

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

**Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології в приладобудуванні»**

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

**на тему: «Автоматизована система просторової орієнтації з гаптичним
зворотним зв'язком для осіб з порушеннями зору»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПМ-21

Антонюк Володимир Михайлович _____

Керівник:

асистент, д.ф.,

Повшенко Олександр Анатолійович _____

Рецензент:

ст.викл., к.т.н., кафедри ІВТ

Года Ольга Юріївна _____

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/П	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ДП ПМ-21.02.1760.01.000 ТЗ	Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ПМ-21.02.1760.01.001 ПЗ	Пояснювальна записка	102	
3	A2	ДП ПМ-21.02.1760.01.002 СхС	Схема структурна	1	
4	A2	ДП ПМ-21.02.1760.01.003 СхС	Схема структурна автоматизації	1	
5	A2	ДП ПМ-21.02.1760.01.004 ЕЗ	Схема електрична принципова головної плати	1	
6	A2	ДП ПМ-21.02.1760.01.005 ЕЗ	Схема електрична принципова периферійної плати	1	
7	A1	ДП ПМ-21.02.1760.01.006	Блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення	1	
8	A2	ДП ПМ-21.02.1760.01.007 СК	Складальний кресленик головної плати	1	
9	A2	ДП ПМ-21.02.1760.01.008 СК	Складальний кресленик периферійної плати	1	
10	A1	ДП ПМ-21.02.1760.01.009 СК	Складальний кресленик пристрою	1	
11	A4	ДП ПМ-21.02.1760.01.010 ПЕЗ	Перелік елементів головної плати	1	
12	A4	ДП ПМ-21.02.1760.01.011 ПЕЗ	Перелік елементів периферійної плати	1	
13	A4	ДП ПМ-21.02.1760.01.012 ПЕЗ	Перелік елементів пристрою	1	

				ДП.ПМ-21.02.1760.01.001 ПЗ		
	ПІБ	Підпис	Дата	Відомість дипломного проєкту КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК		
Розроб.	Антонюк В.М.					
Керівн.	Повшенко О.А.					
Консульт.						
Н/Контр.						
Зав. каф.	Киричук Ю.А.					
				Аркуш	Аркушів	
				1	102	

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизована система просторової орієнтації
з гаптичним зворотним зв'язком для осіб з порушеннями
зору»

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

_____ Антонюк Володимир Михайлович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломного проєкту «Автоматизована система просторової орієнтації з гаптичним зворотним зв'язком для осіб з порушеннями зору», керівник проєкту Повшенко Олександр Анатолійович, доктор філософії, затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту _____ « 24 » травня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту : Система призначена для носіння людиною під час руху в умовах міського середовища; діапазон вимірювання відстані: 0,02 ... 3,5 м; похибка вимірювання $\pm 0,02$ м; кількість напрямків виявлення: 3; сектор контролю одного сенсора – 90° .

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ; 1. Літературний огляд та обґрунтування розробки системи; 2. Розробка загальної структури системи; 3. Розробка електричної принципової схеми та алгоритму роботи системи; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt)

6. Консультанти розділів проєкту* (читаємо примітку внизу сторінки)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 20 » квітня 2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формування завдання на дипломне проєктування	20.04.2026	
2	Огляд стандартів у сфері допоміжних виробів, що використовуються людьми з інвалідністю	25.04.2026	
3	Аналіз існуючих рішень за тематикою диплому	02.05.2026	
4	Розробка структурної схеми системи та вибір елементної бази для її реалізації	07.05.2026	
5	Розробка електричної принципової схеми	14.05.2026	
6	Проектування 3D моделі корпусу окуляр	18.05.2026	
7	Розробка алгоритму роботи програмного забезпечення	21.05.2026	
8	Оформлення текстової та графічної частини дипломного проєкту	24.05.2026	

Студент

(підпис)

Володимир АНТОНЮК

(ім'я, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Олександр ПОВШЕНКО

(ім'я, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту.

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт на тему «Автоматизована система просторової орієнтації з гаптичним зворотним зв'язком для осіб з порушеннями зору» присвячена розробці автономного навігаційного рішення. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю забезпечення безпечної мобільності у складному міському середовищі за допомогою доступних методів сучасної мікроелектроніки та машинного сприйняття.

Основною метою роботи стало створення апаратної архітектури, алгоритмічного забезпечення та ергономічного корпусу компактної модульної системи на базі матричних далекомірів (Time-of-Flight) та актуаторів гаптичного зворотного зв'язку. У рамках дослідження було розроблено математичний апарат і програмну логіку, що дозволяють у режимі реального часу конвертувати відстань до просторових перешкод в інтуїтивно зрозумілу гаптичну індикацію за обернено пропорційною залежністю.

Запропоновано структурну та принципову схеми системи, до складу якої увійшли керуючий мікроконтролер, масивToF-сенсорів, драйвери ШІМ-керування вібромоторами, а також інтегрований вузол контролю заряду Li-Pol акумулятора з інтерфейсом USB Type-C. В роботі описано особливості проєктування топології друкованої плати та реалізацію алгоритму динамічної переадресації I2C-датчиків, що дозволяє використовувати ідентичні сенсорні модулі без апаратних конфліктів. За допомогою інструментів САПР спроектовано ергономічний 3D-корпус системи у формфакторі окулярів

Розроблена система має практичне значення як технічна основа для створення надійних, ремонтпридатних та енергоефективних рішень, здатних суттєво підвищити якість життя, безпеку та рівень самостійності користувачів у повсякденних умовах експлуатації.

Ключові слова: автоматизація, просторова орієнтація, виявлення перешкод, Time-of-Flight, гаптичний зворотній зв'язок, вбудовані системи, мікроконтролер.

ANNOTATION

The diploma project titled " Automated spatial orientation system with haptic feedback for people with visual impairments" is dedicated to the development of an autonomous navigation solution. The relevance of the research is driven by the need to ensure safe mobility in complex urban environments using accessible methods of modern microelectronics and machine perception.

The primary objective of the work was to create the hardware architecture, algorithmic provision, and ergonomic housing for a compact modular system based on Time-of-Flight matrix rangefinders and haptic feedback actuators. Within the scope of the research, a mathematical framework and software logic were developed, enabling the real-time conversion of the distance to spatial obstacles into an intuitively understandable haptic indication based on an inversely proportional relationship.

The structural and schematic diagrams of the system are proposed, comprising a central microcontroller, an array of ToF sensors, PWM drivers for vibration motors, and an integrated Li-Pol battery charge control unit with a USB Type-C interface. The paper describes the features of the printed circuit board layout design and the implementation of a dynamic I2C sensor readdressing algorithm, which allows the use of identical sensor modules without hardware conflicts. Using CAD tools, an ergonomic 3D housing for the system was designed in the form factor of eyeglasses.

The developed system holds practical significance as a technical foundation for creating reliable, maintainable, and energy-efficient solutions capable of significantly improving the quality of life, safety, and independence of users in everyday operating conditions.

Keywords: automation, spatial orientation, obstacle detection, Time-of-Flight, haptic feedback, embedded systems, microcontroller.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП	6
1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ТА ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ.....	8
1.1 Стандарт допоміжних пристроїв	8
1.1.1 Засоби для пересування.....	9
1.1.2 Засоби для відпочинку, дозвілля	9
1.1.3 Засоби для орієнтування, безпеки та попередження.....	10
1.1.4 Засоби підтримки в побуті	10
1.1.5 Засоби професійної діяльності та праці.....	11
1.1.6 Засоби для підтримки органів чуття	11
1.2 Огляд допоміжних пристроїв призначених для людей з порушенням зору	12
1.2.1 Відповідність пристроїв для людей з порушенням зору до стандарту	12
1.2.2 Сучасні рішення для просторової орієнтації людей з порушення зору	13
1.3 Обґрунтування запропонованого рішення	15
1.4 Постановка завдання та вимог до розробки системи	17
1.4.1 Умови роботи	17
1.4.2 Технічні вимоги.....	19
1.4.3 Загальні вимоги	20
1.4.4 Завдання	21
2. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТА ПІДБІР КОМПОНЕНТІВ.....	24
2.1 Розробка структурної схеми	24
2.2 Розробка схеми системи автоматичного керування.....	26
2.2.1 Об'єкт керування.....	26
2.2.2 Структурна схема автоматичного керування.....	27
2.3 Підбір елементів.....	28
2.3.1 Вимоги до далекомірів	29
2.3.2 Вимоги до мікроконтролера	31
2.3.3 Вимоги до драйверів моторів.....	32
2.3.4 Вимоги до вібродвигунів.....	33
2.4 Підбір компонентів згідно вимог	34
2.4.1 Вибір оптичного далекоміру.....	35
2.4.2 Обраний мікроконтролер	37

2.4.3 Вибір драйверу двигуна	39
2.4.4 Вибір вібромотору	40
2.5 Організація живлення	41
2.5.1 Вимоги до джерела автономного живлення.....	41
2.5.2 Вимоги до каскаду стабілізації напруги	41
2.5.3 Вимоги до заряджання та контролю заряджання	42
2.6 Обрані елементи вузлу живлення.....	43
2.6.1 Обраний акумулятор.....	43
2.6.2 Обраний елемент стабілізації напруги.....	44
2.6.3 Обрані елементи підсистеми заряджання.....	45
2.7 Висновки до розділу	46
3. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ	48
3.1 Розробка електричної принципової схеми периферійної плати	48
3.1.1 Реалізація підсистеми просторового сканування	49
3.1.2 Реалізація підсистеми тактильного зворотного контролю	53
3.1.3 Організація зовнішніх інтерфейсів та підключень	56
3.2 Розробка електричної принципової схеми головної плати.....	57
3.2.1 Реалізація обчислювального ядра на базі мікроконтролера.....	58
3.2.2 Реалізація каскаду стабілізації напруги.....	62
3.2.3 Реалізації системи контролю заряду та захисту акумулятора.....	65
3.2.4 Реалізація внутрішньо системних інтерфейсів та комутаційних вузлів	68
3.3 Висновки до розділу	70
4. АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ ТА КОРПУС ПРИСТРОЮ	72
4.1 Програмна архітектура та алгоритм динамічної переадресації	72
4.2 Алгоритм конвертації дистанції у параметри тактильного відгуку	74
4.3 Загальний алгоритм функціонування системи.....	76
4.4 Корпус пристрою	78
4.5 Складання апаратного макету пристрою.....	80
4.6 Висновки до розділу	83
ВИСНОВОК.....	84

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

ToF	Time of Flight
САПР	Система автоматизованого проєктування і розрахунку
ШИМ	Широтно-імпульсна модуляція
GPIO	General-Purpose Input/Output
ERM	Eccentric Rotating Mass
LRA	Linear Resonant Actuator
SMD	Surface-Mount Device

ВСТУП

У сучасному суспільстві спостерігається стрімкий розвиток інклюзивних технологій та перехід від традиційних засобів реабілітації до високотехнологічних рішень, що базуються на мікроелектроніці, автоматизації та машинному сприйнятті. Зростаючі вимоги до якості життя осіб з порушеннями зору, необхідність забезпечення їхньої безпеки в умовах складного міського середовища, а також посилений запит на доступність стимулюють впровадження інновацій у сфері асистивних пристроїв. Однією з найбільш динамічно розвинутих і перспективних галузей є носима електроніка, де застосування сучасних електронних систем просторового сканування дозволяє досягати стабільних результатів у розширенні навігаційних можливостей людини незалежно від зовнішніх умов.

Забезпечення надійної просторової орієнтації є ключовим фактором безпечного та самостійного пересування. Для цього використовуються інтелектуальні системи, здатні в режимі реального часу автоматично сканувати навколишній простір, виявляти перешкоди та транслювати цю інформацію користувачеві через альтернативні канали сприйняття – зокрема, за допомогою тактильного зворотного зв'язку. Застосування таких технологій не лише підвищує рівень індивідуальної мобільності, але й значно знижує психологічне навантаження, зменшує ризики травматизму та дозволяє оперативно реагувати на динамічні зміни в середовищі.

В умовах постійного ускладнення міської інфраструктури, електронні системи просторового сканування стають невід'ємною частиною сучасного безбар'єрного простору. Їх використання сприяє переходу до більш інтуїтивної та технологічно обґрунтованої навігації, в якій дистанція до об'єктів підлягає безперервному моніторингу з високою точністю. Особливо актуальним є розробка таких систем у формфакторі компактних та модульних натільних комплексів, де за допомогою доступних мікроконтролерів та сучасних датчиків можна досягти істотного підвищення ефективності сканування без обтяження користувача та значних фінансових витрат.

Метою дипломної роботи є розробка і практична реалізація автоматизованої системи просторової орієнтації на базі мікроконтролера, матричних сенсорів відстані та вузлів тактильного зворотного зв'язку. У роботі розглянуто схемотехнічні

особливості побудови таких пристроїв, принципи їх функціонування, засоби обробки сенсорних даних, а також переваги, недоліки й перспективи подальшого розвитку модульної архітектури. Особлива увага приділяється практичним аспектам апаратної реалізації системи керування та розподіленої комутації.

1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ТА ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ

Протягом усієї історії людство намагалося подолати обмеження, що накладають хвороби, травми чи природжені особливості організму. Перші спроби створити засоби, які здатні частково компенсувати втрату функцій, спостерігаються з початку використання людьми інструментів. Дерев'яні милиці та протези, примітивні слухові ріжки, тростини для людей з порушенням зору. Ці, далекі від досконалості, пристосування заклали фундамент для подальшого розвитку допоміжних приладів, засобів, що дають можливість людині залишатись активною та соціально інтегрованою.

Виділяється два ключові чинники, які продиктовані потребами у подібних технологіях. По-перше, необхідність відновлення чи підтримки базових функцій організму: зору, слуху, руху, мовлення. Військові травми, вікові зміни, робочі аварії, вроджені вади створюють ситуації, коли людина без допоміжних засобів втрачає можливість повноцінно жити. По-друге, соціальне питання – прагнення зберегти якість життя, комунікацію та працездатність. Інклюзивність стає не лише гуманітарною цінністю, а й економічною необхідністю, робота й громадське життя неможливе без спеціальних пристроїв.

Сучасні допоміжні прилади виходять за рамки медичного приладдя. Вони охоплюють сфери пересування, професійної діяльності, навчання, побуту й дозвілля. Ці допоміжні прилади об'єднує мета – компенсація або зміщення втрачених функцій та створення рівних можливостей для всіх людей, незалежно від фізичних чи сенсорних обмежень.

1.1 Стандарт допоміжних пристроїв

Величезна різноманітність рішень потребує впорядкованості та класифікації, найпоширенішою є стандарт ISO 9999 «Assistive products for person with disability – Classification and terminology» [1]. Стандарт розподіляє всі допоміжні продукти за функціональним призначенням.

1.1.1 Засоби для пересування

Допомагають людям з порушенням рухливості переміщення як у межах житлового простору, так і на вулиці.

Виділяються види засобів пересування, наприклад, допоміжні засоби для ходьби, серед яких тростини, милиці(рис. 1.1) та ходунки, вони допомагають підтримувати рівновагу і дозволяють безпечно пересуватися на короткі відстані [2].



Рисунок 1.1 – Приклад засобу для ходьби.

Інший вид – засоби з колісною основою, що включають механічні та електричні інвалідні візки(рисунок 1.2), ролатори, також сучасні екзоскелети та платформи для підйому, які значно розширюють рухливість переміщення користувача [3].



Рисунок 1.2 – Приклад засобу для пересування з колісною основою.

1.1.2 Засоби для відпочинку, дозвілля

Забезпечують активну участь людини в навчальному процесі та дозвіллі. Підкласами є навчальні та тренувальні пристрої для орієнтування, такі як тактильні карти, макети місцевості (рис. 1.3), аудіо-навігаційні системи [4]. Також пристрої для участі у спортивних або творчих активностях, адаптовані під обмежені можливості

користувачів. Вони дозволяють людям з інвалідністю брати активну участь у соціальному житті та дозвіллі.



Рисунок 1.3 – Тактильний макет місцевості.

1.1.3 Засоби для орієнтування, безпеки та попередження

Забезпечують навігацію у просторі та попередження про небезпеку. Підкласами є системи попередження, наприклад, акустичні світлофори, датчики диму і газу з тактильними чи звуковими сигналами, а також електронні навігаційні допоміжні пристрої – «розумні» тростини (рис. 1.4) [5], GPS-навігатори з системами з камерами й сенсорами для обходу перешкод [6]. Ці пристрої підвищують безпеку людину і дозволяють їй пересуватися незалежно.



Рисунок 1.4 – Розумна тростина.

1.1.4 Засоби підтримки в побуті

Полегшують використання повсякденних завдань. Підкласами є кухонні та гігієнічні пристрої з адаптивними механізмами або звуковими чи тактильними індикаторами, наприклад, ваги і термометри з голосовим повідомленням, спеціальні столові прибори (рис. 1.5), пристосування одягання та роздягання, ванни та душові

крісла. Дозволяють людям з інвалідністю залишатися максимально самостійними у побуті.



Рисунок 1.5 – Приклад спеціального столового прибору.

1.1.5 Засоби професійної діяльності та праці

Забезпечують доступ до робочого місця та виконання професійних обов’язків. Регульовані столи та робочі платформи (рис. 1.6), адаптовані промислові інструменти, роботизовані помічники, спеціальне програмне забезпечення для створення доступних інтерфейсів та альтернативні засоби введення інформації. Ці пристрої дозволяють людям з інвалідністю працювати ефективно і безпечно.



Рисунок 1.6 – Роботизована платформа.

1.1.6 Засоби для підтримки органів чуття

Допомагають людям із порушеннями зору або слуху.

Підклас пристроїв для зору включає електронні лупи, окуляри з цифровим підсиленням зображення та дисплеї Брайля (рис. 1.7) [7].



Рисунок 1.7 – Дисплей Брайля.

Підклас пристроїв для слуху охоплює слухові апарати та кохлеарні імпланти(рис. 1.8), а також вібраційні та тактильні системи сповіщення, наприклад браслети або ремені, що сигналізують про дзвінок телефону чи будинок [8].

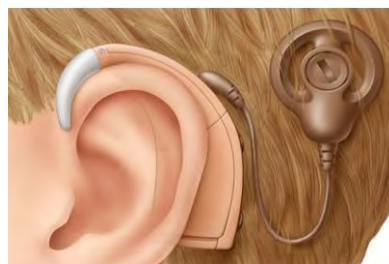


Рисунок 1.8 – Кохлеарний імплантат.

1.2 Огляд допоміжних пристроїв призначених для людей з порушенням зору

З переліку допоміжних пристроїв важливо звернути увагу на ті, що призначені для людей з порушенням зору, оскільки вони забезпечують орієнтацію у просторі, доступ до інформації, безпеку та можливість вести незалежне життя. Такі пристрої мають довгу історію розвитку і поєднують різні технології – від простих тактильних і звукових засобів до сучасних цифрових і електронних рішень із сенсорами, штучним інтелектом та мобільними додатками. Одними з найстаріших і водночас ефективних є тактильні пристрої, такі як брайлівські дисплеї та принтери Брайля, що дозволяють читати і писати текст, а також тактильні карти і макети місцевості для орієнтації в приміщеннях і на вулиці.

1.2.1 Відповідність пристроїв для людей з порушенням зору до стандарту

Сучасні моделі доповнені електронними сенсорами, які передають інформацію через вібрацію або тактильні сигнали, як у «розумних» тростинах, що сигналізують про перешкоди в реальному часі, або тактильну плитку. Акустичні та звукові системи допомагають орієнтуватися у просторі та попереджати про небезпеку, сюди належать

акустичні світлофори, голосові асистенти та мобільні додатки [9]. Приклади сучасних рішень включають аудіо-навігатори, інтегровані зі смартфонами та браслети, що через звукові сигнали і вібрацію повідомляють про наближення перешкод.

Електронні та цифрові пристрої дозволяють значно розширити можливості користувачів: електронні лупи з високою розділовою здатністю, портативні сканери тексту з голосовим відтворенням, окуляри з підсилення зображення, а також складні системи на кшталт LLM-Glasses, які поєднують камери, штучний інтелект та навігаційні алгоритми для виявлення перешкод і повідомлення про них користувачу [10]. Програмне забезпечення доступності включає екранні зчитувачі, програми збільшення екрану, системи синтезу мови та голосового керування, наприклад, JAWS, NVDA, ZoomText, що дозволяють працювати з текстами, браузерами, електронною поштою та іншими цифровими ресурсами [11].

1.2.2 Сучасні рішення для просторової орієнтації людей з порушення

зору

Сучасні рішення для допомоги людям з порушенням зору в орієнтації на місцевості базуються переважно на двох основних принципах: використання звукових сигналів і застосування тростин або інших тактильних засобів. Традиційна біла тростина і сьогодні залишається одним із найпоширеніших і доступних інструментів для орієнтування. Вона дозволяє виявляти фізичні перешкоди, нерівності на дорозі, бордюри та інші об'єкти безпосередньо на шляху користувача [12]. Проте цей метод має очевидні обмеження – тростина не дає можливості передбачати перешкоди на відстані, не повідомляє про небезпеку, яка знаходиться вище рівня пояса, і потребує постійного фізичного контакту з навколишнім середовищем. Для підвищення рівня безпеки та комфорту створені електронні «розумні» тростини з ультразвуковими сенсорами, GPS-навігацією та навіть підключенням до смартфонів. Вони здатні попереджати користувача про перешкоди на відстані, але здебільшого реалізують це через звукові або вібраційні сигнали, що інколи створює нові труднощі.

Звукові системи, які використовуються в мобільних додатках, GPS-навігаторах чи спеціалізованих окулярах, також дозволяють отримувати інформацію про напрямок руху, розташування об'єктів або наближення до потрібної точки. Проте надмірна

залежність від аудіо сигналів призводить до перевантаження слухового каналу, який для людей з вадами зору є основним інструментом взаємодії з навколишнім світом. У міському середовищі це може бути особливо небезпечно, адже фонові шуми від транспорту та інших людей знижують ефективність таких систем, а використання навушників чи голосових підказок інколи навпаки позбавляє користувача можливості своєчасно почути сигнали реальної небезпеки. Крім того, сучасні пристрої часто мають високу вартість, потребують підзарядки, а також складні у використанні для людей старшого віку.

Незважаючи на значний прогрес у створенні сучасних засобів орієнтації, залишається кілька ключових проблем, які ще не отримали ефективного вирішення:

- 1) більшість рішень базується на використанні слухових підказок, що призводить до перевантаження слухового каналу. Для незрячої людини слух є основним сенсом взаємодії з навколишнім середовищем, і надмірна кількість сигналів може не лише знизити ефективність орієнтування, а й поставити під загрозу безпеку, адже важливі звуки, як-от шум транспорту чи голоси людей, можуть бути пропущені.
- 2) існуючі пристрої часто орієнтовані на виявлення лише окремих типів перешкод або працюють у вузькому секторі, що не дає повного уявлення про простір [13].
- 3) складність використання, необхідність постійної підзарядки та висока вартість роблять їх недоступними для значної частини потенційних користувачів. Нарешті, відсутність універсальної інтеграції у повсякденне життя призводить до того, що багато людей з порушенням зору продовжують покладатися виключно на традиційну тростину [14].

Останні роки ознаменувалися активним розвитком електронних навігаційних допоміжних пристроїв (Electronic Travel Aids, ETAs), які інтегрують сенсорні технології з інтуїтивними формами зворотного зв'язку. Найбільш поширеними комерційними аналогами, які втілюють принцип виявлення перешкод за допомогою сенсорів та передачі інформації через вібрацію, є так звані «розумні» тростини. Наприклад, WeWALK Smart Cane – це насадка, яка кріпиться до традиційної білої тростини, оснащена ультразвуковим сенсором, що здатний виявляти навісні перешкоди (гілки, знаки, тощо) на рівні вище пояса [15]. Пристрій використовує гаптичний зворотний зв'язок (вібрацію в ручці) та звукові сигнали для оповіщення

користувача. Дослідницькі проекти, такі як Sense Stride, також підтверджують ефективність інтеграції час пролітних сенсорів для високоточної оцінки відстані та системи спрямованих вібромоторів, демонструючи низьку затримку реакції (близько 50 мілісекунд) від виявлення до тактильного сигналу [16].

Прямими аналогами запропонованого проекту є розробки «розумних» окулярів, які використовують гаптичний зворотний зв'язок на голові. Комерційні моделі, як-от окуляри dotLumen або Fovionics AI Companion & Haptic, поєднують розширену обробку зображень за допомогою штучного інтелекту з тактильною системою навігації [17, 18]. Ці пристрої використовують мініатюрні вібраційні приводи, розташовані безпосередньо в оправі або на лобі, для передачі інформації про напрямки та відстані до перешкоди. Цей підхід створює новий сенсорний канал, який дозволяє користувачеві «відчувати» навколишній простір без необхідності утримувати додаткові пристрої в руках. Це забезпечує підвищення просторової обізнаності та безпеки, особливо при виявленні перешкод у верхній частині простору, які традиційна тростина оминає.

Попри значний прогрес у розробці звукових та візуальних систем допомоги, саме гаптичний канал комунікації розглядається як оптимальне рішення для уникнення інформаційного перевантаження. Як вже було зазначено, надмірна залежність від аудіо сигналів, голосових підказок та звукових попереджень ускладнює орієнтацію, особливо у шумних міських середовищах, де фонові шуми можуть заглушити важливі сигнали або відволікають слуховий аналізатор від реальних небезпек [19]. Таким чином, розробка допоміжного пристрою тактильного зворотного зв'язку, який інтегрується у легку оправу окулярів, є актуальною та має потенціал вирішити ключову проблему, створивши новий, неконкуруючий сенсорний канал для просторової орієнтації.

1.3 Обґрунтування запропонованого рішення

Для розробки приладу, ключовим елементом схеми є метод вимірювання відстані. Сучасні методи вимірювання відстані класифікуються залежно від типу випромінювання, яке використовується для визначення положення об'єкта. Найпоширенішими серед них є ультразвукові, інфрачервоні та оптичні (лазерні) методи. Ультразвуковий метод ґрунтується на випромінюванні звукових хвиль

високої частоти (вище порогу чутності людини, >20 кГц). Ультразвуковий датчик випромінює звуковий імпульс і вимірює час, за який цей імпульс відбивається від об'єкта і повертається назад. На основі швидкості звуку в повітрі [20]. Перевагами є стійкість до умов освітлення, робота з прозорими або відбивними поверхнями, де оптичні методи можуть давати похибки, та можливість виявлення об'єктів з м'якою або нерівномірною поверхнею (тканина, пінопласт, тощо), які можуть погано відбивати світло, але добре звук. Головним недоліком є чутливість до навколишнього середовища: температура, вологість, атмосферний тиск, ці параметри впливають на швидкість звуку, а отже і на точність вимірювання.

Інфрачервоний метод полягає у використанні ІЧ-променю, який відбивається від поверхні об'єкта. Відстань визначається або за інтенсивність відбитого світла, або за тригонометричним методом (кут між переданим і прийнятим променем) [21]. До переваг входить висока швидкість реакції, вимірювання відбувається майже миттєво завдяки фіксації проміння світла. Також потрібно зауважити, що ІЧ-сенсори компактні та легко інтегруються в електронні системи, завдяки малим габаритам, можливості встановлення в обмеженому просторі та низькому енергоспоживанні. Головним недоліком є залежність від властивостей поверхні. Пряме сонячне світло або яскраві джерела світла можуть спричиняти помилкові спрацювання або знижувати точність. Також не менш важливим недоліком є залежність від властивостей поверхні, тобто блискучі, темні або напівпрозорі об'єкти можуть погано відбивати ІЧ-промені.

Оптичний Time of Flight метод базується за принципом прольоту часу: випромінюється лазерний імпульс, і фіксується час, за який він повертається після відбиття від об'єкта. Ті ж самі ІЧ-промені, але зовсім інший метод вимірювання відстані, завдяки якому можна досягти високої точності незалежно від властивостей поверхні об'єкта. Адже фіксується час, а не інтенсивність проміння [22]. До переваг також відноситься стабільність вимірювання, похибка становить менше 1 см навіть на відстані в кілька метрів. Недоліками є більша вартість порівняно з УЗ та ІЧ датчиками та складніша інтеграція.

Для реалізації пристрою орієнтування для людей з порушенням зору найкраще відповідає оптичний метод вимірювання відстані. Цей метод забезпечує високу точність незалежно від кольору, структури або освітленості об'єкта, що є критично важливим. На відміну від ультразвукових чи інфрачервоних методів базованих на

інтенсивності променю, ToF вимірювання менш схильне до спотворень від зовнішніх факторів, таких як температура, вологість або стороннє освітлення. Також метод забезпечує високу стабільність і частоту оновлення даних, що важливо для роботи в режимі реального часу.

Запропонований пристрій із тактильним зворотним контролем має потенціал вирішити ці проблеми завдяки створенню нового каналу комунікації, що не конкурує зі слухом чи зором, а доповнює їх. Використання сенсорів для виявлення перешкод у різних напрямках дозволяє транслювати інформацію у вигляді вібрацій або тактильних імпульсів, розташованих у зручних точках на тілі, наприклад на зап'ясті або у вигляді жилета. Це дає користувачеві можливість «відчувати» навколишній простір і розпізнавати наближення об'єктів без необхідності відволікатися на голосові повідомлення чи тримати додаткові пристрої в руках. Такий підхід робить орієнтацію більш інтуїтивною і природною, знижує ризик інформаційного перевантаження та створює відчуття впевненості у будь-якому середовищі — від тихих приміщень до жвавих міських вулиць. Крім того, у разі правильної реалізації він може бути доступним за ціною та простим у використанні, що відкриє можливість для широкого впровадження серед людей з вадами зору, підвищивши рівень їхньої незалежності та безпеки.

1.4 Постановка завдання та вимог до розробки системи

1.4.1 Умови роботи

Проектована автоматизована система просторової орієнтації розробляється як натільний пристрій повсякденного використання. Це накладає низку жорстких вимог до її ергономіки, автономності та стійкості до зовнішніх впливів. Експлуатаційна модель комплексу передбачає два основні сценарії використання, які генерують різні типи навантажень на апаратну та програмну частини.

Першим ключовим сценарієм є навігація у закритих приміщеннях, таких як коридори, кімнати, сходові клітки та дверні отвори. Умови такого середовища характеризуються відносно стабільним рівнем освітлення, але водночас наявністю великої кількості статичних і динамічних перешкод на малих дистанціях. Відповідно, алгоритм системи має забезпечувати високу частоту оновлення даних для миттєвої

реакції на появу об'єктів у ближній зоні. Основне енергетичне та обчислювальне навантаження у цьому режимі припадає на обчислювальне ядро системи та електронні вузли керування актуаторами, оскільки елементи гаптичного зв'язку працюватимуть у режимі високої інтенсивності.

Другим важливим сценарієм є навігація на відкритому просторі, зокрема на вулицях, тротуарах та у паркових зонах. Головним фактором впливу тут виступає інтенсивне сонячне випромінювання. Оскільки в основі апаратної частини лежать датчики Time-of-Flight, що працюють в інфрачервоному спектрі, пряме сонячне світло генерує потужні оптичні завади. Програмне забезпечення повинно містити ефективні алгоритми математичної фільтрації такого шуму. Крім того, на відкритому просторі робочий радіус дії системи значно розширюється, що переводить інфрачервоні випромінювачі датчиків у режим максимального споживання струму.

На розробку також впливають специфічні фізіологічні фактори. Окремої уваги потребує проблема побічного акустичного шуму. Вібромотори під час роботи неминуче генерують звукові коливання, а для осіб з порушеннями зору слух є критично важливим і часто єдиним каналом сприйняття навколишньої дійсності. Тому алгоритми формування керуючих електричних сигналів та внутрішня архітектура 3D-друкованого корпусу мають зводити до мінімуму акустичний резонанс пластику. Також необхідно враховувати біологічний ефект тактильної адаптації, через який безперервна монотонна вібрація швидко перестає адекватно сприйматися шкірними рецепторами. Для розв'язання цієї проблеми система повинна генерувати виключно пульсуючі гаптичні сигнали, тривалість пауз між якими динамічно адаптується до просторової ситуації.

На рисунку 1.9 зображена діаграма прецедентів.



Рисунок 1.9 – Діаграма прецедентів

Для успішної реалізації описаних сценаріїв використання та забезпечення стабільної роботи системи в заданих умовах експлуатації, необхідно сформулювати чіткий перелік критеріїв до її проектування. Виходячи з функціонального призначення, виникає безпосередня потреба розробити загальну структурну схему системи, здійснити обґрунтований вибір сучасної мікроелектронної бази та спроектувати електричну принципову схему. Разом з цим, критично важливим етапом є розробка оптимізованого програмно-алгоритмічного забезпечення, яке керуватиме апаратною частиною в режимі реального часу. Щоб гарантувати відповідність кінцевого результату поставленим цілям, усі обмеження, стандарти та завдання формалізовано у вигляді структурованих технічних і загальних вимог, що наведені нижче.

1.4.2 Технічні вимоги

- **Функціональні вимоги:** Система повинна забезпечувати безперервне просторове сканування в трьох незалежних напрямках (ліва, центральна та права зони) за допомогою матричних далекомірів Time-of-Flight. Програмне забезпечення має автоматично розпізнавати підключені сенсори, в режимі реального часу конвертувати виміряну відстань у тактильний відгук відповідної

інтенсивності. Додатково система повинна забезпечувати апаратний контроль процесу заряджання вбудованого акумулятора;

- **Нефункціональні вимоги:** Головним критерієм якості є робота в режимі жорсткого реального часу. Затримка між виявленням перешкоди та генерацією вібрації не повинна перевищувати 50 мс для уникнення просторової дезорієнтації користувача. Пристрій повинен мати високу енергоефективність (автономна робота не менше 4–6 годин), бути стійким до інфрачервоного сонячного засвічення та мати мінімальну масу, враховуючи натільний формфактор у вигляді окулярів;
- **Вимоги до даних:** Обробка даних відбувається виключно в оперативній пам'яті (RAM) мікроконтролера типу «на льоту», без використання енергонезалежних баз даних чи зовнішніх накопичувачів. Вхідні дані являють собою числові масиви значень дистанції у міліметрах (від 0 до цільового максимуму сенсора). Вихідні дані – розраховані значення шпаруватості ШІМ-сигналу (0–100%);
- **Вимоги до взаємодії:** Апаратна взаємодія між керуючим ядром та периферією реалізується через цифрову шину I2C (зчитування сенсорів) та дискретні лінії GPIO (керування режимами сну та генерація ШІМ). Фізичний інтерфейс користувача обмежується портом USB Type-C, а інформаційна взаємодія відбувається виключно через односторонній гаптичний (вібраційний) канал зв'язку;
- **Вимоги до середовища:** Апаратним середовищем виконання виступає мікроконтролер, що працює за архітектурою головного циклу (bare-metal) без розгортання високорівневих операційних систем. Фізичним середовищем експлуатації є зовнішні умови (приміщення та вулиця) з допустимим температурним діапазоном від -10°C до +40°C.

1.4.3 Загальні вимоги

- **Вимоги до документації:** Пакет конструкторської та технічної документації повинен обов'язково включати загальну структурну схему системи, яка детально відображає її архітектуру, логічну організацію та інформаційні зв'язки між основними функціональними вузлами. Також документація має містити повний

перелік елементів із чітким зазначенням їхніх найменувань, технічних характеристик. Графічна частина проєкту повинна містити електричну принципову схему та відповідні файли топології друкованої плати. Конструкція корпусу має супроводжуватися складальними креслениками, виконаними. Алгоритмічна складова має бути детально описана за допомогою блок-схем відповідно до чинних стандартів ДСТУ/ISO;

- **Вимоги до розробки:** Програмно-апаратна архітектура будується за принципом жорсткої модульності. Впровадження алгоритму динамічної переадресації має гарантувати повну апаратну взаємозамінність та повторюваність ToF-сенсорів без необхідності ручного програмного коду при ремонті. Прошивка повинна бути гнучкою, з можливістю швидкого калібрування порогових дистанцій реагування;
- **Вимоги до тестування:** План тестування зобов'язаний включати перевірку безконфліктної ініціалізації шини I2C, інструментальну верифікацію максимальної та мінімальної дистанції виявлення перешкод в лабораторних умовах і на відкритому просторі (оцінка впливу сонячного шуму). Головними критеріями прийняття є стабільна робота системи без програмних збоїв протягом повного циклу розряду акумулятора та підтверджена тактильна розпізнаваність гаптичного відгуку.

1.4.4 Завдання

Для досягнення головної мети дипломного проєкту – створення надійної, автономної та ергономічної системи просторової орієнтації з гаптичним зворотним зв'язком необхідно послідовно вирішити комплекс взаємопов'язаних інженерних, алгоритмічних та конструкторських завдань. Весь цикл розробки розділяється на декілька ключових етапів, кожен з яких вимагає проведення відповідних розрахунків, обґрунтувань та практичної реалізації. Загальний масив завдань проєкту охоплює проєктування архітектури, вибір елементної бази, розробку апаратної та програмної частин, а також створення конструкції корпусу.

Першочерговим завданням є проєктування загальної структурної організації системи. Необхідно розробити архітектуру на рівні структурної схеми, визначивши

основні функціональні блоки: сенсорну підсистему для збору просторових даних, обчислювальне ядро для обробки інформації, підсистему гаптичного відгуку для взаємодії з користувачем та підсистему автономного живлення. На цьому етапі вимагається встановити напрямки інформаційних і енергетичних потоків між блоками, обрати оптимальні типи цифрових та аналогових інтерфейсів для їхньої взаємодії, а також закласти фундаментальні принципи модульності системи.

Наступним кроком є визначення критеріїв та обґрунтований вибір елементної бази. Оскільки система планується як натільний пристрій автономного використання, вибір кожного електронного компонента має супроводжуватися суворим аналізом масогабаритних показників та енергоспоживання. Для сенсорної підсистеми необхідно здійснити підбір матричних далекомірів на базі технології Time-of-Flight. Основними критеріями вибору мають стати максимальна та мінімальна дистанції впевненого детектування перешкод, кут огляду, стійкість до інфрачервоного сонячного засвічення, а також підтримка цифрової шини керування та апаратних ліній переривань. Для обчислювального ядра слід обрати мікроконтролер, здатний забезпечити обробку даних у режимі реального часу, маючи необхідні цифрові інтерфейси, достатню кількість каналів широтно-імпульсної модуляції та розширені режими енергозбереження. Щодо підсистеми гаптичного зворотного зв'язку, вимагається проаналізувати та обрати оптимальний тип вібромоторів, враховуючи їхні резонансні частоти, час відгуку та габарити, а також підібрати електронні ключі для безпечного керування ними. Для підсистеми живлення потрібно обрати інтегральні рішення для контролю заряду літій-полімерного акумулятора та стабілізації напруги.

На основі обраної елементної бази висувається завдання розробки електричної принципової схеми. Це передбачає розрахунок номіналів усіх пасивних компонентів, розробку ланцюгів живлення із забезпеченням гальванічної розв'язки або якісної фільтрації цифрових ліній від силових контурів актуаторів для уникнення електромагнітних завад.

Після затвердження електричної схеми необхідно спроектувати топологію друкованої плати у спеціалізованому середовищі автоматизованого проєктування. Це завдання включає щільне компонування елементів з урахуванням жорстких просторових обмежень майбутнього корпусу-оправи. Вимагається здійснити трасування сигнальних ліній із дотриманням правил електромагнітної сумісності,

розвести силові полігони живлення з урахуванням пікових струмових навантажень під час одночасної роботи всіх вібромоторів, а також передбачити технологічні майданчики для виробництва.

Апаратна частина є лише середовищем для виконання математичних операцій, тому окремим великим напрямком є розробка програмно-алгоритмічного забезпечення. Програмне забезпечення повинно працювати за архітектурою жорсткого реального часу. Необхідно реалізувати алгоритм динамічної ініціалізації периферії для безконфліктного опитування кількох ідентичних далекомірів на одній цифровій шині. Важливим завданням є розробка математичної моделі конвертації даних, яка виконуватиме цифрову фільтрацію оптичного шуму та перетворюватиме дистанцію в керуючі ШІМ-сигнали за обернено пропорційною залежністю з урахуванням порогових зон безпеки. Додатково слід впровадити алгоритми керування енергоспоживанням для циклічного переведення компонентів у режим глибокого сну.

Оскільки система є натільним асистивним пристроєм для осіб з порушеннями зору, критичним завданням є проєктування ергономічної конструкції корпусу за допомогою систем комп'ютерного тривимірного моделювання. Необхідно розробити дизайн у формфакторі стандартної оправы окулярів із правильним розподілом маси, розмістивши обчислювальний модуль фронтально, а акумулятор та актуатори – у дужках. Вимагається спроектувати внутрішню архітектуру дужок так, щоб забезпечити максимальну передачу механічних коливань на шкіру користувача, мінімізуючи при цьому побічний акустичний резонанс пластику, а також розробити надійні шарнірні з'єднання.

Фінальним етапом роботи є комплексне тестування та верифікація системи. Завдання передбачає розробку методології експериментальних випробувань створеного прототипу. Необхідно перевірити коректність роботи програмної переадресації, провести інструментальне вимірювання дистанцій виявлення перешкод з різною відбивною здатністю та протестувати стійкість сенсорів до сонячного випромінювання на відкритому просторі. Також вимагається оцінити фізіологічний комфорт сприйняття розробленої системи гаптичних сигналів кінцевим користувачем.

2. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТА ПІДБІР КОМПОНЕНТІВ

2.1 Розробка структурної схеми

Пристрій просторової орієнтації має складатись з таких компонентів:

- Корпус, який формою має імітувати оправу окулярів;
- Оптичні далекоміри – 3 одиниці;
- Вібромотори – 3 одиниці;
- Драйвери двигунів – 3 одиниці;
- Мікроконтролер;
- Блок живлення;
- Елементи з'єднання.

В структурній схемі ігноруються такі елементи системи як корпус та елементи з'єднання, адже їх функціонал не розглядається в абстракції структурної схеми.

На рис.2.1 та додатку А показана структурна схема системи.

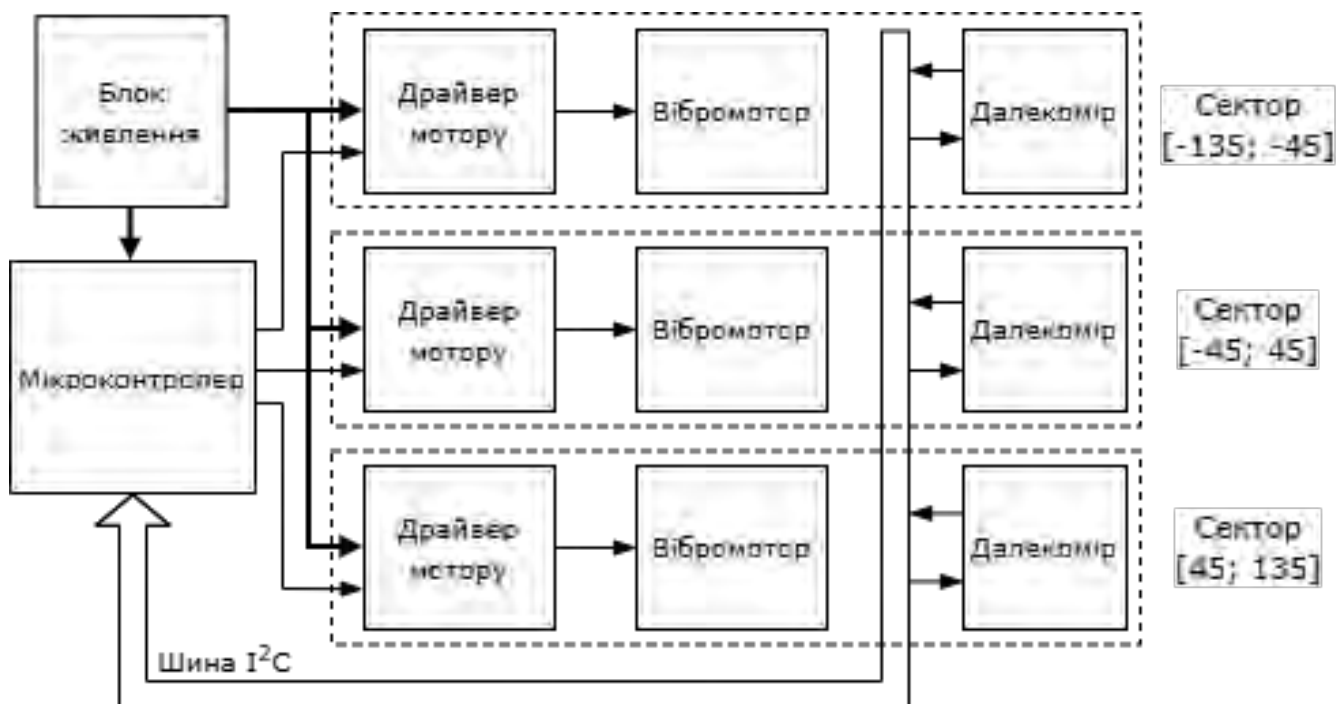


Рисунок 2.1 – Структурна схема

Запропонована структурна схема наочно відображає апаратно-логічну архітектуру розроблюваної системи просторової орієнтації. Зображена конфігурація базується на принципах модульності та чіткого розподілу інформаційних і

енергетичних потоків. Усю систему умовно розділено на центральний обчислювальний вузол, підсистему енергозабезпечення та три ідентичні периферійні канали, кожен з яких відповідає за сканування простору та тактильну індикацію у строго визначеному секторі [23].

Центральним керуючим елементом архітектури виступає мікроконтролер. Він виконує функції збору просторових даних, їхньої математичної обробки та формування керуючих впливів для актуаторів. Енергозабезпечення всіх вузлів здійснюється через єдиний блок живлення. На схемі графічно розмежовано лінії передачі енергії: тонкими лініями позначено живлення цифрової логічної частини мікроконтролера, тоді як потовщені лінії, що ведуть від блоку живлення безпосередньо до драйверів моторів, вказують на силові контури. Таке розділення відображає важливе інженерне рішення, яке дозволяє ізолювати чутливі цифрові кола від електромагнітних завад та просадок напруги, що виникають під час пікових навантажень індуктивних вібромоторів.

Сенсорна підсистема реалізована у вигляді трьох незалежних далекомірів, які гарантують просторове сканування навколишнього середовища. Згідно зі схемою, загальний робочий кут огляду комплексу поділено на три сегменти: лівий сектор охоплює діапазон $[-135^\circ; -45^\circ]$, центральний сектор забезпечує огляд фронтальної зони в межах $[-45^\circ; 45^\circ]$, а правий сектор контролює простір у діапазоні $[45^\circ; 135^\circ]$. Усі три оптичні сенсори підключені до мікроконтролера паралельно через єдину загальну цифрову шину даних I2C, яка зображена широкою інформаційною стрілкою. Така топологія підтверджує закладену раніше вимогу щодо використання алгоритму динамічної програмної переадресації для безконфліктного опитування модулів на спільній шині.

Підсистема гаптичного зворотного зв'язку складається з трьох пар драйверів та відповідних вібромоторів. Вичитавши та обробивши масиви даних про дистанцію до перешкод з далекомірів, мікроконтролер генерує слабоструміві керуючі сигнали, які передаються на входи драйверів моторів. Драйвери діють як силові ключі: вони комутують струм від потовщеної силової лінії блоку живлення та пропорційно керують інтенсивністю вібрації. Кожен з трьох пунктирних блоків на схемі репрезентує апаратно незалежний канал, який жорстко прив'язаний до свого просторового сектора детектування. Саме такий симетричний модульний підхід

гарантує користувачеві формування інтуїтивно зрозумілої та миттєвої тактильної картини навколишнього середовища.

2.2 Розробка схеми системи автоматичного керування

Розробивши структурну схему можна зробити висновок, що об'єктом керування є система вібромоторів, і такий об'єкт керування за властивостями можна виділити як *із розподіленими параметрами*, тобто, у якому значення параметрів у різних його точках не однакові. Також потрібно зазначити, що канали впливу будуть автономні, так як кожному вібромотору відповідає один далекомір, та данні з інших далекомірів не впливають на роботу двигуна.

2.2.1 Об'єкт керування

Вхідні параметри об'єкту керування:

Вхідних параметрів об'єкту керування, всього 3, це окремі далекоміри, які прив'язані до свого сектору вимірювання, та показники кожного сенсору «конвертуються» у інтенсивність вібрації конкретного вібромотору.

X1 – сигнал з першого далекоміру (сектор $[0^\circ; 90^\circ]$);

X2 – сигнал з другого далекоміру (сектор $[90^\circ; 180^\circ]$);

X3 – сигнал з третього далекоміру (сектор $[180^\circ; 270^\circ]$).

Збурення об'єкту керування:

Збурення об'єкту керування пов'язані з нюансами роботи ToF далекомірів, електронною складовою пристрою та вуличними умовами.

f1 – прямі сонячні промені: сонячне світло є інтенсивним джерелом інфрачервоного випромінювання на довжині хвилі 940 нм, яка збігається з робочою частотою далекоміра. Це створює потужний фоновий шум, що фактично «засліплює» приймач, заважаючи йому розрізнити свій власний слабкий відбитий лазерний імпульс;

f2 – перепади напруги в системі;

f3 – дзеркальні поверхні: якщо лазерний промінь влучає в дзеркало або скло під кутом, він відбивається далі, а не повертається назад до датчика. Датчик може «подумати», що попереду порожнеча, хоча там скляні двері;

f4 – опади: краплі води в повітрі розсіюють ІЧ-промінь. Датчик може сприймати густий туман або сильну зливу як «стіну» прямо перед собою;

f5 – вишки зв'язку та Wi-Fi: сильні електромагнітні поля можуть наводити перешкоди на довгі з'єднувальні дроти між датчиками та мікроконтролером. Це може призводити до «зависання» шини даних.

Отже на об'єкті керування впливають збурення **f1** та **f2**. Інші ж складові збурення **F3-F5**, відносяться до системи керування.

Вихідні параметри:

Вихідними параметрами ОК є вібрація окремих вібромоторів.

Y1 – вібромотор відповідний до сектору $[-135^\circ; -45^\circ]$;

Y2 – вібромотор відповідний до сектору $[-45^\circ; 45^\circ]$;

Y3 – вібромотор відповідний до сектору $[45^\circ; 135^\circ]$;

Схематичне зображення об'єкта керування із каналами впливу зображено на рисунку 2.2.

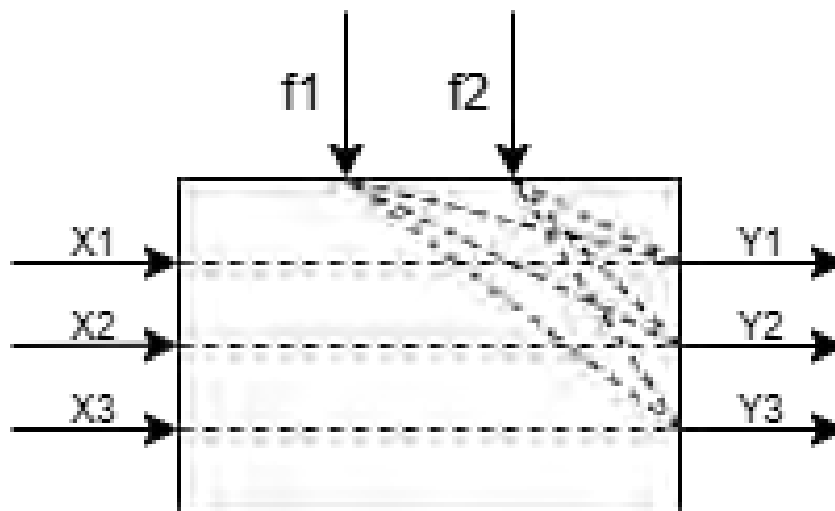


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення ОК із каналами впливу

2.3 Структурна схема автоматичного керування

Пристрій являє собою систему здатну виконувати функції без участі людини. Людина залучається лише на етапах обслуговування та контролю функціонування. Отже пристрій за визначенням є автоматичним.

Вхідним сигналом є інтенсивність відбитого від об'єктів світла, яке проходить через апаратне забезпечення сенсорів та конвертується у показник напруги.

Попередньою обробкою на цьому етапі є прийом сигналу від далекомірів, який являє собою певну напругу, цей показник напруги необхідно обробити(конвертувати) у конкретне значення відстані до перешкоди.

Після обробки, мікроконтролер може оперувати конкретним значенням відстані, а отже завдяки програмному алгоритму, скалярне значення відстані до перешкоди конвертується у інтенсивність вібрації вібромоторів, вони ж ОК.

Після отримання вхідного сигналу, попередньої обробки та конвертації отриманого сигналу, користувач отримує систему з вібромоторів, інтенсивність вібрації яких відповідає до картини перешкод у секторі 270° радіусом до 4 метрів, що є вихідним сигналом.

Для коректної роботи вібромоторів, мікроконтролер у кожен момент часу обробляє їх поточний стан, що є зворотнім зв'язком. Структурна схема автоматизованої системи зображена на рисунку 2.3.

Структурна схема автоматизованої системи зображена у додатку Б.

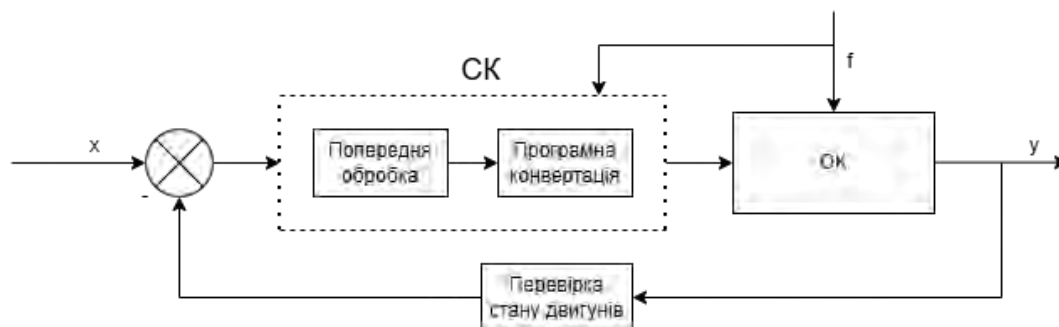


Рисунок 2.3 – Структурна схема автоматизованої системи

де,

ОК – об'єкт керування;

СК – система керування.

2.4 Підбір елементів

Для коректного підбору елементної бази системи необхідно чітко формалізувати технічні вимоги до кожного апаратного вузла. Оскільки загальна структурна схема визначає лише базову функцію блоку, подальша деталізація таких параметрів, як робоча напруга, споживана потужність, швидкодія, стійкість до зовнішніх впливів та життєвий цикл, є критично важливою.

Сформульовані вимоги слугують головним інтеграційним шаблоном, що гарантує апаратну сумісність елементів. Чітке розуміння технічних меж дозволяє уникнути як економічно невиправданого використання надлишкових компонентів, так і закладання недостатньої продуктивності, яка неминуче призводить до системних збоїв. Таким чином, комплексний аналіз вимог є фундаментальним етапом, який гарантує, що спроектована система буде функціональною, надійною та оптимально збалансованою за критерієм вартості та ефективності.

2.4.1 Вимоги до далекомірів

За результатами аналітичного огляду літературних джерел, був обраний метод вимірювання відстані, а саме ToF метод у оптичних далекомірах. Для конкретної побудови вимог потрібно розуміти цільове призначення виробу. Тому вимоги доцільно розділити на експлуатаційні (табл. 2.1) та функціональні (табл. 2.2).

Таблиця 2.1 – Експлуатаційні вимоги

Параметр	Вимога	Обґрунтування
Стійкість до освітлення	Висока стійкість до сонячного світла	“Пряме сонячне світло (особливо ІЧ-складова) є головним ворогом ToF-датчиків. Датчик повинен мати інтегровані алгоритми для компенсації фонового шуму.
Діапазон температур	Широкий промисловий діапазон	Забезпечує надійну роботу як влітку, так і взимку.

Продовження таблиці 2.1

Параметр	Вимога	Обґрунтування
Лазерна Безпека	Клас 1 (безпечний для очей)	Обов'язкова умова для пристроїв, що використовуються в громадських місцях.

Експлуатаційні вимоги описують, як система має працювати, встановлюючи вимірювані критерії якості, швидкодії, надійності, енергоефективності та умов фізичного, тоді як функціональні вимоги визначають, що саме вона повинна робити – її конкретні функції, дії та логіку поведінки (як-от зчитування даних із датчиків чи обробка команд користувача).

Таблиця 2.2 – Функціональні вимоги

Параметр	Вимога	Обґрунтування
Мінімальна Дальність	>200 см(2 метри)	Далекомір повинен мати надійний режим для вимірювання на довгих дистанціях
Максимальна Дальність	Мінімум 400 см і вище (до 10 метрів або більше)	Забезпечує запас для вуличного застосування.
Точність	Типова до 3 см, для довгих дистанцій	Похибка має бути мінімальною і стабільною в усьому діапазоні вимірювання.
Частота Вимірювань	Від 1 Гц до 5 Гц	Достатньо для більшості застосувань контролю. Висока частота (>20 Гц) збільшує енергоспоживання.

Окремо слід зазначити вимоги до габаритів та оптимізації трасування. Модулі далекомірів повинні мати мінімальні фізичні розміри. Зважаючи на необхідність паралельного підключення масиву сенсорів до єдиного мікроконтролера, критичним є мінімізація кількості з'єднувальних провідників. Оптимальним апаратним рішенням є використання стандартизованої цифрової шини I2C. Цей інтерфейс вимагає розведення лише двох сигнальних ліній (SDA, SCL) та контуру живлення (VDD, GND), що суттєво розвантажує топологію друкованої плати.

Енергоспоживання є критичним параметром для портативного пристрою, тому обов'язковою умовою є підтримка датчиком режимів «Low Power» або «Deep Sleep» зі струмом споживання не більше 1 мкА. У комбінації з режимами енергозбереження мікроконтролера (наприклад, «Stop»), система здатна перебувати у стані глибокого спокою більшу частину часу, що є життєво важливим для тривалої автономності [24]. В активному режимі струм споживання далекоміра не повинен перевищувати 20 мА.

Загальна енергоефективність системи забезпечується завдяки короткій тривалості вимірювального циклу та високій швидкодії обчислювального ядра мікроконтролера.

Функціонально пристрій має реалізовувати стратегію подієво-орієнтованого моніторингу. У базовому стані далекомір працює на знижених частотах сканування, самостійно контролюючи простір без залучення ресурсів головного процесора. При фіксації перешкоди в заданих межах внутрішня логіка датчика генерує апаратне переривання, яке миттєво пробуджує мікроконтролер для переходу в режим інтенсивного вимірювання. Такий підхід гарантує максимальну економію заряду акумулятора в умовах вільного простору та миттєву мобілізацію обчислювальних ресурсів для високоточного відстеження об'єкта, щойно він з'являється у зоні сканування.

2.4.2 Вимоги до мікроконтролера

Для реалізації пристрою, архітектура головного обчислювального вузла повинна відповідати суворим критеріям продуктивності та апаратної гнучкості. Оскільки система аналізує просторову інформацію з декількох матричних датчиків у реальному часі, висуваються підвищені вимоги до продуктивності мікроконтролера.

Не менш важливою вимогою є наявність розширеного обсягу енергонезалежної та оперативної пам'яті. Апаратна специфіка роботи з сучасними матричними сенсорами вимагає завантаження базового робочого коду безпосередньо в регістри датчиків під час їхньої ініціалізації, а також виділення значних масивів RAM для буферизації багатозонних просторових кадрів. Обрана платформа повинна мати достатній запас пам'яті, щоб забезпечити стабільну роботу складних програмних драйверів та залишити вільний простір для подальшого масштабування функцій пристрою.

З точки зору апаратної периферії, ключовим фактором є розвантаження центрального ядра під час операцій вводу-виводу. Мікроконтролер зобов'язаний підтримувати технологію прямого доступу до пам'яті (Direct Memory Access) для незалежного та безперервного обслуговування шин зв'язку, таких як I2C. Крім того, вимагається наявність прецизійних таймерів для апаратного генерування ШІМ-

сигналів та розвинена матриця зовнішніх переривань, що дозволить системі миттєво реагувати на апаратні тригери від сенсорів [25].

Орієнтація на автономну роботу в міських умовах диктує жорсткі обмеження щодо енергетичного профілю та габаритів. Обчислювальний центр має підтримувати глибокі режими сну з мікроамперним споживанням і надшвидким пробудженням, щоб максимізувати час роботи від акумулятора. Фізичне виконання кристала у мініатюрних корпусах є обов'язковою умовою для щільного компонування друкованої плати для щільного пристрою.

2.4.3 Вимоги до драйверів моторів

Окрім максимальної компактності, яка є базовою вимогою для проєкту, драйвер двигуна повинен відповідати суворим критеріям енергоефективності та тепловідведення. Оскільки пристрій має закрити корпус, критично важливим є низький опір транзисторів у відкритому стані. Це дозволяє мінімізувати втрати енергії на нагрів самого чипа, що не тільки продовжує життя акумулятора, але й дозволяє системі працювати стабільно без використання громіздких радіаторів або додаткового охолодження. Такий підхід забезпечує високу щільність компонування елементів на платі без ризику перегріву сусідньої чутливої електроніки.

Першочерговою функціональною вимогою до перспективної елементної бази драйверів є забезпечення надійної напівпровідникової або гальванічної розв'язки між чутливою цифровою логікою керування та силовими лініями живлення самих моторів. Оскільки будь-який електромеханічний актуатор за своєю фізичною природою є індуктивним навантаженням, у моменти транзієнтних процесів (вимикання або різкої зміни параметрів керуючого сигналу) на його обмотках неминуче генерується високовольтна зворотна електрорушійна сила (ЕРС самоіндукції). З огляду на це, мікросхема драйвера повинна мати інтегровану архітектуру придушення індуктивних викидів (наприклад, внутрішні шунтуючі діоди або систему апаратного випрямлення), щоб гарантовано унеможливити деградацію та електричний пробій портів майбутнього керуючого мікропроцесора.

З точки зору безпеки системи, драйвер обов'язково повинен мати вбудований комплекс захисних механізмів. Сюди входить автоматичне відключення при

перевантаженні за струмом, захист від перегріву та блокування роботи при критичному зниженні напруги акумулятора. Ці функції перетворюють драйвер з простого «перемикача» на інтелектуальний запобіжник, який захищає двигуни від згорання у разі механічного заклинювання, а акумулятор, від небезпечного глибокого розряду. Наявність таких функцій у середині одного мікро чипа позбавляє необхідності додавати десятки зовнішніх компонентів, що знову ж таки працює на користь компактності.

Для повної синхронізації з мікроконтролером, драйвер має підтримувати логічні рівні 3.3 В і мати режим наднизького споживання у стані спокою. В ідеалі, струм споживання у режимі сну має бути значно меншим за 1 мкА, що дозволяє повністю знеструмити силову частину, поки мікроконтролер чекає на сигнал від далекомірів. Підтримка ШІМ-керування на входах драйвера дає змогу реалізувати плавний рух та точне дозування потужності, що важливо для комфортної взаємодії з користувачем у міському просторі [26].

2.4.4 Вимоги до вібродвигунів

Вимоги до вібродвигунів мають поєднувати інформативність тактильного відгуку з жорсткими обмеженнями щодо енергоспоживання та габаритів. Перш за все, варто розглянути вибір між ексцентриковими двигунами (Eccentric Rotating Mass) (рис. 2.4) та лінійними резонансними актуаторами (Linear Resonant Actuator) (рис. 2.4) [27, 28]. Для асистивного пристрою, ERM є значно вигіднішим варіантом, оскільки він забезпечує набагато чіткіший і швидший відгук. Такі двигуни здатні миттєво запускатися та зупинятися, що дозволяє створювати тактильні малюнки, наприклад, пульсацію, частота якої змінюється залежно від відстані до перешкоди. Окрім того, ERM споживають менше енергії та мають довший термін служби, що критично для пристрою, який працює в інтенсивному міському режимі.

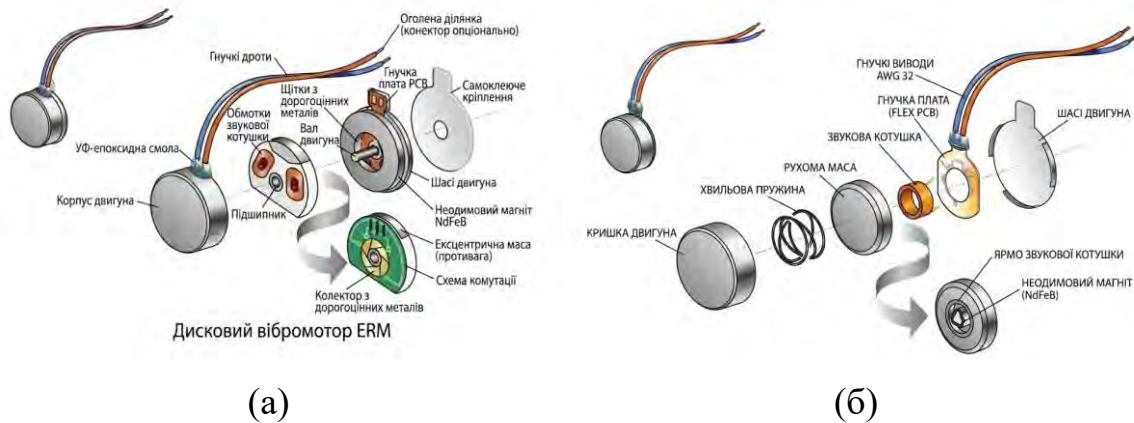


Рисунок 2.4 – Внутрішня будова: а) ексцентрикового двигуна; б) лінійного резонансного актуатора

З точки зору електричних характеристик, вібратор повинен бути повністю сумісним із напругою акумулятора та можливостями драйвера. Робоча напруга в межах 3 – 4 В дозволить уникнути додаткових перетворювачів, що позитивно вплине на компактність. Хоча ми прагнемо до активного споживання системи в межах 20 мА, вібратори зазвичай потребують більше струму (60 – 100 мА) у моменти пікової вібрації. Проте, завдяки використанню ШІМ, з'являється можливість дозувати потужність, подаючи енергію короткими імпульсами. Це дозволить не тільки економити заряд, але й реалізувати інтуїтивно зрозумілий зворотній зв'язок.

Фізичне виконання має відповідати концепції мініатюризації. Найкраще підійдуть «монетні» (coin type) моделі, діаметр яких зазвичай становить 8 – 10 мм, а товщина не перевищує 3 мм. Такий форм-фактор дозволяє розмістити двигун у найбільш зручному місці корпусу, забезпечуючи пряму передачу механічних коливань на шкіру користувача. Важливо також враховувати механічну ізоляцію всередині корпусу, вібрація має бути спрямованою, щоб не створювати зайвих шумів і не впливати на роботу чутливих оптичних датчиків.

2.5 Підбір компонентів згідно вимог

Сформульований у попередньому підрозділі комплекс технічних та експлуатаційних вимог утворює строгий системотехнічний базис. Визначені граничні межі для масогабаритних показників, загального енергетичного балансу, обчислювального потенціалу та умов навколишнього середовища, в яких

функціонуватиме розроблюваний пристрій. Глибока параметризація цих критеріїв дозволяє уникнути абстрактного чи суто емпіричного підходу до проєктування.

Наявність настільки деталізованого профілю вимог слугує ефективним фільтром під час аналізу глобального ринку сучасної електронної компонентної бази. Враховуючи надзвичайно широку номенклатуру доступних сьогодні мікропроцесорних систем, засобів просторової телеметрії та актуаторів, саме неухильне спирання на затверджені вимоги дає змогу здійснити максимально об'єктивний та аргументований підбір. Відповідно, наступним закономірним етапом проєктування є перехід від теоретичних технічних умов до практичного аналізу та вибору конкретних інтегральних мікросхем і периферійних модулів, які здатні разом функціонувати в межах компактної апаратної архітектури.

2.5.1 Вибір оптичного далекоміру

Зважаючи на сформульовані раніше вимоги до сенсорної підсистеми розроблюваного пристрою, інтегральний модуль VL53L7CX [29] (рис. 2.5) постає як безальтернативне та найбільш релевантне рішення. Цей інноваційний матричний оптичний ToF далекомір від компанії STMicroelectronics ідеально та комплексно задовольняє весь спектр висунутих критеріїв, перекриваючи потреби проєкту як на рівні збору просторових даних, так і на етапі апаратної інтеграції.



Рисунок 2.5 – Далекомір VL53L7CX

Відповідаючи на фундаментальну вимогу щодо надійності вимірювань у складних умовах довкілля, зокрема при експлуатації на відкритому повітрі, обраний сенсор містить передовий технологічний принцип прямого вимірювання часу прольоту частки світла [30]. На відміну від класичних рішень, такий підхід гарантує

абсолютний вимір відстані, який детерміновано не залежить від кольору, форми, текстури чи відбивної відстані перешкоди. Більше того, для забезпечення заявленої вимоги щодо стійкості до сонячного світла, VL53L7CX використовує інтегровані в кремнієву структуру алгоритми гістограмної обробки сигналів. Це ефективно нівелює паразитний вплив сильного зовнішнього фонового освітлення, гарантуючи достовірність даних навіть під прямими сонячними променями.

Для задоволення критичної вимоги щодо високої інформаційності, яка є необхідною базою для формування коректного тактильного зворотного зв'язку, сенсор пропонує безпрецедентну просторову роздільну здатність. Замість одномірного вектора відстані, апаратна архітектура датчика з системою мікролінз та матрицею приймачів забезпечує сегментування надширокого поля зору (90 градусів по діагоналі) на 64 незалежні зони вимірювання у конфігурації 8x8, що зображено на рисунку 2.6 [31]. Це дозволяє керуючому мікроконтролеру генерувати розгорнуту двовимірну карту глибини навколишнього простору, точно диференціюючи габарити та положення множинних або нестандартних перешкод.

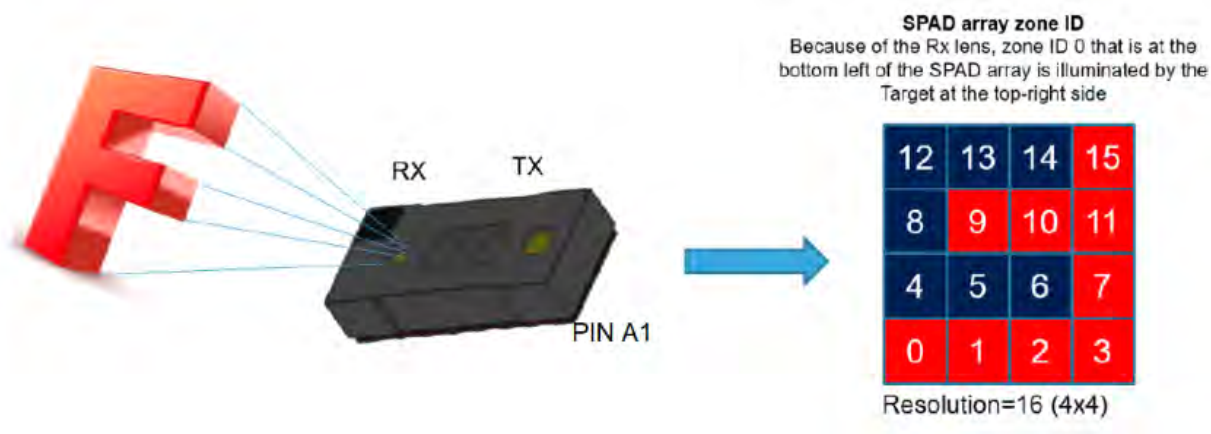


Рисунок 2.6 – Зони вимірювання сенсору

Для математичного підтвердження ефективності обраного поля зору доцільно провести оптичний розрахунок фізичної ширини зони покриття на типовій дистанції виявлення перешкоди. Ширина просторової зони сканування розраховується за тригонометричною формулою (2.1):

$$W = 2 \cdot D \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.1)$$

де,

W – фізична ширина зони сканування на заданій відстані, м;

D – дистанція до об'єкта вимірювання(приймається рівною 1.5 м як стандартна зона реакції пішохода), м;

α – кут огляду сенсора у відповідній площині (горизонтальний кут огляду для LV53L7CX становить 60°), град.

Підставивши визначені параметри у формулу (2.1), отримуємо ширину горизонтальної зони покриття для одного датчика:

$$W = 2 \cdot 1.5 \cdot \tan\left(\frac{60^\circ}{2}\right) = 3 \cdot \tan(30^\circ) \approx 1.73 \text{ [м]}$$

Такий розрахунок доводить, що навіть один центральний сенсор на відстані півтора метра здатен перекрити смугу простору шириною понад 1.7 м. Це повністю охоплює габарити користувача та гарантує надійне виявлення перешкод по курсу руху, пояснюючи доцільність використання саме цього оптичного модуля в архітектурі системи.

Модуль ідеально відповідає жорстким критеріям мініатюризації, енергоефективності та оптимізації трасування. Датчик виконаний у надкомпактному корпусі, що дозволяє легко інтегрувати його у мініатюрні зовнішні модулі. Трансляція масивів телеметричних даних здійснюється через стандартизовану шину I2C, вимагаючи лише двох сигнальних ліній, що критично важливо для розвантаження топології друкованої плати. Вимога щодо можливості розширення системи вирішується апаратною архітектурою сенсора.

2.5.2 Обраний мікроконтролер

В якості головного обчислювального ядра системи було обрано 32-бітний мікроконтролер STM32F411CEU6 (рис. 2.7) від компанії STMicroelectronics [32]. Цей чип належить до лінійки високопродуктивних, але водночас енергоефективних рішень на базі передової архітектури ARM Cortex-M4. Завдяки наявності апаратного модуля обчислень із плаваючою комою та підтримці DSP-інструкцій, даний мікроконтролер ідеально підходить для завдань цифрової обробки сигналів у реальному часі. Це є критично важливим для швидкого аналізу потоку даних від багатозонних матричних далекомірів в умовах мінливого міського середовища, де затримка в обробці сигналу може вплинути на безпеку користувача.

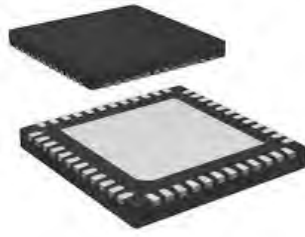


Рисунок 2.7 – STM32F411CEU6

Розшифровка номенклатурної назви чипа повністю розкриває його технічний потенціал та конструктивної особливості, які чітко відповідають жорстким вимогам проєкту. Префікс «STM32» вказує на приналежність до сімейства 32-бітних мікроконтролерів, літера «F» означає базову підгрупу загального призначення, а число «411» ідентифікує конкретну серію «Dynamic Efficiency», оптимізовану для балансу між високою частотою (до 100 МГц) та низьким споживанням енергії. Літера «C» вказує на кількість виводів – 48 пінів, чого цілком достатньо для підключення шини I2C, керування драйвером двигуна та обробки сигналів переривань від датчиків. Наступна літера «E» свідчить про наявність 512 кілобайт вбудованої Flash-пам'яті, що є обов'язковою умовою для розміщення об'ємних програмних драйверів для роботи з оптичними матрицями. Літера «U» позначає тип надкомпактного корпусу UFQFPN, а цифра «6» гарантує стабільну роботу електроніки в індустріальному температурному діапазоні від -40 до +85 °C.

З точки зору відповідності фізичним вимогам асистивного пристрою, мікроконтролер у виконанні UFQFPN48 є безальтернативним вибором завдяки своєму форм-фактору. Цей корпус має габарити всього 7 на 7 міліметрів і характеризується відсутністю виступаючих ніжок. Це дозволяє максимально ущільнити розміщення компонентів на друкованій платі, мінімізуючи загальні розміри виробу. Крім того, такий тип корпусу забезпечує кращу стійкість до механічних пошкоджень та надійність паяних з'єднань при постійних вібраційних навантаженнях, які створюватимуться тактильним двигуном під час роботи пристрою.

Що стосується критичних вимог до енергоспоживання, цей чип повністю задовольняє критерії автономності завдяки технології гнучкого керування живленням. У режимі глибокого сну його власне споживання знижується до мікроамперних значень, що відповідає заявленій вимозі максимального збереження заряду

акумулятора під час «очікування» події. Завдяки контролеру прямого доступу до пам'яті, процесор може блискавично вийти зі сну за апаратним перериванням від далекоміра, швидко опрацювати отриманий масив дистанцій, надіслати керівний сигнал на драйвер вібродвигуна і миттєво повернутися в режим енергозбереження, забезпечуючи безпрецедентну загальну енергоефективність системи.

2.5.3 Вибір драйверу двигуна

Практично ідеальна відповідність до вимог була знайдена у драйвера DRV8837C [33]. Цей драйвер постачається у корпусі WSON-8 розміром всього 2 x 2 мм. Така екстремальна мініатюрність дозволяє розмістити його на платі, майже не збільшуючи загальний об'єм пристрою (рис. 2.8).

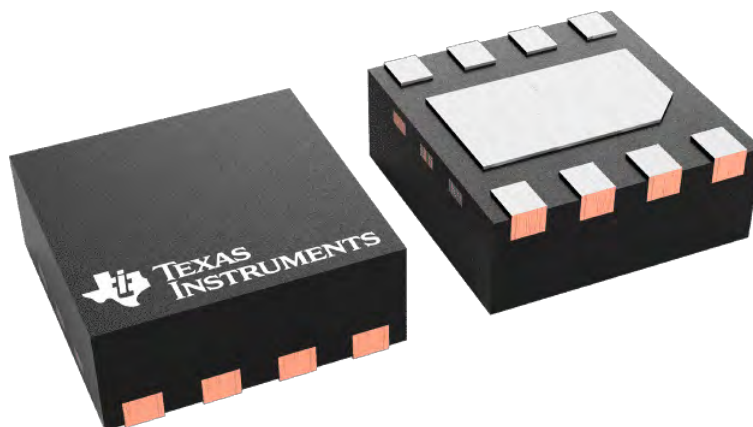


Рисунок 2.8 – DRV8837C

Драйвер повністю відповідає критерію щодо глибокого сну. У режимі сну (nSLEEP) він споживає типово 120 нА, що значно менше порогу в 1 мкА. Це гарантує, що силова частина не буде розряджати акумулятор, поки пристрій чекає на перешкоду. В активному стані низький опір транзисторів (~280 мОм) забезпечує мінімальне виділення тепла навіть при інтенсивній роботі двигунів.

Драйвер працює з логікою 3.3 В мікроконтролера, не потребує додаткових конвертерів рівнів. Підтримує ШІМ керування для плавного регулювання потужності двигунів. Також, у чип вбудовано повний набір систем безпеки. Захист від перевантаження за струмом, перегріву та критичного падіння напруги. Саме той інтелектуальний запобіжник, згаданий у вимогах [34, 35, 36].

2.5.4 Вибір вібромотору

Критично важливим етапом проєктування апаратно-програмного комплексу є вибір підсистеми генерації тактильних сигналів, яка має забезпечувати високу інформативність та мінімальний час відгуку в умовах жорстких масогабаритних обмежень. На основі порівняльного аналізу для реалізації тактильного інтерфейсу обрано безколекторні дискові вібромотори ексцентрикового типу ERM (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – ERM вібромотор

Фундаментальною перевагою дискових ERM-актуаторів є їхня плоска, інкапсульована конструкція. Ексцентрикова маса повністю прихована всередині металевого корпусу товщиною 2–3 мм. Це унеможливорює механічне блокування ротора зовнішніми перешкодами та дозволяє ергономічно інтегрувати мотори в плоскі елементи оправи без створення дискомфорту для користувача.

З точки зору апаратного керування, дискові ERM-мотори демонструють високу лінійність відгуку на зміну керуючої напруги. Це дозволяє максимально ефективно використовувати архітектуру апаратного ШІМ. За допомогою апаратних таймерів система генерує прецизійні ШІМ-сигнали, плавно змінюючи шпаруватість, що пропорційно керує швидкістю обертання ротора та амплітудою вібрації. Такий метод формує інтуїтивно зрозумілі градієнтні переходи для сповіщення про динаміку наближення перешкоди.

У контексті енергетичного балансу обрані актуатори відзначаються низькою стартовою напругою та прийнятним номінальним струмом споживання. Їхня робота у зв'язці з інтегральними драйверами забезпечує ефективну комутацію силових ліній від стабілізованої шини живлення 3.3 В, мінімізуючи втрати та ізолюючи чутливу цифрову логіку мікроконтролера від паразитних індуктивних викидів струму.

2.6 Організація живлення

Проектування підсистеми енергозабезпечення становить один із найскладніших та найвідповідальніших етапів розробки компактної електроніки. З огляду на автономний характер роботи розроблюваного апаратно-програмного комплексу, організація живлення не може розглядатися як набір ізольованих компонентів. Виникає об'єктивна необхідність у формуванні єдиного, синергетичного енергетичного вузла, який має задовольняти суворі критерії мініатюризації, стабільності та експлуатаційної безпеки. Доцільно цей вузол концептуально поділити на три взаємопов'язані блоки: джерело автономного живлення, каскад стабілізації напруги та підсистему заряджання.

2.6.1 Вимоги до джерела автономного живлення

У контексті інтеграції в оправу окулярів першочерговим критерієм вибору акумулятора є масогабаритні показники. Оптимальним рішенням є використання плоских безкорпусних елементів (формат «pouch cell») з високою щільністю енергії. Для стабільного живлення індуктивних навантажень (вібромоторів) комірка повинна мати високу струмовіддачу та низький внутрішній опір, що нівелює просадки напруги при імпульсних навантаженнях. Обов'язковою вимогою є наявність інтегрованого модуля апаратного захисту [36] від струмів короткого замикання, глибокого розряду та перезаряду для гарантування безпеки користувача [37].

Крім того, джерело струму має демонструвати температурну стабільність кривої розряду та високий експлуатаційний ресурс — збереження щонайменше 80% ємності після кількох сотень циклів заряду-розряду. Це є необхідною умовою довговічності всього апаратно-програмного комплексу без потреби передчасного сервісного обслуговування.

2.6.2 Вимоги до каскаду стабілізації напруги

Як відомо, напруга на літій-полімерному акумуляторі не є постійною величиною і в процесі розряду падає з 4.2 В до приблизно 3.0 В. Через це живити чутливу цифрову частину (мікроконтролер та далекоміри) напряму від батареї просто не можна, бо це

призведе до збоїв або взагалі виходу компонентів з ладу. Тому постає задача використати стабілізатор напруги, який буде видавати стабільні 3.3 В незалежно від того, наскільки розряджена батарея.

Варто зазначити, що звичайні лінійні стабілізатори тут не зовсім підходять. По-перше, вони розсіюють зайву напругу у вигляді тепла, тому мають низький коефіцієнт корисної дії. По-друге, і це найголовніше, коли напруга на акумуляторі впаде нижче 3.3 В, лінійний стабілізатор вже не зможе видавати потрібні нам 3.3 В на виході. Пристрій просто вимкнеться, хоча в батареї ще залишатиметься енергія. Тому основною вимогою є використання імпульсного перетворювача, а саме знижувально-підвищувального типу (архітектура Buck-Boost) [38].

Також до стабілізатора висувається вимога швидко реагувати на різкі зміни навантаження. Оскільки в системі є вібромотори, які керуються через ШІМ, струм споживання буде постійно стрибати. Стабілізатор має компенсувати ці імпульси, щоб напруга живлення не просідала. Це дасть змогу використати зовнішній дросель меншого фізичного розміру. Головне при цьому, щоб перетворювач не створював сильних електромагнітних завад, які можуть заважати нормальній передачі даних від датчиків по шині I2C.

2.6.3 Вимоги до заряджання та контролю заряджання

Для компактного натільного пристрою обрано літієвий акумулятор. Оскільки пряме підключення такого елемента до джерела живлення є технологічно неприпустимим через ризик деградації, термічного пошкодження або загоряння, критичною вимогою є інтеграція спеціалізованого контролера заряду.

Головною вимогою до мікросхеми контролера є апаратна підтримка профілю заряджання CC/CV (постійний струм / постійна напруга) [39]. Цей двостадійний алгоритм є стандартом для літієвих джерел струму і гарантує збереження ресурсу акумулятора без передчасної втрати його ємності.

Зважаючи на жорсткі габаритні обмеження корпусу, ємність батареї буде невеликою, що робить неприпустимим використання стандартних струмів заряджання (наприклад, 1 А), які пропонують типові контролери за замовчуванням. Тому обрана мікросхема повинна мати функцію апаратного програмування струму заряду

(наприклад, за допомогою зовнішнього струмозадавального резистора) для точної адаптації під характеристики конкретного акумулятора.

В якості зовнішнього інтерфейсу живлення доцільно імплементувати роз'єм стандарту USB Type-C. Його симетрична конструкція суттєво полегшує підключення на дотик, що є критично важливим ергономічним параметром для користувачів з порушеннями зору. Крім того, для візуального контролю стану системи мікросхема повинна мати логічні виводи для світлодіодної індикації поточного статусу (процес заряджання / заряд завершено).

2.7 Обрані елементи вузлу живлення

2.7.1 Обраний акумулятор

Спираючись на сформульовані вимоги та жорсткі масогабаритні обмеження натільного пристрою, обрано літій-полімерний (Li-Po) акумулятор формфактора 602530 (рис. 2.10). Як конкретний компонент розглядається елемент типу LPW602530 у гнучкій оболонці (формат pouch cell) з фізичними розмірами 6.2x25.5x30.5 мм. Його номінальна ємність становить 420 мА·год при робочій напрузі 3.7 В. Такий вибір є оптимальним інженерним компромісом, що дозволяє розмістити джерело енергії в компактному корпусі без погіршення ергономіки та надмірного збільшення товщини виробу.



Рисунок 2.10 – Літій-полімерний акумулятор

Для математичного підтвердження цього твердження проведемо розрахунок орієнтовного часу автономної роботи. Сумарний усереднений струм споживання системи складається з витрат обчислювального ядра (близько 20 мА), трьох матричних далекомірів (сумарно 60 мА) та трьох вібромоторів. Враховуючи, що піковий струм одного актуатора сягає 80 мА, а середній коефіцієнт їхньої активності під час типового

пересування містом становить 30%, середнє еквівалентне споживання моторів складатиме 72 мА. Відповідно, загальний усереднений струм системи $I_{\text{сер}}$ дорівнює 152 мА. З урахуванням коефіцієнта ефективності використання ємності $\eta = 0.85$, який запобігає глибокому розряду літєвої хімії, час роботи T розраховується за формулою:

$$T = \frac{C \cdot \eta}{I_{\text{сер}}} \quad (2.2)$$

Підставивши фактичні значення обраного елемента, отримуємо:

$$T = \frac{420 \cdot 0.85}{152} \approx 2.35 \text{ год}$$

де,

T – орієнтовний час автономної роботи системи, год;

C – номінальна електрична ємність обраного акумулятора, мА·год;

η – коефіцієнт ефективності використання ємності батареї;

$I_{\text{сер}}$ – загальний усереднений струм споживання апаратної частини системи, мА.

Отриманий результат у понад 2 години 20 хвилин безперервної роботи в активному змішаному режимі є оптимальним для натільного асистивного пристрою, оскільки повністю покриває середню тривалість однієї прогулянки або маршруту до місця призначення.

Крім того, літій-полімерна хімія забезпечує високу струмовіддачу, що гарантує стабільну роботу системи живлення без просадок напруги під час імпульсного включення гальмівного відгуку. Важливим фактором безпеки є наявність інтегрованої плати захисту. Вона автоматично відключає навантаження при критичному падінні напруги або короткому замиканні, що знімає необхідність проектування додаткових захисних кіл і робить пристрій безпечним для кінцевого користувача.

2.7.2 Обраний елемент стабілізації напруги

Для забезпечення стабільного живлення цифрової логіки та сенсорної бази було обрано мікросхему імпульсного перетворювача TPS63001 [40]. Основна причина такого вибору безпосередньо пов'язана зі специфікою розряду літій-полімерного акумулятора: у процесі роботи його напруга поступово падає з 4.2 В до приблизно 3.0

В. При цьому для коректного функціонування мікроконтролера та датчиків відстані потрібна ідеально рівна шина на 3.3 В.

Використання дешевих та поширених лінійних стабілізаторів у даному випадку є інженерно недоцільним. По-перше, при повністю зарядженій батареї вони просто розсіюють зайву напругу у вигляді тепла, знижуючи загальний коефіцієнт корисної дії системи. По-друге, і це найголовніше, коли напруга на акумуляторі впаде нижче порогу в 3.3 В, лінійний стабілізатор перестане видавати потрібний рівень живлення. Пристрій відключиться, хоча в комірці ще залишатиметься корисна енергія. Обрана мікросхема архітектури Buck-Boost вирішує цю проблему: вона автоматично та непомітно перемикається між режимами зниження та підвищення напруги, що дозволяє витягувати з акумулятора максимум ємності аж до його повного розряду.

Ще одним вагомим фактором є здатність обраного стабілізатора адекватно реагувати на різкі зміни навантаження. Оскільки керування вібромоторами здійснюється імпульсно за допомогою ШІМ, загальний струм споживання пристрою постійно стрибає. TPS63001 здатна миттєво компенсувати такі транзйєнтні процеси, завдяки чому напруга живлення не просідає і не викликає випадкового перезавантаження мікроконтролера.

Також варто звернути увагу на топологічні переваги. Цей перетворювач працює на доволі високій частоті (близько 1.5 МГц). На практиці це дає змогу використати зовнішній силовий дросель та фільтруючі конденсатори дуже маленького фізичного розміру (у мініатюрних SMD-корпусах). Це є критично важливою умовою для щільного компонування елементів та економії місця на компактній двошаровій платі розроблюваного пристрою. Таким чином, обраний компонент формує високоефективну та надійну лінію живлення 3.3 В, повністю задовольняючи вимоги портативної системи.

2.7.3 Обрані елементи підсистеми заряджання

Для безпечного та ефективного відновлення ємності літій-полімерного акумулятора було обрано спеціалізовану мікросхему контролера заряду, поширену TP4056 [41]. Цей вибір базується на необхідності правильного обслуговування хімічного джерела живлення, щоб воно не вийшло з ладу після кількох десятків циклів.

Оскільки використання стандартного струму заряджання в 1 А є недопустимим та небезпечним для комірки ємністю 420 мА·год, контролер дозволяє апаратно обмежити цей параметр на безпечному рівні (наприклад, 200–300 мА) за допомогою лише одного зовнішнього струмозадавального резистора.

В якості зовнішнього інтерфейсу живлення застосовано 6-контактну SMD-модифікацію роз'єму USB Type-C. Відмова від повноцінної 24-контактної версії є свідомим інженерним рішенням: оскільки для заряджання достатньо ліній VBUS та GND, використання скороченої версії кардинально спрощує трасування двохшарової друкованої плати та мінімізує ризик короткого замикання при поверхневому монтажі. Водночас наявність у цій модифікації контактів конфігурації дозволяє інтегрувати стягувальні резистори (pull-down) номіналом 5.1 кОм. Це є обов'язковою схемотехнічною умовою для коректної ідентифікації пристрою сучасними "розумними" блоками живлення та стабільної подачі напруги 5 В.

Окрім керування профілем живлення, обрана мікросхема вирішує завдання базової візуальної індикації. Наявність спеціалізованих логічних виводів дозволяє реалізувати апаратне світлодіодне сповіщення про поточний статус (процес заряджання/заряд завершено) без залучення обчислювальних ресурсів мікроконтролера.

2.8 Висновки до розділу

На основі сформульованих технічних та експлуатаційних вимог розроблено загальну структурну схему, яка визначає архітектуру базових функціональних вузлів системи та цифрові інтерфейси їхньої взаємодії. Для опису логіки керування, моніторингу простору та маршрутизації інформаційних потоків побудовано структурну схему автоматизації.

Ключовим етапом розділу став детальний аналіз та обґрунтований вибір сучасної мікроелектронної бази. З урахуванням жорстких масогабаритних та енергетичних обмежень натільного формфактора, було підібрано оптимальне обчислювальне мікроконтролерне ядро, високоточні матричні ToF-далекоміри, компактні дискові ERM-актуатори для генерації тактильного відгуку, а також елементи підсистеми автономного живлення на базі літій-полімерного акумулятора з відповідним контролером заряду.

Проведений системний аналіз та математичні розрахунки енергоспоживання підтверджують, що обрана конфігурація компонентів повністю задовольняє вимоги щодо швидкодії, енергоефективності та соціальної непомітності. Виконаний комплекс робіт формує надійний апаратний фундамент для наступних етапів проєктування – розробки електричної принципової схеми та створення твердотілої моделі корпусу.

3. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

Перехід до проєктування електричної принципової схеми натільного пристрою вимагає суворого врахування жорстких масогабаритних обмежень. Фізичні розміри корпусу та необхідність просторового рознесення периферії (далекомірів та вібромоторів) у трьох різних напрямках роблять недоцільним використання єдиної монолітної друкованої плати. Спроба реалізації такої архітектури неминуче призвела б до критичного збільшення площі плати, ускладнення трасування та погіршення показників електромагнітної сумісності.

Для розв'язання цієї топологічної проблеми апаратну архітектуру розділено на два функціональні модулі: головну та периферійну схеми. Головна схема інтегрує обчислювальне ядро, підсистему керування живленням та силові драйвери. Периферійна схема спроектована за транзитним принципом і виконує роль комутаційного хаба: вона агрегує рознесені сигнальні лінії та передає їх на головний модуль через єдиний компактний шлейф.

Такий модульний підхід дозволяє суттєво зменшити габарити базового обчислювального блока, мінімізувати кількість внутрішніх з'єднувальних провідників та значно спростити процес розведення доріжок у системах автоматизованого проєктування. Відповідно, подальший опис електричної принципової схеми буде поділено на вузли головної та периферійної частин.

3.1 Розробка електричної принципової схеми периферійної плати

Апаратна реалізація периферійної частини виконана у вигляді комбінованого сенсорно-актуаторного вузла. Модуль об'єднує підсистему просторового сканування (високоточний матричний ToF-сенсор) та підсистему генерації тактильного відгуку (вібромотор постійного струму з напівпровідниковим мостовим драйвером). Компонування цих оптичних та електромеханічних елементів на спільній друкованій платі максимально оптимізує просторову архітектуру виробу.

Для стабільної роботи активних компонентів схема містить розгалужену обв'язку з пасивних елементів. Оскільки актуатор генерує значні імпульсні завади, на силових лініях драйвера та безпосередньо на клеммах мотора передбачено шунтуючі конденсатори для гасіння високочастотних викидів. Аналогічним чином від завад по

шині живлення захищено чутливу цифрову логіку далекоміра. Для коректної роботи цифрової шини зв'язку та стабілізації початкових станів ліній керування енергоспоживанням до схеми інтегровано відповідні підтягуючі резистори.

Організація зовнішніх підключень реалізована через систему розподілених контактних груп. Наявність дублюючих роз'ємів для ліній живлення та загальної цифрової шини дозволяє реалізувати послідовну транзитну топологію підключення типу «ланцюжок». Цей підхід дає можливість паралельно комутувати кілька периферійних модулів між собою, кардинально зменшуючи загальну кількість провідників, які необхідно прокладати через корпус до головної плати.

Водночас індивідуальні сигнали логічного керування, що вимагають прямого зв'язку з мікроконтролером (лінія ШІМ для регулювання інтенсивності вібрації, апаратні переривання сенсора та сигнали переведення в режим сну), виведено на окремий конектор. Такий роздільний підхід до комутації транзитних шин та індивідуальних ліній забезпечує високу надійність і технологічність фінального складання апаратного комплексу.

3.1.1 Реалізація підсистеми просторового сканування

Для забезпечення максимально надійної та стабільної роботи матричного ToF-сенсора, проектування його схемотехнічної обв'язки має базуватися на офіційних рекомендаціях виробника, наведених у технічній документації (datasheet). Згідно з типовою схемою підключення (рис. 3.1), архітектура датчика вимагає специфічної організації ліній живлення, а також використання низки підтягувальних та стягувальних резисторів на шинах передачі даних і керування.

роботі шини на високих швидкостях. Однак, з огляду на модульну архітектуру та закладену можливість паралельного підключення кількох периферійних плат, фізичне розміщення цих основних підтягувальних резисторів на 2.2 кОм доцільно перенести безпосередньо на головну плату з мікроконтролером. Таке рішення дозволяє уникнути небажаного паралельного з'єднання опорів при підключенні додаткових модулів і запобігає надмірному струмовому навантаженню на виводи мікросхем на шині I2C.

Окремої уваги вимагають лінії логічного керування та налаштування мікросхеми. Вивід переривання (INT), який апаратно сигналізує мікроконтролеру про готовність нового масиву даних, а також лінія керування режимами енергоспоживання (LPn) потребують підтяжки до напруги живлення через резистори номіналом 47 кОм. Лінія апаратного скидання інтерфейсу (I2C_RST), навпаки, має бути стягнута до потенціалу "землі" (GND) через аналогічний резистор 47 кОм для запобігання випадковим перезавантаженням шини від наведених завад.

Крім того, для забезпечення стабільності внутрішньої логіки сенсора, виробник жорстко регламентує правила підключення низки зарезервованих виводів (RSVD). Контакт RSVD6 необхідно підтягнути до рівня логічної одиниці резистором 47 кОм, тоді як група виводів RSVD1, RSVD2, RSVD3 та RSVD4 має бути безпосередньо і надійно з'єднана з суцільним полігоном "землі". Аналогічно до "землі" підключається і центральний теплопровідний майданчик (THERMAL PAD), що виконує роль не лише електричного екрана, але й елемента тепловідведення від кристала.

Переходячи від еталонних рекомендацій до практичної реалізації на розроблюваній друкованій платі, варто детально розглянути маршрутизацію сигналів від виводів мікросхеми далекоміра до зовнішніх контактних груп (конекторів). Схемотехнічне рішення побудовано таким чином, щоб забезпечити максимальну завадостійкість та врахувати модульну архітектуру комплексу (рис. 3.2).

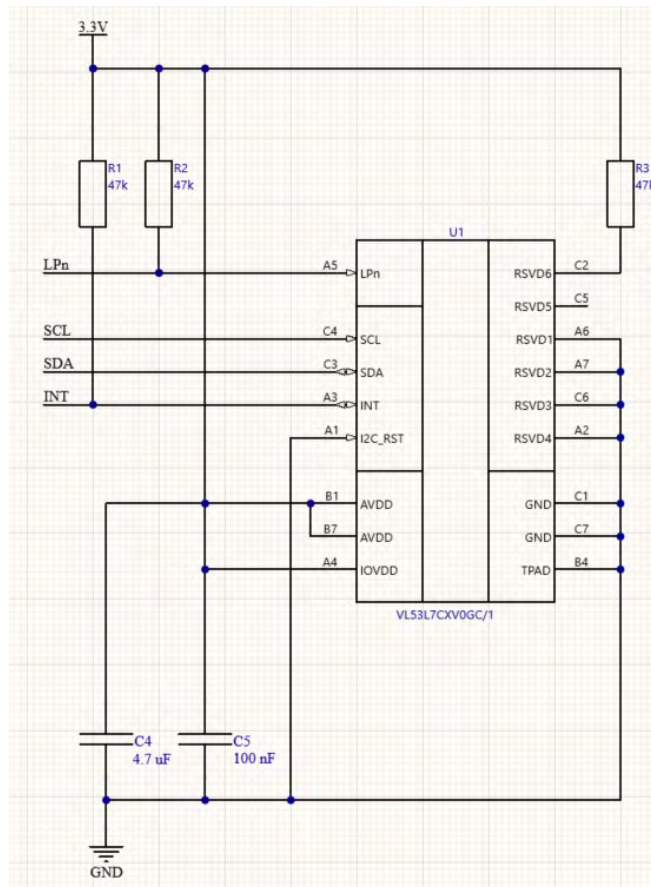


Рисунок 3.2 – Схема підключення VL53L7CX

Лінії живлення сенсора, а саме аналогова (AVDD) та цифрова (IOVDD) частини, об'єднані та підключені до загальної шини живлення 3.3 В, яка надходить із зовнішнього конектора. При цьому локальні фільтруючі конденсатори C4 (4.7 мкФ) та C5 (100 нФ) залишені в безпосередній близькості до мікросхеми, що є критично важливим для стабілізації напруги під час генерації лазерних імпульсів, незалежно від довжини зовнішніх дротів живлення.

Особливу увагу приділено транзитним лініям зв'язку. Як було обґрунтовано раніше, лінії тактування (SCL) та передачі даних (SDA) цифрової шини I2C виведені на зовнішній конектор без встановлення локальних підтягувальних резисторів безпосередньо на периферійній платі. Цей крок є свідомим інженерним рішенням, спрямованим на підтримку паралельного підключення кількох сенсорних модулів (daisy-chain) без ризику неконтрольованого зменшення загального опору шини. Відповідні підтягувальні резистори номіналом 2.2 кОм розміщуватимуться централізовано на головній платі керування.

Натомість, індивідуальні лінії логічного керування вимагають чіткої фіксації електричних потенціалів безпосередньо на платі сенсора. Лінію керування режимами

енергоспоживання (LPn) підтягнуто до рівня живлення 3.3 В через резистор R1 номіналом 47 кОм. Таке апаратне рішення гарантує, що у випадку відсутності керуючого сигналу від мікроконтролера (наприклад, під час ініціалізації системи) далекомір за замовчуванням перебуватиме в активному робочому стані. Аналогічним чином реалізовано підключення лінії апаратного переривання (INT): вона підтягнута до шини живлення за допомогою резистора R2 (47 кОм). Це формує стабільний високий логічний рівень у режимі очікування та унеможливорює хибні спрацьовування переривань від електромагнітних наведень на з'єднувальному шлейфі.

Для додаткового спрощення конструкції та підвищення загальної надійності, лінію апаратного скидання інтерфейсу (I2C_RST) було вирішено жорстко підключити до полігону "землі" (GND). Це ефективно запобігає випадковому перезавантаженню внутрішньої логіки сенсора. Також, у повній відповідності до суворих вимог виробника, технологічний зарезервований вивід RSVD6 підтягнуто до напруги живлення через локальний резистор R3 (47 кОм), тоді як група виводів RSVD1-RSVD4 надійно та найкоротшим шляхом з'єднана із загальним земляним контуром плати.

3.1.2 Реалізація підсистеми тактильного зворотного контролю

Для забезпечення надійного функціонування електромеханічного актуатора, схемотехніка підсистеми тактильного зворотного зв'язку проєктувалася на базі спеціалізованого драйвера. Пряме підключення індуктивного навантаження безпосередньо до портів вводу-виводу мікроконтролера є технічно неприпустимим через високі пускові струми та ризик пошкодження слабкострумової цифрової логіки зворотною електрорушійною силою. З огляду на це, згідно з еталонними рекомендаціями виробника, у якості силового буфера та комутатора застосовується мікросхема інтегрального напівпровідникового Н-моста DRV8837C.

Аналізуючи типову схему включення (рис. 3.3), наведену в технічній документації, варто відзначити архітектуру з роздільним живленням мікросхеми. Драйвер містить окремий вивід VCC для живлення внутрішньої цифрової логіки та силовий вхід VM, від якого безпосередньо комутується струм на обмотки підключеного мотора через виводи OUT1 та OUT2. Для забезпечення стабільної роботи та локального придушення імпульсних завад, що виникають під час роботи

електродвигуна, виробник суворо регламентує встановлення блокувальних керамічних конденсаторів номіналом 0.1 мкФ на кожну з ліній живлення (VCC та VM) у безпосередній близькості до мікросхеми.

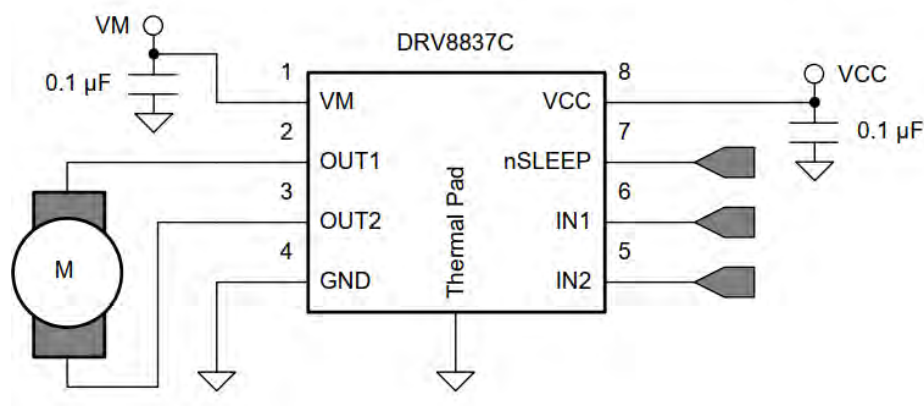


Рисунок 3.3 – Типова схема підключення DRV8837C

Для захисту від перегріву та забезпечення стабільного потенціалу, центральний теплопровідний майданчик (Thermal Pad) та стандартний вивід GND мають бути обов'язково з'єднані із загальним полігоном "землі" на друкованій платі. Це формує надійний електричний контакт та забезпечує ефективне відведення тепла від напівпровідникового кристала під час роботи мотора під навантаженням.

Логічний інтерфейс керування драйвером з боку мікроконтролера реалізовано через три базові сигнальні лінії. Виводи IN1 та IN2 відповідають за комутацію мостового каскаду і дозволяють не лише вмикати мотор, а й використовувати широтно-імпульсну модуляцію для плавного регулювання швидкості обертання ротора (відповідно, інтенсивності вібрації). Окремо передбачено керуючу лінію nSLEEP, наявність якої дозволяє апаратно переводити силову мікросхему в режим наднизького енергоспоживання (режим глибокого сну), що є критично важливою вимогою для економії заряду акумулятора у портативних натільних пристроях.

Переходячи до практичної імплементації підсистеми на розроблюваній друкованій платі, варто відзначити адаптацію еталонної схеми під конкретні технічні вимоги портативного пристрою. Схемотехнічне рішення оптимізовано для забезпечення максимальної стабільності роботи та мінімізації електромагнітних завад (рис. 3.4).

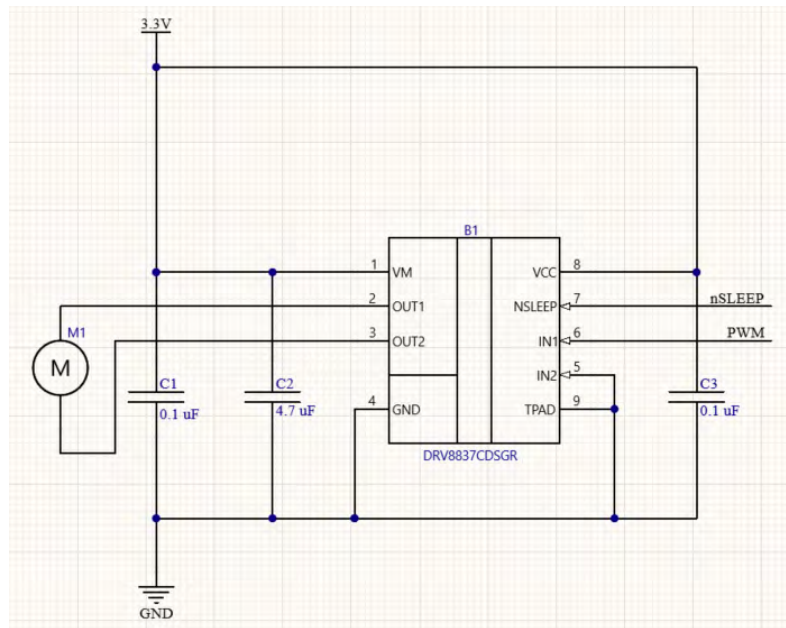


Рисунок 3.4 – Схема підключення DRV8837C

Живлення як силової частини моста (VM), так і цифрової логіки драйвера (VCC) об'єднано та підключено до загальної шини 3.3 В. Особливу увагу приділено локальній фільтрації силової лінії VM, оскільки робота електромеханічного актуатора супроводжується значними стрибками споживаного струму та генерацією високочастотного шуму від щіткового вузла. Для вирішення цієї проблеми на лінії VM встановлено два паралельні конденсатори з різними характеристиками. Конденсатор C2 збільшеної ємності (4.7 мкФ) виконує роль локального накопичувача енергії, компенсуючи просадки напруги під час різкого пуску ротора. Паралельно йому встановлено керамічний конденсатор C1 номіналом 0.1 мкФ, який, завдяки низькому еквівалентному послідовному опору, ефективно шунтує високочастотні завади, не дозволяючи їм поширюватися по загальних лініях живлення плати. На лінії живлення внутрішньої логіки мікросхеми, згідно зі специфікацією, встановлено окремий керамічний конденсатор C3 номіналом 0.1 мкФ.

Логічний інтерфейс керування також зазнав цільової оптимізації. Враховуючи, що для генерації тактильного відгуку напрямок обертання ексцентрика вібромотора не має значення (реверсний режим не використовується), один із керуючих входів мікросхеми (IN2) жорстко стягнуто до полігону "землі" (GND). Натомість керування здійснюється виключно через вивід IN1, на який із зовнішнього конектора подається сигнал широтно-імпульсної модуляції (PWM) для плавного налаштування сили вібрації. Лінію керування живленням (nSLEEP) також виведено на конектор, що

дозволяє мікроконтролеру відключати силовий каскад драйвера у періоди неактивності, суттєво заощаджуючи ресурс акумулятора.

3.1.3 Організація зовнішніх інтерфейсів та підключень

Завершальним етапом апаратної реалізації периферійного модуля є організація системи його зовнішніх підключень. Для інтеграції плати в загальну архітектуру пристрою застосовано конфігурацію з трьох окремих контактних груп. Такий розподіл сигналів є обґрунтованим схемотехнічним рішенням, спрямованим на оптимізацію прокладання шлейфів усередині корпусу та забезпечення модульності комплексу (рис. 3.5).

Систему інтерфейсів чітко розділено на дві функціональні частини: загальну транзитну шину та групу індивідуальних ліній керування. Для реалізації транзитної шини на друкованій платі передбачено дві абсолютно ідентичні 4-контактні групи. Кожна з них містить базові лінії живлення (3.3 В та загальний контур "землі"), а також сигнальні провідники цифрової шини зв'язку I2C (лінію тактування SCL та лінію даних SDA). Дублювання цього інтерфейсу закладено спеціально для реалізації послідовної топології підключення типу «ланцюжок» (daisy-chain). Це дозволяє з'єднувати кілька периферійних модулів один з одним паралельно, транслуючи живлення та загальні дані транзитом по ланцюгу. Такий інженерний підхід кардинально зменшує сумарну кількість провідників, які необхідно тягнути від кожного окремого сенсора до головної керуючої плати.

Натомість специфічні апаратні сигнали, які вимагають прямого зв'язку з портами вводу-виводу головного мікроконтролера і є унікальними для кожного вузла, на окрему третю 4-контактну групу. До цього логічного інтерфейсу входять: лінія подачі широтно-імпульсної модуляції для налаштування інтенсивності вібромотора, лінія зчитування апаратного переривання (INT) від матричного далекоміра, а також сигнали переведення драйвера (nSLEEP) та сенсора (LPn) у режими зниженого енергоспоживання. Фізичне розділення загальної шини даних та індивідуальних ліній керування по різних конекторах гарантує високу надійність комутації, мінімізує ризик помилок при підключенні та суттєво спрощує процес фінального складання апаратної частини.

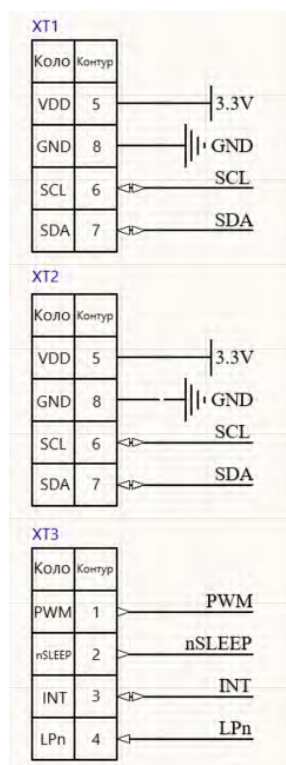


Рисунок 3.5 – Схема конекторів

Електрична принципова схема периферійної плати представлена в додатку Б.

3.2 Розробка електричної принципової схеми головної плати

Головна плата керування є центральним системним вузлом комплексу, що апаратно об'єднує обчислювальні, енергетичні та комунікаційні функції. Принципову схему плати логічно поділено на чотири взаємопов'язані функціональні блоки.

Першим блоком є обчислювальне ядро на базі керуючого мікроконтролера. Він діє як системний координатор: забезпечує ініціалізацію периферії, циклічне опитування ToF-далекомірів по шині I2C, математичну обробку просторових даних та генерацію ШІМ-сигналів для вібромоторів. До цього ж вузла належать базовий апаратний інтерфейс (кнопка живлення) та спеціалізований роз'єм для програмування і налагодження.

Другим сегментом є підсистема керування зарядом та обслуговування акумулятора. Вона містить роз'єм USB Type-C, контролер заряду з апаратною світлодіодною індикацією та контактні площадки для підключення батареї. Вузол гарантує дотримання алгоритму відновлення ємності та захищає хімічне джерело струму від критичних режимів роботи.

Третій блок – каскад стабілізації напруги на базі імпульсного перетворювача постійного струму (DC-DC). Оскільки напруга акумулятора знижується під час розряду, перетворювач формує стабільну шину номіналом 3.3 В, захищену від завад та імпульсних стрибків навантаження. Ця лінія забезпечує живлення як локальної цифрової логіки, так і віддалених периферійних модулів.

Четвертий блок – система маршрутизації та зовнішніх інтерфейсів. На платі розміщено конектори для підключення лівого та правого сенсорно-актуаторних вузлів. Саме тут бере початок центральна шина I2C і фізично сконцентровані головні підтягувальні резистори для ліній передачі даних та тактування. Це топологічне рішення гарантує стабільність цифрового зв'язку при паралельному підключенні периферії та запобігає конфліктам узгодження опорів. Окрім загальних транзитних шин, через ці конектори розводяться індивідуальні лінії логічного керування від портів мікроконтролера до кожного актуатора та далекоміра.

3.2.1 Реалізація обчислювального ядра на базі мікроконтролера

Основою обчислювального ядра та головним координуючим елементом системи обрано 32-бітний мікроконтролер STM32F411CEU6. Головною архітектурною особливістю реалізованої схеми є наявність трьох ідентичних груп керуючих сигналів (які включають лінії ШІМ, переривань та керування режимами сну). Таке рішення безпосередньо зумовлене просторовою специфікою комплексу: апаратна база головної плати спроектована з розрахунком на одночасне та незалежне підключення до трьох окремих периферійних сенсорно-актуаторних модулів. Це дозволяє суттєво розширити загальну зону просторового сканування (наприклад, ліва, права та центральна зони) та забезпечує можливість генерувати складні, просторово-розподілені патерни тактильного зворотного зв'язку на тілі користувача.

Для забезпечення стабільної та надійної роботи мікроконтролера реалізовано комплексну схемотехнічну обв'язку (рис. 3.6). Усі виводи живлення (VDD_1, VDD_2, VDD_3), аналогове живлення (VDDA) та живлення домену резервної батареї (VBAT) об'єднані та підключені до загальної стабілізованої шини 3.3 В. Для локального придушення високочастотних електромагнітних завад ці лінії зашунтовані керамічними конденсаторами номіналом по 100 нФ (C6, C9, C10, C11),

розташованими у безпосередній близькості до корпусу мікросхеми. Критично важливим елементом є конденсатор C8 ємністю 4.7 мкФ, підключений до виводу VCAP_1. Його наявність є жорсткою вимогою виробника мікроконтролера для стабілізації роботи внутрішнього лінійного регулятора напруги, який живить обчислювальне ядро процесора. Також, для запобігання хибним перезавантаженням пристрою від наведених завад, лінію апаратного скидання (NRST) стягнуто на контур "землі" через фільтруючий конденсатор C7 (100 нФ). Центральний теплопровідний майданчик (THERMAL_PAD) та всі виводи VSS надійно з'єднані з основним полігоном "землі" для забезпечення еквіпотенціальності.

Окрему увагу приділено конфігурації логічних рівнів за допомогою резисторів. Вивід вибору режиму завантаження (BOOT0) жорстко стягнутий до потенціалу "землі" через струмообмежувальний резистор R5 номіналом 10 кОм. Це апаратно гарантує, що при кожній подачі живлення мікроконтролер завжди штатно стартуватиме з основної внутрішньої флеш-пам'яті, виконуючи робочий програмний код. Крім того, саме на головній платі розміщено центральні підтягувальні резистори R6 та R7 номіналом по 2.2 кОм для ліній даних (SDA) та тактування (SCL) цифрової шини I2C. Як обґрунтовувалося раніше, розміщення цих резисторів безпосередньо біля керуючого контролера є оптимальним топологічним рішенням для забезпечення стабільної роботи транзитної шини зв'язку при паралельному підключенні всіх трьох периферійних модулів.

Окрім описаних вузлів, схема передбачає виведення стандартних ліній інтерфейсу SWD (SWDIO та SWCLK) для програмування, а також вхідної лінії FULL_BATT, яка дозволяє мікроконтролеру зчитувати статус завершення процесу заряджання акумулятора.

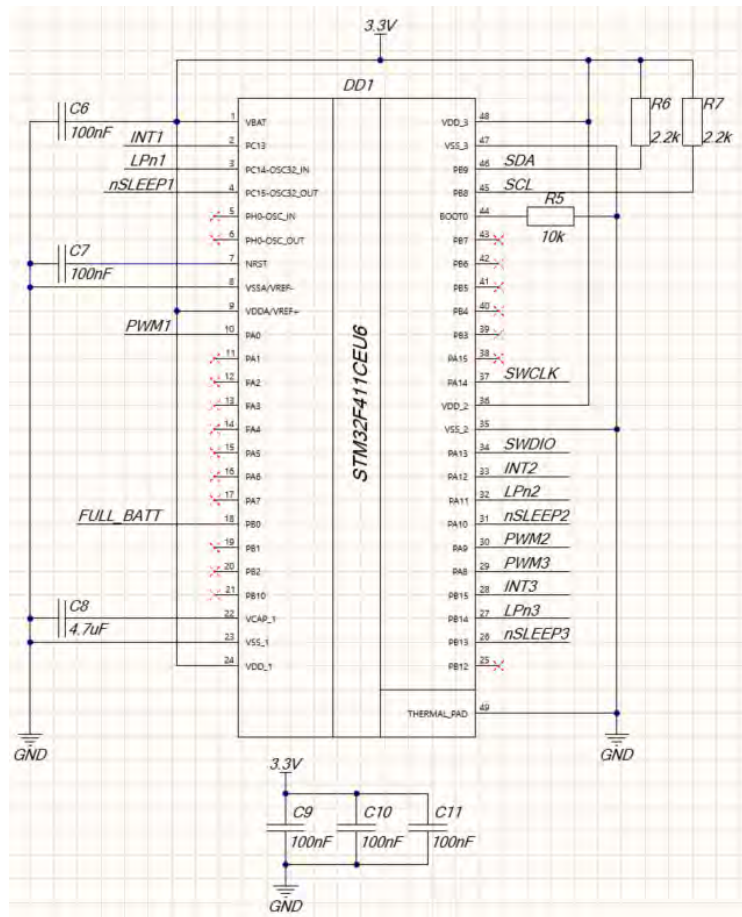


Рисунок 3.6 – Схема підключення мікроконтролера

Індивідуальні сигнали керування периферією, що генеруються та обробляються портами вводу-виводу мікроконтролера, жорстко розподілені на три незалежні канали. Детальний розподіл цих сигналів по відповідних портах мікроконтролера для подальшого виведення на зовнішні конектори наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Розподіл портів вводу-виводу мікроконтролера

Канал / Блок	Призначення сигналу	Логічна назва порту (GPIO)	Фізичний номер виводу мікросхеми
Системні та комунікаційні сигнали	Лінія даних шини I2C	PB9	46
	Лінія тактування шини I2C	PB8	45
	Статус завершення заряджання акумулятора	PB0	18
	Лінія тактування інтерфейсу програмування SWD	PA14	37
	Лінія даних інтерфейсу програмування SWD	PA13	34
Канал 1 (Ліва зона)	ШІМ-керування вібромотором (PWM1)	PA0	10
	Режим сну драйвера актуатора (nSLEEP1)	PC15	4
	Апаратне переривання від далекоміра (INT1)	PC13	2
	Режим сну далекоміра (LPn1)	PC14	3
Канал 2 (Центральна зона)	ШІМ-керування вібромотором (PWM2)	PA9	30
	Режим сну драйвера актуатора (nSLEEP2)	PA10	31
	Апаратне переривання від далекоміра (INT2)	PA12	33
	Режим сну далекоміра (LPn2)	PA11	32

Продовження таблиці 3.1

Канал / Блок	Призначення сигналу	Логічна назва порту (GPIO)	Фізичний номер виводу мікросхеми
Канал 3 (Права зона)	ШИМ-керування вібромотором (PWM3)	PA8	29
	Режим сну драйвера актуатора (nSLEEP3)	PB13	26
	Апаратне переривання від далекоміра (INT3)	PB15	28
	Режим сну далекоміра (LPn3)	PB14	27

3.2.2 Реалізація каскаду стабілізації напруги

Для забезпечення стабільного та безперебійного функціонування чутливої електроніки комплексу (мікроконтролера та ToF-сенсорів) критично важливою є наявність надійної шини живлення з номіналом 3.3 В. Згідно з еталонною схемою підключення (рис 3.7), наведеною в технічній документації виробника, мікросхема TPS6001 вимагає специфічної обв'язки для реалізації заявлених характеристик та стабільного формування вихідного струму до 1200 мА. Архітектура драйвера передбачає роздільне підключення вхідного живлення до силового каскаду (VIN) та внутрішньої аналогової логіки керування (VINA). В еталонній схемі ці виводи об'єднані. Для фільтрації вхідних завад та компенсації імпульсного споживання струму на вході встановлюється керамічний конденсатор ємністю 10 мкФ.

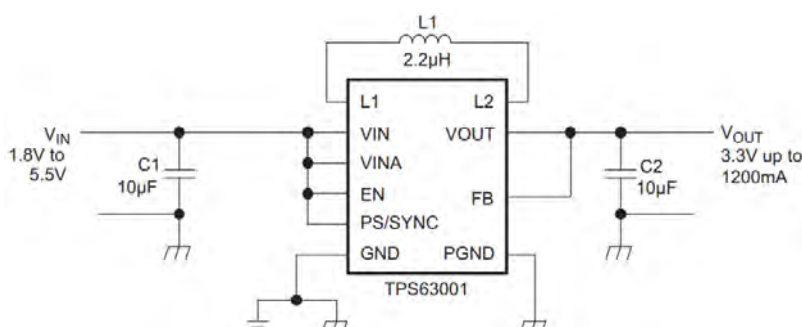


Рисунок 3.7 – Типова схема підключення TPS6001

Ключовим елементом накопичення та передачі енергії в топології buck-boost є силовий дросель. Виробник рекомендує використовувати дросель номіналом 2.2 мкГн, який підключається між внутрішніми комутаційними вузлами мікросхеми (виводи L1 та L2). Саме завдяки йому перетворювач здатен як знижувати, так і "підкачувати" напругу до необхідного рівня.

Схема містить ряд логічних виводів, які задають режим роботи перетворювача. Вивід дозволу роботи (EN) та вивід керування режимом енергозбереження / синхронізації (PS/SYNC) в типовій схемі жорстко підтягнуті до вхідної напруги. Це означає, що перетворювач автоматично запускається при появі живлення та працює в режимі безперервної широтно-імпульсної модуляції для забезпечення мінімальних пульсацій вихідної напруги.

На виході мікросхеми (VOUT) формується стабільна напруга 3.3 В. Оскільки модифікація TPS63001 має внутрішньо зафіксований номінал вихідної напруги, вивід зворотного зв'язку (FB), який необхідний для роботи внутрішнього підсилювача помилки, підключається безпосередньо до вихідної лінії. Для згладжування пульсацій та забезпечення загальної стабільності контуру регулювання на виході перетворювача обов'язково встановлюється конденсатор ємністю 10 мкФ. Крім того, для мінімізації впливу силових струмів на чутливу логіку, мікросхема має розділені виводи силової (PGND) та аналогової (GND) "землі", які на друкованій платі повинні з'єднуватися в єдиний контур.

Переходячи до практичної імплементації каскаду стабілізації на друкованій платі, варто відзначити суттєву модернізацію еталонної схеми з метою підвищення загальної завадостійкості системи. Оскільки від цієї шини 3.3 В живиться як високочутлива цифрова логіка, так і електромеханічні актуатори (що генерують шум), схемотехнічне рішення (рис. 3.8) було оптимізовано для забезпечення максимально "чистого" живлення.

Головна відмінність полягає у розділенні кіл живлення самої мікросхеми перетворювача. Якщо силове вхідне живлення (VIN) підключено безпосередньо до вхідної лінії від акумулятора та зашунтовано накопичувальним конденсатором C1 ємністю 10 мкФ, то живлення внутрішньої аналогової логіки керування (VINA) реалізовано через спеціально доданий низькочастотний RC-фільтр. Цей фільтр утворений послідовним резистором R3 номіналом 100 Ом та керамічним

конденсатором C3 на 100 нФ. Таке інженерне рішення ефективно відсікає високочастотні пульсації від силової лінії, гарантуючи стабільну роботу внутрішнього генератора та компараторів мікросхеми. До цієї ж відфільтрованої лінії підтягнуті керуючі виводи дозволу роботи (EN) та вибору режиму (PS), що забезпечує автоматичний запуск перетворювача при підключенні батареї та його стабільну роботу без хибних відключень. Як основний елемент накопичення енергії використовується силовий дросель L1 зі стандартним номіналом 2.2 мкГн, підключений між комутаційними вузлами L1 та L2.

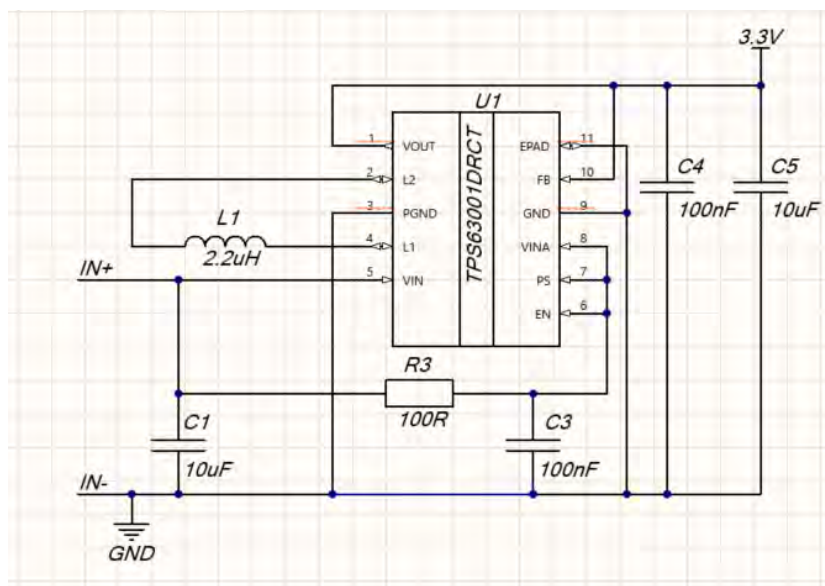


Рисунок 3.8 – Схема підключення TPS63001DRCT

Вихідний каскад також зазнав цільової оптимізації. Лінія зворотного зв'язку (FB) жорстко підключена до вихідної шини VOUT для забезпечення стабілізації на рівні 3.3 В. Проте, на відміну від базової схеми, для фільтрації вихідної напруги застосовано паралельне підключення двох конденсаторів з різними частотними характеристиками. Базовий конденсатор C5 ємністю 10 мкФ виконує роль основного буфера для згладжування низькочастотних пульсацій струму дроселя, тоді як додатковий керамічний конденсатор C4 номіналом 100 нФ завдяки своєму низькому еквівалентному послідовному опору (ESR) ефективно гасить високочастотні "голки" напруги. Усі земляні контури мікросхеми (силовий PGND, аналоговий GND та теплопровідний майданчик EPAD) надійно об'єднані та підключені до загального полігону плати найкоротшим шляхом для уникнення паразитних контурів струму.

3.2.3 Реалізації системи контролю заряду та захисту акумулятора

Для забезпечення автономної роботи портативного комплексу та можливості багаторазового відновлення енергії хімічного джерела струму, на головній платі реалізовано вузол керування зарядом. Його схемотехнічна база побудована навколо популярного та надійного спеціалізованого драйвера TP4056, який являє собою лінійний контролер заряду для одnobанкових літій-іонних (Li-Ion) та літій-полімерних (Li-Po) акумуляторів. Ця мікросхема апаратно реалізує оптимальний та безпечний алгоритм заряджання CC/CV (постійний струм/постійна напруга).

Аналізуючи еталонну схему підключення від виробника (рис. 3.9), можна виділити кілька ключових сегментів обв'язки. Вхідна напруга номіналом 5 В, яка зазвичай надходить від зовнішнього порту USB, подається на вивід живлення мікросхеми (V_{CC}). Для стабілізації вхідної напруги та фільтрації високочастотних завад від джерела живлення, на цій лінії встановлюється керамічний конденсатор ємністю 10 мкФ. Вивід дозволу роботи (CE) жорстко підключено до вхідної напруги, що забезпечує автоматичний старт процесу заряджання одразу при підключенні зовнішнього кабелю. Аналогічний фільтруючий конденсатор на 10 мкФ встановлюється і на вихідній силовій лінії (BAT), до якої безпосередньо підключається плюсовий контакт акумулятора.

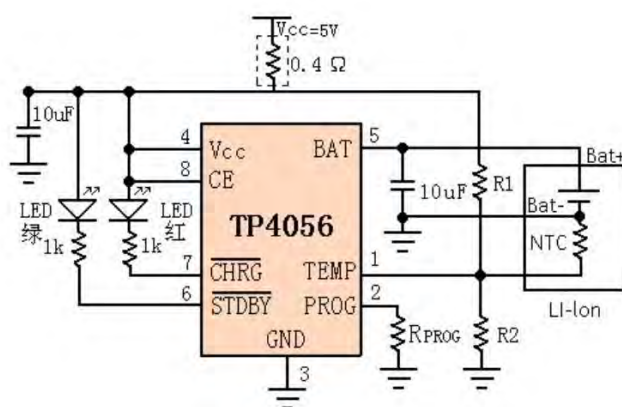


Рисунок 3.9 – Типова схема під'єднання TP4056

Важливою інженерною особливістю даного контролера є можливість точного апаратного налаштування струму заряджання. Ця функція реалізується за допомогою єдиного струмозадаючого резистора (R_{prog}), який підключається між виводом програмування (PROG) та загальним контуром "землі". Номінал цього резистора

розраховується на етапі проєктування відповідно до номінальної ємності застосованого акумулятора (зазвичай струм заряду встановлюється на рівні 0.5C - 1C від ємності батареї для подовження її життєвого циклу).

Інтерфейс користувача у цьому вузлі реалізовано через базову світлодіодну індикацію станів. Мікросхема має два виходи типу "відкритий стік" (CHRG та STDBY), до яких через струмообмежувальні резистори (зазвичай 1 кОм) підключаються світлодіоди різних кольорів. Вони наочно сигналізують про активну фазу заряджання або про її успішне завершення. Також еталонна схема передбачає можливість температурного моніторингу батареї (вивід TEMP), що реалізується шляхом підключення зовнішнього термістора (NTC), якщо він конструктивно присутній у збірці акумулятора.

Щодо питання безпеки та захисту акумулятора від критичних станів (таких як глибоке розрядження, перезарядження по напрузі та коротке замикання на клемах), при проєктуванні комплексу було прийнято рішення не дублювати ці апаратні кола на головній друкованій платі. Переважна більшість сучасних літій-полімерних акумуляторів, призначених для портативної електроніки, постачається виробниками з уже інтегрованим модулем захисту, який розміщується безпосередньо під термоусадкою самої батареї. Покладання функцій безпеки на цей локальний контролер батареї дозволяє суттєво спростити загальну схемотехніку головної плати, зменшити її габарити та знизити кінцеву вартість виробу без жодної втрати надійності системи.

Переходячи до практичної імплементації підсистеми на головній друкованій платі, варто відзначити низку рішень, спрямованих на оптимізацію простору та адаптацію еталонної схеми під специфіку "сліпого" натільного пристрою.

У якості роз'єму вхідного живлення застосовано сучасний порт USB Type-C. З метою раціонального використання площі плати та спрощення трасування обрано спеціалізовану 6-контактну версію конектора (модель USB4515-GF-A), яка позбавлена ліній передачі даних і призначена виключно для подачі живлення. Для забезпечення повної апаратної сумісності зі стандартом Type-C та коректного розпізнавання пристрою "розумними" зарядними блоками, на конфігураційні лінії CC1 та CC2 встановлено обов'язкові стягувальні резистори R1 та R2 номіналом по 5.1 кОм. Це

апаратно конфігурує розроблюваний пристрій як споживач енергії і гарантує безперебійну подачу напруги 5 В на силову лінію VBUS.

Вхідна напруга від роз'єму локально фільтрується керамічним конденсатором C2 ємністю 10 мкФ та надходить на входи живлення (VCC) і дозволу роботи (CE) мікросхеми драйвера TP4056. Максимальний струм заряджання жорстко встановлюється апаратним шляхом за допомогою резистора R4 номіналом 10 кОм, підключеного між виводом PROG та контуром "землі". Функція зовнішнього температурного моніторингу акумулятора в даній конфігурації не використовується (через наявність власного контролера захисту на самій батареї), тому вивід TEMP також надійно з'єднано із загальним земляним полігоном.

Найбільш значною архітектурною оптимізацією розробленого вузла є повна відмова від використання класичних дискретних світлодіодів для візуальної індикації статусу заряджання. Враховуючи, що пристрій призначений для використання людьми з порушеннями зору, наявність оптичної індикації є недоцільною. Тому вивід активної фази заряду (CHRG) навмисно залишено непідключеним. Натомість вивід успішного завершення заряду (STDBY) маршрутизовано безпосередньо на порт вводу-виводу головного мікроконтролера у вигляді логічної сигнальної лінії FULL_BATT. Таке схемотехнічне рішення переносить контроль над станом акумулятора з апаратного на програмний рівень: мікроконтролер може самостійно відстежувати момент 100% заряду батареї та генерувати відповідний системний відгук (спеціальний патерн вібрації), що значно підвищує інтерактивність та зручність експлуатації комплексу. Фінальна схема системи зарядки акумулятору зображена на рисунку 3.10.

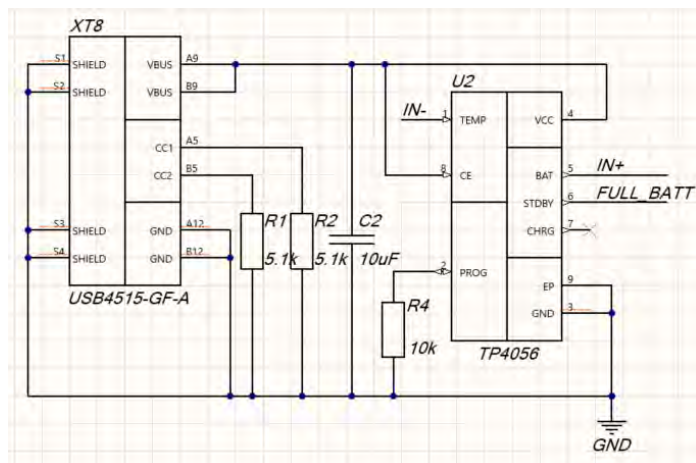


Рисунок 3.10 – Схема підключення TP4056 та USB4515-GF-A

3.2.4 Реалізація внутрішньо системних інтерфейсів та комутаційних

вузлів

Завершальним етапом формування апаратної архітектури головної плати є розробка системи комутаційних вузлів. Використання масиву стандартизованих конекторів забезпечує модульність конструкції, значно спрощує процес фізичного складання натільного комплексу, а також дозволяє проводити швидку діагностику або заміну окремих периферійних сегментів під час експлуатації. Аналізуючи принципову схему, всі зовнішні підключення можна логічно розділити на три функціональні групи: індивідуальні канали керування, загальносистемна транзитна шина та живильні інтерфейси.

Для маршрутизації унікальних керуючих сигналів передбачено три ідентичні 4-контактні конектори (XT1, XT2, XT3), кожен з яких відповідає за свій просторовий канал (наприклад, ліва, центральна та права зони сканування). Через ці роз'єми від визначених портів мікроконтролера до відповідного периферійного модуля прокладаються індивідуальні лінії: широтно-імпульсної модуляції для керування вібромотором (PWM), апаратного переривання від матричного далекоміра (INT), а також сигнали керування режимами енергоспоживання для сенсора (LPn) та силового драйвера (nSLEEP).

Розподіл енергії та цифровий обмін даними здійснюється через транзитну шину, яка виведена на дві паралельні 4-контактні групи (XT4 та XT5). Ці конектори транслують стабілізовану напругу живлення 3.3 В, загальний контур "землі" (GND), а також лінії тактування (SCL) і даних (SDA) загальної цифрової шини I2C. Наявність двох фізично розділених, але електрично запаралелених роз'ємів на головній платі є ключовою умовою для реалізації топології послідовного з'єднання типу «ланцюжок». Це дозволяє пустити один шлейф загальної шини до лівого крила пристрою, а інший – до правого, мінімізуючи загальну кількість проводів у корпусі.

Оскільки загальна цифрова шина I2C фізично розподіляється через дротяні шлейфи до периферійних плат у дужках корпусу, це неминуче призводить до збільшення паразитної ємності ліній зв'язку. Для забезпечення стабільної передачі даних без спотворення фронтів сигналів SCL та SDA (що особливо критично для

частоти опитування датчиків) необхідно провести розрахунок максимально допустимого опору підтягуючих резисторів (Pull-up resistors). Цей параметр обмежується вимогами стандарту інтерфейсу до часу наростання сигналу та визначається за формулою (3.1):

$$R_{\text{макс}} = \frac{t_r}{0.8473 \cdot C_b} \quad (3.1)$$

де,

$R_{\text{макс}}$ – максимальний допустимий опір підтягуючого резистора, Ом;

t_r – максимально допустимий час наростання сигналу (для швидкісного режиму Fast Mode 400 кГц згідно зі специфікацією I2C цей параметр становить 300 нс, або $3 \cdot 10^{-12}$ с.);

C_b – загальна розрахункова паразитна ємність шини, яка складається з ємності портів мікроконтролера, трьох оптичних сенсорів та з'єднувальних дротів (для даної конфігурації приймається орієнтовно рівною 50 пФ, або $5 \cdot 10^{-11}$ Ф).

Підставивши ці значення у формулу (3.1), отримуємо:

$$R_{\text{макс}} = \frac{3 \cdot 10^{-7}}{0.8473 \cdot 5 \cdot 10^{-11}} \approx 7081 \text{ Ом}$$

Отриманий розрахунок доводить, що для гарантованої та безперебійної роботи цифрового інтерфейсу в умовах наявності з'єднувальних шлейфів опір підтягуючих резисторів не повинен перевищувати 7 кОм. З огляду на це, в електричній принциповій схемі для ліній SCL та SDA було інтегровано стандартні резистори номіналом 4.7 кОм. Такий вибір забезпечує необхідний інженерний запас надійності, зберігає належну крутизну фронтів сигналів і водночас мінімізує зайве споживання струму в стані логічного нуля.

Окрему категорію утворюють сервісні роз'єми. Для підключення літій-полімерного акумулятора на платі розташовано спеціалізований 2-контактний конектор (ХТ7), який безпечно підводить силові лінії IN+ та IN- безпосередньо до входу вузла керування зарядом. Крім того, для забезпечення можливості початкового прошивання мікроконтролера та виконання глибокого внутрішньосхемного налагодження програмного коду, на платі розведено 4-контактний сервісний порт ХТ6. На нього виведено стандартний інтерфейс SWD (Serial Wire Debug), що включає лінію двонаправленої передачі даних (SWDIO), лінію тактування (SWCLK), а також

дублює контакти живлення 3.3 В та "землі" для коректного узгодження логічних рівнів із зовнішнім програматором. Схема підключення конекторів представлена на малюнках 3.11, 3.12.

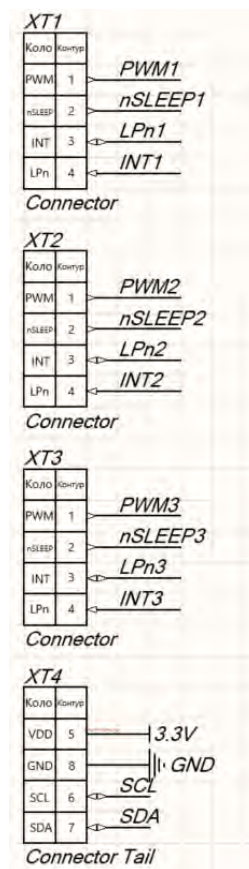


Рисунок 3.11 – Схема підключення конекторів керування

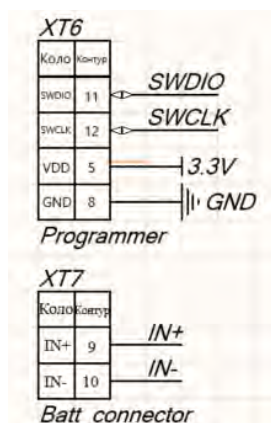


Рисунок 3.12 – Схема підключення конекторів програмування та акумулятору

Електрична принципова схема головної плати представлена в додатку В.

3.3 Висновки до розділу

Було здійснено комплексне проєктування електричної принципової схеми розроблюваного натільного асистивного пристрою. З огляду на масогабаритні

обмеження корпусу та необхідність просторового рознесення сенсорів і актуаторів, було прийнято обґрунтоване інженерне рішення про перехід від монолітної архітектури до двоплатної топології, що складається з головного та периферійного модулів.

Розроблена схема головної плати успішно інтегрує обчислювальне мікроконтролерне ядро, підсистему безпечного заряджання літій-полімерного акумулятора та каскад стабілізації живлення для формування надійної шини 3.3 В. Своєю чергою, спроектований периферійний модуль ефективно об'єднує матричний ToF-сенсор та ERM-вібромотор. Впровадження розгалуженої системи пасивної фільтрації дозволило надійно захистити чутливу цифрову логіку від імпульсних завад, що генеруються електромеханічним приводом.

Реалізація модульного підходу з використанням дублюючих роз'ємів для транзитної передачі даних по шині I2C суттєво мінімізувала кількість з'єднувальних провідників. Загалом, розроблена електрична принципова схема повністю задовольняє заявлені технічні вимоги, забезпечує належну електромагнітну сумісність компонентів і формує готову апаратну базу для подальшого трасування друкованих плат та розробки програмного забезпечення.

4. АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ ТА КОРПУС ПРИСТРОЮ

Розробка ефективної асистивної системи для осіб з порушеннями зору вимагає не лише створення надійної мікроелектронної бази, а й глибокої інтеграції програмного забезпечення з продуманою ергономічною конструкцією. У цьому розділі розглядається комплексний етап поєднання апаратних рішень із керуючою логікою та фізичною оболонкою пристрою. Зокрема, наводиться детальний опис розробленої архітектури алгоритму, що забезпечує обробку просторових даних у режимі жорсткого реального часу, розглядаються механізми динамічної ініціалізації периферійних сенсорів та математичні моделі конвертації відстані у тактильний відгук. Окрім програмної складової, у розділі обґрунтовується вибір формфактора та описується спроектована просторова модель корпусу, яка об'єднує всі електронні вузли в єдиний, соціально непомітний та зручний для повсякденної експлуатації натільний апаратний комплекс.

4.1 Програмна архітектура та алгоритм динамічної переадресації

Розробка апаратної бази та проектування топології друкованої плати створюють лише фізичний фундамент для функціонування системи, тоді як її фактична ефективність, швидкість реакції та зручність для кінцевого користувача цілком визначаються закладеною програмною логікою. На етапі проектування програмного забезпечення ключовим завданням є забезпечення детермінованої роботи системи у режимі реального часу. Оскільки система виконує функцію заміщення зорової інформації тактильною, будь-які програмні затримки в обробці масивів даних від Time-of-Flight сенсорів або розсинхронізація у формуванні тактильного відгуку є критичними, оскільки можуть призвести до дезорієнтації людини у просторі.

Враховуючи портативний характер розробки, програмна архітектура також суворо відповідає критеріям енергоефективності. Безперервний процес сканування та генерації вібрації здатен швидко виснажити ресурс малогабаритного акумулятора. Це вимагає впровадження в алгоритм інтелектуальних механізмів керування енергоспоживанням, де активні фази вимірювання чергуються з мікроциклами глибокого сну мікроконтролера та периферійних модулів [42]. Структурно загальний алгоритм керування комплексом побудований за принципом модульності. Такий

підхід у програмуванні вбудованих систем дозволяє ізолювати окремі функціональні задачі, суттєво спрощує подальше масштабування пристрою та полегшує процес налагодження коду. Для комплексного розкриття програмної складової проекту варто зазначити, що базовий алгоритм інкапсулює два специфічні підпроцеси: механізм програмної переадресації сенсорів та математичний апарат конвертації вимірної фізичної дистанції у відповідне значення інтенсивності тактильного відгуку (шпаруватість ШІМ-сигналу) [43].

Для обміну даними між обчислювальним ядром та периферійними сенсорними вузлами в розробленій системі використовується цифрова послідовна шина зв'язку I2C (Inter-Integrated Circuit). Фундаментальною особливістю цього протоколу є його шинна топологія: всі ведені вузли slave підключаються паралельно до двох спільних ліній зв'язку — лінії тактування SCL та лінії даних SDA. Щоб головний мікроконтролер master міг опитувати конкретний датчик, кожен периферійний модуль на шині повинен мати власну унікальну апаратну адресу.

З метою мінімізації габаритів головної друкованої плати та зниження енергоспоживання (замість використання апаратних мультиплексорів), у даній роботі реалізовано метод динамічної програмної переадресації. Цей алгоритм спирається на спільне використання протоколу I2C та індивідуальних ліній керування живленням LPn. Під час ініціалізації мікроконтролер примусово переводить усі три далекоміри у стан глибокого сну, подаючи логічний нуль на відповідні лінії. Далі він подає логічну одиницю виключно на лінію першого сенсора, який "прокидається" і стає єдиним доступним вузлом на шині, відгукуючись на свою базову адресу. Мікроконтролер надсилає йому конфігураційну команду на зміну I2C-адреси, записуючи нове унікальне значення. Аналогічна процедура послідовно повторюється для другого та третього датчиків. Впровадження такого алгоритму надає розробленій системі вагомую експлуатаційну перевагу: у випадку механічного пошкодження одного з сенсорів, процедура ремонту зводиться до банальної фізичної заміни плати на нову заводську деталь без необхідності втручання у програмний код чи специфічного калібрування, що робить ремонт системи доступним і швидким [44]. Блок-схема алгоритму динамічної переадресації представлена на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритму динамічної переадресації

4.2 Алгоритм конвертації дистанції у параметри тактильного відгуку

Основним функціональним завданням розробленої системи є адекватна та інтуїтивно зрозуміла трансляція геометричних характеристик простору на мову соматосенсорних відчуттів людини. Оскільки сенсорна підсистема генерує точні числові значення відстані до перешкод у міліметрах, виникає необхідність розробки

математичного апарату для їх перетворення у відповідну інтенсивність вібрації. Ключовою вимогою до цього алгоритму є забезпечення низького когнітивного навантаження на користувача: софт системи має самостійно фільтрувати несуттєву інформацію та акцентувати увагу лише на потенційно небезпечних об'єктах.

З точки зору психофізики, сприйняття тактильних подразників людиною має нелінійний характер і підпорядковується логарифмічним закономірностям. Тому лінійна зміна керуючої напруги на вібромоторі не призводить до лінійного відчуття зміни сили вібрації. Для вирішення цієї проблеми алгоритм конвертації використовує метод зонального аналізу простору з обернено пропорційним масштабуванням.

Зона безпеки, якщо вимірювана відстань до об'єкта перевищує порогове значення $D_{\max}$. Тоді алгоритм класифікує цю перешкоду як таку, що не становить безпосередньої загрози. Сигнал на відповідний канал не подається, актуатор залишається у сплячому режимі. Це відсікає фоновий шум і запобігає сенсорному перевантаженню. Критична зона активується, якщо об'єкт знаходиться на відстані, меншій за $D_{\min}$, і система інтерпретує це як неминучу небезпеку зіткнення. На відповідний вібромотор подається сигнал максимальної інтенсивності, що відповідає стовідсотковій шпаруватості ШІМ-сигналу.

Зона активного сканування, якщо вимірювана відстань потрапляє у проміжок між $D_{\min}$ та $D_{\max}$, алгоритм розраховує необхідну інтенсивність вібрації за допомогою математичної функції перетворення.

Апаратне керування інтенсивністю обертання ексцентрика вібромотора реалізується методом ШІМ. Програмний модуль обчислює шпаруватість (duty cycle) генеруємого сигналу, яка відповідає за середнє значення напруги на клеммах актуатора.

Блок-схема алгоритму конвертації дистанції у параметри тактильного відгуку представлено на рисунку 4.2.

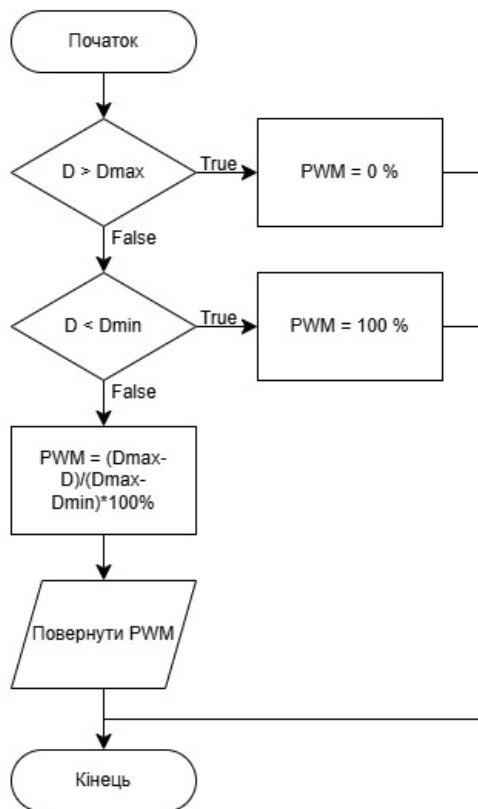


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритму конвертації відстані у параметри тактильного відгуку

4.3 Загальний алгоритм функціонування системи

Процес керування системою базується на класичній для вбудованих мікроконтролерних систем архітектурі головного нескінченного циклу (superloop) з елементами подієво-орієнтованої обробки апаратних переривань [45]. підхід гарантує високу детермінованість виконання коду, що є критичною вимогою для забезпечення реакції системи в режимі реального часу. Повний життєвий цикл програми можна умовно розділити на єдиноразову фазу початкового налаштування та безперервний робочий цикл сканування простору.

Головний цикл розпочинається з фази збору просторових даних. Мікроконтролер надсилає стартову команду на проведення вимірювання для кожної адреси. Щоб не блокувати обчислювальне ядро порожніми циклами очікування, алгоритм переводить процесор у режим зниженого енергоспоживання, очікуючи на зміну логічних рівнів на лініях апаратних переривань. Після отримання даних настає фаза математичної обробки: усунення оптичних артефактів та конвертація дистанції в інтенсивність вібрації. Далі мікроконтролер ініціює тактильний відгук, переводячи

відповідні лінії драйверів у високий логічний рівень. Фінальною є фаза енергозбереження: алгоритм жорстко лімітує тривалість вібраційного імпульсу, переводить драйвери у режим сну та витримує динамічну паузу перед наступним скануванням для запобігання тактильній адаптації шкірних рецепторів [46].

Для підтвердження здатності описаного алгоритму функціонувати в режимі жорсткого реального часу необхідно провести розрахунок загального часу реакції системи (System Latency). Цей параметр визначає часовий інтервал від моменту фізичної появи перешкоди в зоні огляду до моменту відчуття тактильного відгуку користувачем. Загальний час реакції розраховується як сума часових затримок на кожному етапі програмно-апаратного конвеєра за формулою (4.1):

$$T_{sys} = t_{sens} + t_{i2c} + t_{mcu} + t_{mot} \quad (3.1)$$

де,

T_{sys} – загальний час реакції системи, мс;

t_{sens} – час експозиції та внутрішньої обробки оптичної матриці ToF-сенсора (для модуля VL53L7CX у стандартному режимі роботи цей параметр становить 33 мс);

t_{i2c} – час передачі масиву просторових даних по шині I2C на частоті 400 кГц (розрахунково становить близько 2 мс);

t_{mot} – інерційна затримка розгону ротора ексцентрикового вібромотора до відчутного рівня вібрації (для типових актуаторів становить близько 40 мс).

Підставивши ці значення у формулу (4.1), отримуємо загальну затримку:

$$T_{sys} = 33 + 2 + 1 + 40 = 76 \text{ мс}$$

Отриманий результат у 76 мілісекунд математично доводить високу ефективність розробленого алгоритму. Враховуючи, що середня швидкість руху пішохода становить близько 1.5 м/с, за час реакції системи користувач встигне зробити крок довжиною лише 11 сантиметрів. Цей показник значно менший за природний час реакції людини (який становить близько 200-250 мс), що гарантує надання завчасного та релевантного попередження про перешкоду, забезпечуючи високий рівень безпеки під час автономної просторової навігації.

Блок-схема роботи системи представлена у додатку Г.

4.4 Корпус пристрою

Розробка конструкції корпусу є одним із найважливіших етапів проєктування системи, оскільки від її ергономіки безпосередньо залежить комфорт експлуатації пристрою. За основу дизайну було обрано стандартний формфактор класичних окулярів. Це забезпечує соціальну непомітність апаратури, повністю звільняє руки користувача та дозволяє розташувати масив далекомірів на рівні голови, імітуючи природний напрямок людського погляду. Увесь цикл твердотілого моделювання деталей корпусу був реалізований у середовищі автоматизованого проєктування SolidWorks, що дозволило з високою точністю відтворити складні криволінійні поверхні та адаптувати внутрішні порожнини під габарити розроблених друкованих плат.

Конструктивно корпус розділено на три основні несучі елементи: масивну фронтальну частину (оправу) та дві дужки. Фронтальна оправа виконує функцію базового несучого елемента. У її центрі передбачено оптичне вікно для головного далекоміра, а базова внутрішня порожнина виконана у вигляді каскаду посадкових вирізів для головної друкованої плати. Модель фронтальної деталі корпусу зображено на рисунку 1.3.

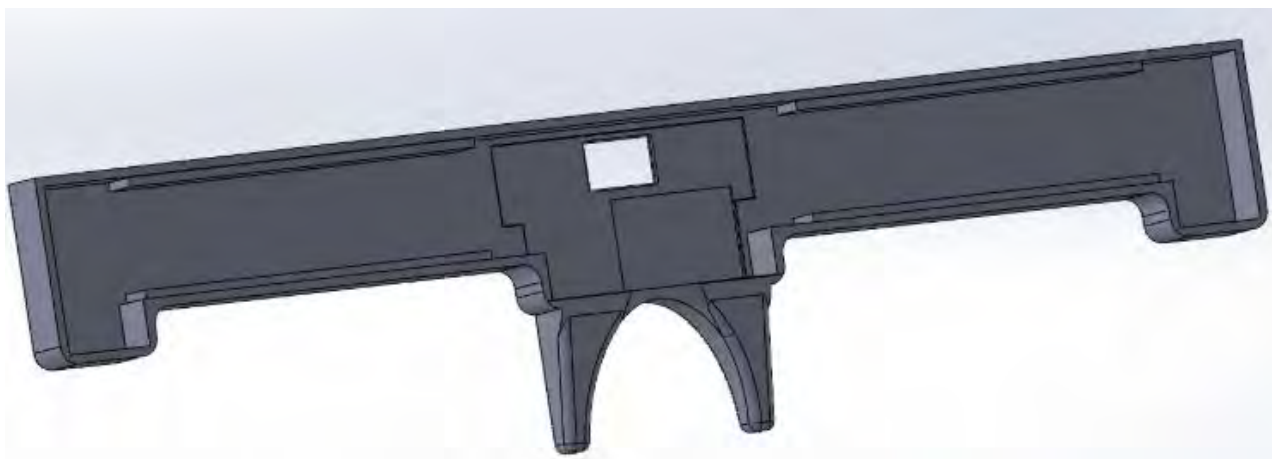


Рисунок 4.3 – Фронтальна деталь корпусу

Ліва дужка виконує роль ключового апаратного відсіку. Її внутрішня порожнина спеціально розширена для двоярусного вертикального розміщення акумулятора та головної керуючої плати. Таке перенесення значної частини маси на бічну дужку дозволяє оптимізувати центр ваги пристрою та знизити тиск на перенісся. На бічних площинах лівої дужки спроектовано ергономічні отвори для механічного перемикача

живлення та зарядного порту. Права дужка виступає симетричним аналогом, проте має спрощену внутрішню архітектуру та тонший класичний профіль, оскільки призначена виключно для розміщення однієї периферійної плати сенсора. Моделі лівої та правої дужки зображено на рисунку 1.4.

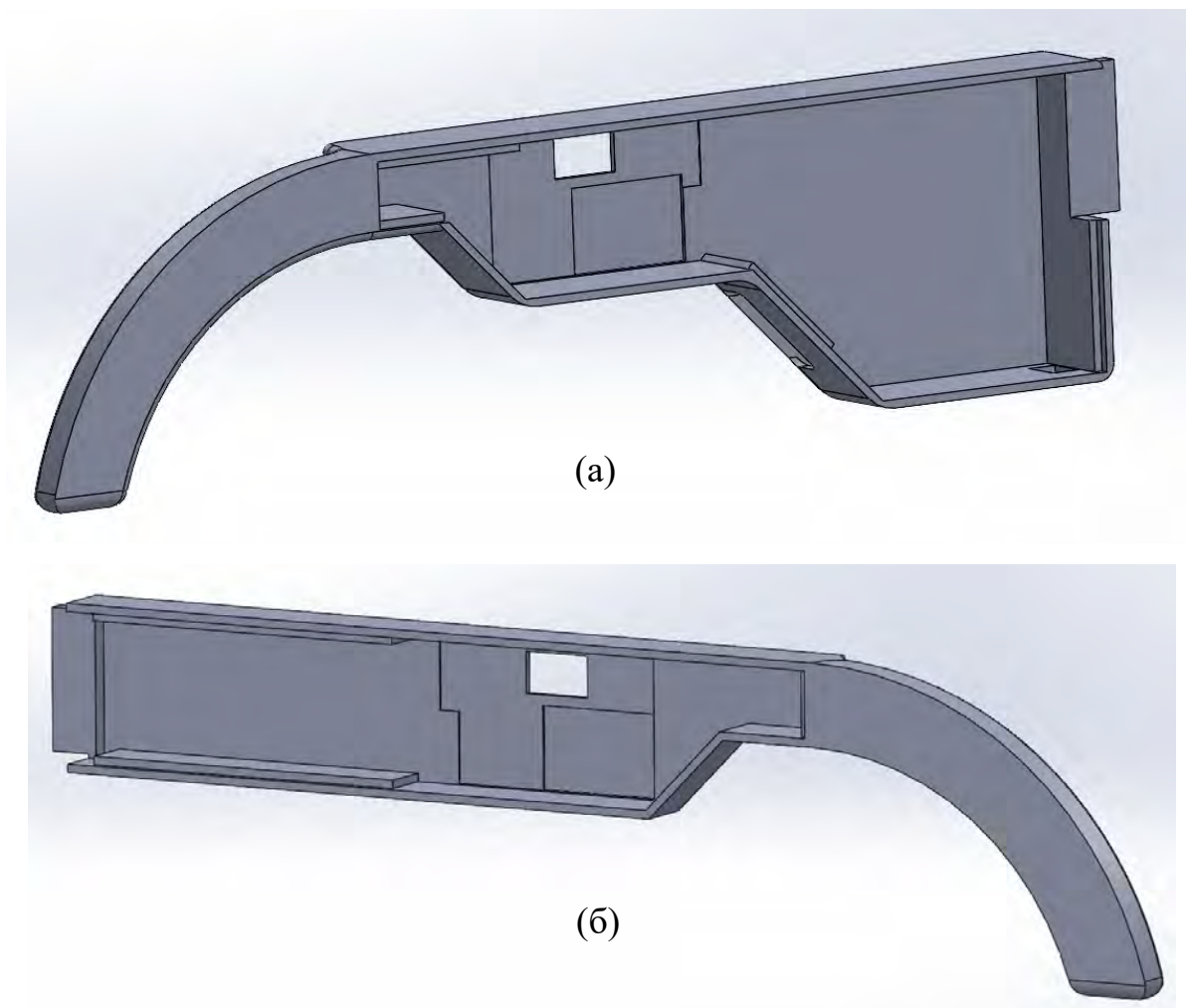


Рисунок 4.4 – Модель: а) ліва дужка; б) права дужка

Внутрішня архітектура всіх деталей утворює єдиний кабель-канал для безперешкодного протягування струмопровідних ліній від фронтальної плати до периферійних модулів. Під час складання всі електронні вузли надійно ізолюються від зовнішнього середовища трьома захисними кришками, які щільно фіксуються на спеціально спроектованих внутрішніх ребрах жорсткості.

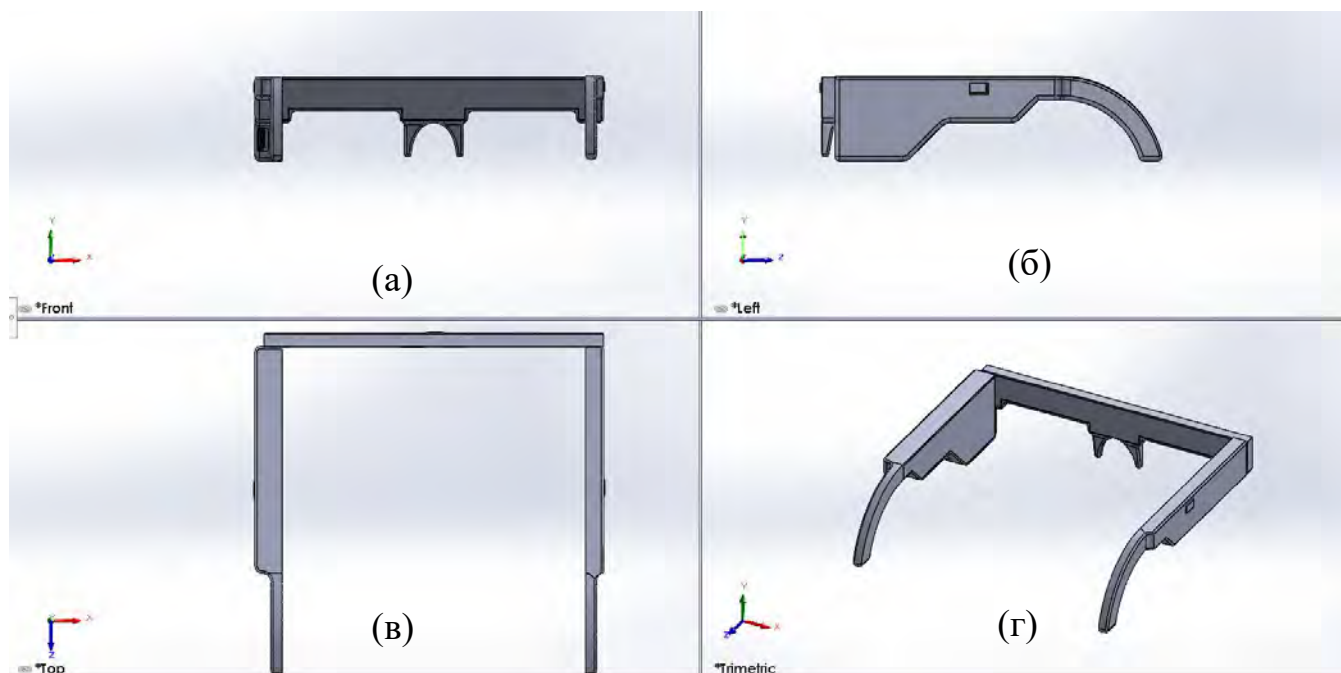


Рисунок 4.5 – Збірка корпусу: а) вигляд ззаду; б) вигляд зліва; в) вид зверху; г) ізометричний вигляд

4.5 Складання апаратного макету пристрою

Для забезпечення необхідного рівня мініатюризації, який є критичним для натільної електроніки, апаратна частина проектувалася виключно під технологію поверхневого монтажу. Це дозволило максимально щільно розмістити компоненти на двосторонньому текстоліті, мінімізувати довжину струмопровідних доріжок та повністю відмовитися від габаритних вивідних компонентів.

Зважаючи на прототипний характер розробки, виготовлення макета здійснювалося шляхом прецизійного ручного збирання. Завдяки ретельно продуманому компонуванню деталей на етапі трасування, більшість пасивних елементів (фільтруючі керамічні конденсатори, підтягувальні резистори) та роз'єми були успішно змонтовані за допомогою класичної ручної пайки. Для безпечного та якісного припаювання керуючого мікроконтролера, оптичних матричних далекомірів, мікросхем силових драйверів вібромоторів та перетворювача напруги використовувався спеціалізований гарячий стіл (платформа з нижнім підігрівом). Такий комбінований підхід дозволив рівномірно прогріти плату, забезпечити якісне оплавлення паяльної пасти під безвивідними корпусами мікросхем та уникнути термічного шоку або пошкодження чутливої оптики ToF-сенсорів. Спаяні плати зображено на рисунку 4.6.

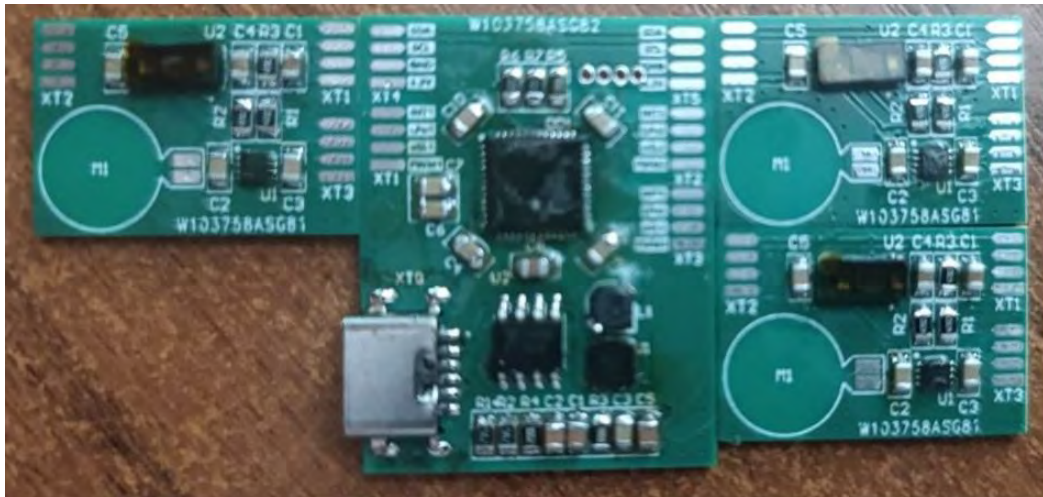


Рисунок 4.6 – Вручну зібрані друковані плати (головний та периферійні модулі) після поверхневого монтажу

Як видно з наведеної фотографії, центральним елементом апаратної збірки є головна плата керування (розташована по центру). Її компоновання повністю відповідає розробленій раніше структурній схемі. У центрі плати змонтовано обчислювальне ядро мікроконтролера, яке оточене необхідною пасивною обв'язкою. У правій нижній частині головної плати розміщено роз'єм живлення стандарту USB Type-C у 6-контактному SMD-виконанні. Поруч із ним розпаяно елементи підсистеми керування живленням: мікросхему контролера заряду літій-полімерного акумулятора та котушку індуктивності імпульсного перетворювача напруги. На краях плати згруповані контактні майданчики для подальшого підпаювання міжплатних провідників.

Поруч із головною платою на фотографії розміщені три ідентичні периферійні сенсорно-актуаторні модулі. Візуальною домінантою кожної такої плати є великий круглий майданчик із відповідною шовкографією (білим маркуванням). Ці зони спроектовані спеціально під габарити дискових ERM-вібромоторів, які згодом фіксуються безпосередньо на текстоліті за допомогою двостороннього адгезиву. Біля зони актуатора на кожній платі встановлено високоточний матричний ToF-далекомір (візуалізується як чорний прямокутний оптичний елемент). Також на периферійних модулях чітко видно мікросхеми силових драйверів. Наступним кроком стало виготовлення деталей просторового корпусу за допомогою технологій 3D-друку та безпосереднє компоновання електронних модулів, зображено на рисунку 4.7. Деталі корпусу (фронтальна оправа та дужки) видрукувані з міцного чорного пластику, що

забезпечує необхідну жорсткість конструкції та надійно захищає чутливу оптику від паразитного бокового засвічення.

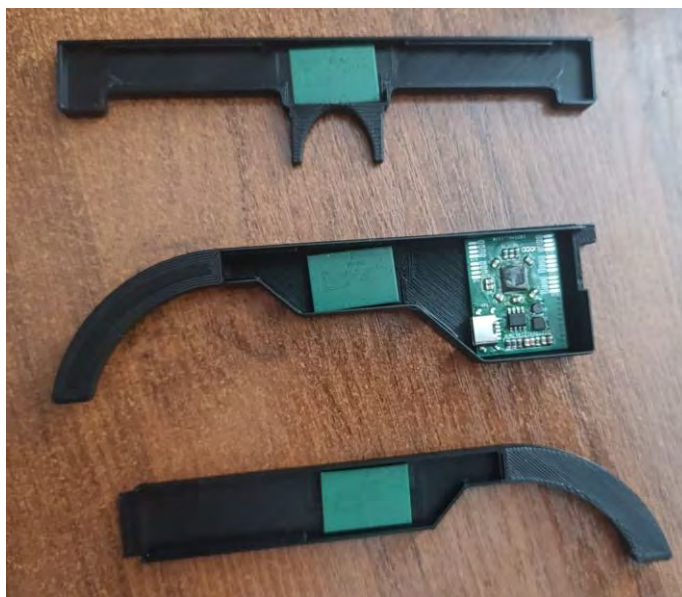


Рисунок 4.7 – Компонування електронних вузлів у надрукованому корпусі пристрою

Процес фізичного інтегрування апаратної частини всередині виготовленого корпусу відбувається відповідно до закладеної модульної архітектури. Як видно з фотографії процесу складання, кожна друкована плата ідеально входить у спеціально змодельовані посадкові заглиблення. У фронтальну оправу встановлюється центральна периферійна плата з далекоміром, який забезпечує сканування передньої просторової зони. На фото чітко видно зелений текстоліт плати, зафіксований у центрі оправы.

Найщільніше компонування має ліва дужка: у ній монтується акумуляторна батарея, над якою у два яруси розміщується головна керуюча плата та лівий периферійний модуль. На зображенні лівої дужки можна побачити встановлену у верхній відсік головну плату (роз'єм USB Type-C точно збігається з технологічним отвором у пластику) та периферійну плату у нижній частині відсіку. У внутрішню порожнину правої дужки встановлюється симетричний правий периферійний модуль.

На фінальному етапі макетування усі ці розділені електронні вузли об'єднуються в єдину мережу за допомогою гнучких струмопровідних дротів. Отриманий апаратний макет являє собою повністю зібраний, ергономічний та фізично функціональний прототип натільної системи, що підтверджує інженерну життєздатність закладених конструкторських та схемотехнічних рішень.

4.6 Висновки до розділу

Інтеграція розробленого алгоритмічного забезпечення, спроектованої мікроелектронної бази та ергономічної просторової моделі дозволила створити повноцінний, готовий до натурних випробувань фізичний макет асистивного комплексу. Завдяки застосуванню модульної архітектури програмного коду, динамічної переадресації сенсорів та оптимізованого циклу обробки даних, система здатна функціонувати в режимі жорсткого реального часу із загальною затримкою реакції всього у 76 мілісекунд.

Успішна апаратна реалізація прототипу, яка включала прецизійний ручний SMD-монтаж компонентів на індивідуальні друковані плати та їхнє точне компонування всередині виготовленого корпусу, повністю підтвердила інженерну життєздатність закладених схемотехнічних рішень. Водночас фізична реалізація пристрою у формфакторі класичних окулярів із продуманим розподілом маси та прихованою маршрутизацією комунікацій забезпечує високий рівень фізіологічного комфорту, надійно захищає апаратну базу від механічних пошкоджень та гарантує соціальну непомітність пристрою під час його щоденного використання.

ВИСНОВОК

У результаті виконання проєкту було успішно розв'язано актуальну інженерну та соціальну задачу – спроектовано автоматизовану систему просторової орієнтації з гаптичним зворотним зв'язком для осіб з порушеннями зору. Розроблений апаратний комплекс являє собою сучасний асистивний інструмент, який здатен суттєво підвищити рівень автономності та безпеки цільової аудиторії під час самотійного пересування. Використання концепції натільного пристрою у формфакторі класичних окулярів дозволило досягти високих показників ергономічності та вирішити проблему психологічного дискомфорту, яка часто супроводжує експлуатацію спеціалізованих медичних приладів.

У ході роботи було сформовано комплексну архітектуру пристрою, що базується на принципах модульності. Здійснено обґрунтований вибір мікроелектронної бази: високоточних матричних ToF-далекомірів, обчислювального мікроконтролерного ядра та компактних актуаторів. Розроблена електрична принципова схема проєктувалася з огляду на необхідність дотримання базових правил електромагнітної сумісності, стабілізації цифрових ліній зв'язку та безпечного контролю живлення від автономного акумулятора. Це створило надійний апаратний фундамент для стабільної роботи системи.

Було розроблено оптимізоване алгоритмічне забезпечення для функціонування в режимі реального часу. Реалізація динамічної програмної ініціалізації дозволила об'єднати масив сенсорів на єдиній шині I2C. Створена модель конвертації вимірної відстані у керуючі ШІМ-сигнали забезпечує формування інтуїтивно зрозумілої тактильної картини, завдяки чому користувач миттєво реагує на перешкоди у трьох незалежних просторових секторах. Завершальним етапом проєктування стала розробка ергономічної просторової моделі корпусу, яка забезпечила надійну фіксацію компонентів та приховану маршрутизацію комунікацій.

Виконаний комплекс робіт підтверджує технічну життєздатність запропонованої концепції та формує міцну базу для подальшої модернізації пристрою перед його серійним виробництвом. Перспективні напрямки апаратного вдосконалення передбачають перехід на гнучкі друковані плати (Flexible PCB), заміну інтегральних драйверів на компактні транзисторні комутаційні схеми та інтеграцію

модулів Bluetooth low energy і inertial measurement unit для динамічного відстеження рухів голови.

Програмний комплекс має значний потенціал до розширення завдяки впровадженню алгоритмів машинного навчання для класифікації типів перешкод та створенню мобільного додатка-компаньйона для індивідуального калібрування і бездротового оновлення системи. Конструктивні покращення будуть спрямовані на перехід до промислового лиття пластику, забезпечення захисту електроніки за стандартом IP67 та застосування гіпоалергенних матеріалів. Фінальним етапом розвитку проєкту стане проведення масштабних натурних випробувань за участю профільних фокус-груп, що дозволить здійснити медико-технічну сертифікацію розробки та успішно інтегрувати цей соціально важливий продукт у життя кінцевих споживачів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] «ISO 9999:2022. Assistive products for person with disability — Classification and terminology. International Organization for Standardization.,» 2022. [Онлайновий]. Available:
https://www.researchgate.net/publication/229633335_ISO_9999_Assistive_Products_for_Persons_with_Disability_Classification_and_Terminology.
- [2] E. Jones та S. Brown, «Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America,» *Classification and Overview of Assistive Devices for Mobility.*, pp. vol. 30, no. 4, pp. 783-798, 2019.
- [3] L. Harris, E. Miller та P. Patel, «Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation,» *Exoskeletons for persons with physical disabilities: current status and future prospects*, pp. vol. 18, no. 1, pp. 1-19, 2021.
- [4] A. Parker, T. Mitchell та P. Perez, «Acoustic Navigation Systems for Visually Impaired Pedestrians,» pp. vol. 20, no. 2, p. 488, 2020.
- [5] H. Nguyen та S. Singh, «Procedia Computer Science,» *Smart walking stick for visually impaired people with obstacle detection and navigation capabilities*, pp. vol. 165, pp. 292-299, 2020.
- [6] R. Fisher, S. Allen та G. Huang, «IEEE Transactions on Haptics,» *Development and Evaluation of a Novel Refreshable Braille Display Technology*, pp. vol. 12, no. 1, pp. 99-108, 2019.
- [7] J. Peterson, P. Roberts та B. Baker, «Cochlear Implants: A Comprehensive Review,» *The Lancet*, pp. vol. 396, no. 10255, pp. 917-930, 2020.
- [8] F. Moore та E. Smith, «International Journal of Human-Computer Studies,» *Accessibility Software for Visual Impairments: A Comparative Study of Screen Readers*, pp. vol. 147, p. 102579, 2021.
- [9] G. Martin, P. Kumar та H. Harris, «Cartography and Geographic Information Science,» *Tactile Mapping for the Visually Impaired: A Review of Technology and User Experience*, pp. vol. 45, no. 5, pp. 433-448, 2018.
- [10] J. Brown та L. Kim, *AI-Powered Smart Glasses for the Blind: A Comprehensive Review and Future Directions*, pp. vol. 22, no. 15, p. 5732, 2022.
- [11] C. Scott та A. Miller, «Effectiveness of the long cane for people with visual impairment: A systematic review,» *Ophthalmic & Physiological Optics*, pp. vol. 37, no. 3, pp. 288-300, 2017.
- [12] Z. Ahmed та S. Mahmud, «Obstacle Detection and Warning Systems for Visually Impaired: Survey on Sensor Technologies and Feedback Methods,» *Journal of Sensors*, pp. vol. 2017, pp. 1-19, 2017.

- [13] K. P. Sharma, «Barriers to the Use of Assistive Technology for Visually Impaired People,» *International Journal of Disability Management*, p. vol. 5, 2022.
- [14] N. Patel, S. Perez та P. Brown, «Haptic Feedback Systems for Navigation of Visually Impaired People: A Review,» *IEEE Transactions on Haptics*, pp. vol. 14, no. 4, pp. 783-798, 2021.
- [15] WeWALK Company, «WeWALK Smart Cane,» [Онлайновий]. Available: <https://wewalk.io/en/product/>.
- [16] A. & A. K. V. Gokulnath, «Sense Stride: Smart walking Cane for Visually Impaired Individuals using STM32H563ZI and Time-of-Flight Sensors with Haptic Feedback (Sense Stride),» 2025.
- [17] Envision Company, «dotLumen glasses for the Visually Impaired,» [Онлайновий]. Available: <https://letsenvision.com>.
- [18] Fovionics Company, «Fovionics AI-Powered Smart Glasses for Blind & Visually Impaired,» [Онлайновий]. Available: <https://fovionics.com>.
- [19] S. Kadam, P. Hinge та M. Dhere, «Haptic based walking stick for visually impaired people,» 2014.
- [20] H. Maidin, B. Nugroho, J. Yahya та L. Ping, «A Comprehensive Study of Ultrasonic Distance Measurement Sensors for Mobile Robot Positioning,» № DOI: 10.1109/JSEN.2018.2863795, 2018.
- [21] J. Davis, R. Brown, P. Nguyen та P. Smith, «Infrared Distance Sensor Principles and Application for Short-Range Proximity Detection,» № DOI: 10.1109/JSEN.2019.2901234, 2019.
- [22] D. Zhang, S. Sharma та J. Patel, «Time-of-Flight (ToF) Sensing Principle and its Applications in High-Precision Robotics and Navigation,» № DOI: 10.1109/JPS.2020.3005876, 2020.
- [23] В. М. Антонюк та О. А. Повшенко, «Пристрій просторової орієнтації з гаптичним зворотним зв'язком для людей з порушенням зору,» *Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні : збірник праць XXI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*, p. С. 144–146, 10–11 грудня 2025.
- [24] «Deep Sleep (Low Power Sleep) Mode & Wakeup,» [Онлайновий]. Available: <https://deepbluembedded.com/stm32-deep-sleep-low-power-sleep-mode-wakeup/>.
- [25] «Presentation of the STM32 direct,» [Онлайновий]. Available: https://www.st.com/resource/en/product_training/STM32G0-System-Direct-memory-access-controller-DMA.pdf.

- [26] «Eccentric Rotating Mass (ERM) Technology,» [Онлайновий]. Available: <https://www.ti.com/video/5096929144001>.
- [27] «Pulse Width Modulation Used for Motor Control Applications,» [Онлайновий]. Available: <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/pulse-width-modulation.html>.
- [28] «How Does a Linear Resonant Actuator Work?,» [Онлайновий]. Available: <https://www.ti.com/document-viewer/lit/html/SSZTAP9>.
- [29] STMicrocontrollers, «datasheet VL53L7CX,» [Онлайновий]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1447576/STMICROELECTRONICS/VL53L7CX.html>.
- [30] «dTOF: принцип роботи та ключові компоненти.,» [Онлайновий]. Available: <http://uk.lumispot-tech.com/news/dtof-sensor-principle-and-key-components/>.
- [31] «What is a SPAD Array?,» [Онлайновий]. Available: <https://www.photon-force.com/what-is-a-spad-array/>.
- [32] «datasheet STM32F411CEU6,» [Онлайновий]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/929999/STMICROELECTRONICS/STM32F411CEU6.html>.
- [33] «datasheet DRV8837C,» [Онлайновий]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/929999/STMICROELECTRONICS/STM32F411CEU6.html>.
- [34] «What is an over-current protection (OCP) for DC/DC converters?,» [Онлайновий]. Available: <https://www.nisshinbo-microdevices.co.jp/en/faq/021.html>.
- [35] «What is the thermal shutdown (TSD) that is available with LDO regulators?,» [Онлайновий]. Available: https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/faq/linear_low-dropout-voltage/low-dropout11.html.
- [36] «Undervoltage lockout (UVLO) function of load switch ICs,» [Онлайновий]. Available: <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/e-learning/basics-of-load-switch-ics/chap2/chap2-6.html>.
- [37] «PCM,» [Онлайновий]. Available: <https://www.dnkpowers.com/all-things-you-need-to-know-about-pcm-of-lithium-battery/>.
- [38] «Buck-Boost Converter,» [Онлайновий]. Available: <https://www.analog.com/en/resources/glossary/buck-boost.html>.
- [39] «CC-CV charging profile,» [Онлайновий]. Available: <https://elintacharge.com/glossary/cc-cv-charging-profile/>.

- [40] «datasheet TPS63001,» [Онлайновий]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/138123/TI/TPS63001.html>.
- [41] «datasheet TP4056,» [Онлайновий]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/138123/TI/TPS63001.html>.
- [42] «Optimizing Power Management in IoT Devices Using Machine Learning Techniques,» [Онлайновий]. Available: https://www.researchgate.net/publication/381017521_Optimizing_Power_Management_in_IoT_Devices_Using_Machine_Learning_Techniques.
- [43] Britannica, «Weber's law, also known as: Weber-Fechner law,» [Онлайновий]. Available: <https://www.britannica.com/science/Webers-law>.
- [44] Andrew Taylor BSc MA FRSA - Art and Engineering in Product Design, Design for Maintainability.
- [45] J. S. Smith та J. A. Cook, «Embedded Software Architecture,» 2008.
- [46] О. Povshenko та V. Antoniuk, «Development of a spatial orientation system with haptic feedback for people with visual impairments,» *Sciences of Europe*, т. 1, № 190, pp. 81-88, 2026.
- [47] Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.
- [48] Муравйов О. В. Передача даних та сучасні методи обробки сигналів. Практикум: навчальний посібник / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2022. – 55 с.
- [49] Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.
- [50] Комп'ютерне проєктування електронних схем. Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / Р. М. Галаган ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,33 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.

- [51] Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
- [52] Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.
- [53] Петрик В.Ф., Протасов А.Г., Галаган Р.М., Муравйов О.В., Момот А.С. Бездротові технології в автоматизації неруйнівного контролю. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Том 32 (71), № 5. с. 25-29.