146
145	145	145	145	146	146	146	147	147	147
146	146	146	146	147	147	147	148	148	148
147	147	147	147	148	148	148	149	149	149
148	148	148	148	149	149	149	150	150	150
149	149	14							

