

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

БУЯР Володимир Романович

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ
МОБІЛЬНОГО РОБОТА / AUTOMATED MOBILE ROBOT
POSITION DETERMINATION SYSTEM**

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота за ступенем вищої освіти "бакалавр"

Виконав студент групи АКІТ-41
В.Р.Буйар

Науковий керівник:
д.т.н., проф. Н.Я. Возна

Дипломну роботу допущено до захисту:
"_____" _____ 20____ р.

Завідувач кафедри
_____ А.І.Сегін

Тернопіль 2026

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Ступінь вищої освіти "бакалавр"
Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін

“ ____ ” _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
БУЯР Володимир Романович

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема роботи

_____ Автоматизована система визначення положення мобільного робота /
Automated mobile robot position determination system _____

_____ керівник роботи _____ д.т.н., проф. Н.Я. Возна _____

затверджені наказом по університету від "01" грудня 2025 р. № 894

2. Строк подання студентом закінченої дипломної роботи 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до роботи:

_____ 1. Характеристики технічних засобів – мікроконтролер (STM32), енкодери для
вимірювання переміщення, гіроскоп для визначення орієнтації, інфрачервоні
датчики для вимірювання відстані _____

_____ 2. Параметри системи – координати положення робота, кут орієнтації, швидкість
руху та відстань до об'єктів _____

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

_____ 1. Аналіз мобільних роботів та методів визначення їх положення _____

_____ 2. Розробка системи визначення положення мобільного робота _____

_____ 3. Дослідження системи визначення положення мобільного робота _____

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

_____ 1. Структурна схема системи визначення положення мобільного робота _____

_____ 2. Алгоритм визначення положення мобільного робота _____

_____ 3. Структура модуля керування _____

_____ 4. Структурна схема системи керування роботою робота _____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Возна Н.Я.		
2	Возна Н.Я.		
3	Возна Н.Я.		

7. Дата видачі завдання 01 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз мобільних робіт та методів визначення їх положення	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	
2	Розробка системи визначення положення мобільного робота	16.01.2026р. – 15.03.2026р.	
3	Дослідження системи визначення положення мобільного робота	16.03.2026р. – 30.04.2026р.	
4	Оформлення кваліфікаційної роботи та її подача для перевірки на ознаки плагіату	01.05.2026р. – 25.05.2026р.	

Студент

(підпис)

В.Р. Буяр

Керівник роботи

(підпис)

д.т.н., проф. Н.Я. Возна

АНОТАЦІЯ

Буяр В.Р. Автоматизована система визначення положення мобільного робота.
– Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У роботі проведено аналіз сучасних методів позиціонування, зокрема одометричних, інерціальних та сенсорних, а також досліджено особливості їх застосування в умовах обмеженого середовища.

Обґрунтовано доцільність використання комбінованого підходу до визначення положення мобільного робота, що базується на об'єднанні даних від енкодерів, гіроскопа та датчиків відстані. Розроблено структуру системи визначення положення та алгоритм її функціонування, який забезпечує інтеграцію інформації від різних сенсорів та підвищення точності позиціонування.

Виконано проєктування апаратної частини мобільного робота, що включає вибір мікроконтролера, сенсорів та виконавчих елементів. Запропоновано функціональну структуру системи керування та обґрунтовано вибір основних компонентів.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої системи для створення мобільних роботів, здатних до автономної навігації в умовах невизначеного середовища.

Ключові слова: автоматизована система, мобільний робот, визначення положення, позиціонування, енкодери, гіроскоп, датчики відстані.

ABSTRACT

Buyar Volodymyr Automated mobile robot position determination system. – Manuscript.

Qualification work submitted for obtaining the Bachelor's degree in specialty 151 "Automation and Computer-Integrated Technologies", educational and professional program. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The paper analyzes modern positioning methods, in particular odometric, inertial, and sensor-based approaches, and investigates the features of their application in constrained environments.

The feasibility of using a combined approach to determining the position of a mobile robot, based on the integration of data from encoders, a gyroscope, and distance sensors, is substantiated. The structure of the positioning system and its operating algorithm are developed, ensuring the integration of information from various sensors and improving positioning accuracy.

The hardware design of the mobile robot has been carried out, including the selection of a microcontroller, sensors, and actuators. A functional structure of the control system is proposed, and the choice of the main components is justified.

The practical significance of the work lies in the possibility of using the developed system for creating mobile robots capable of autonomous navigation in uncertain environments.

Keywords: automated system, mobile robot, position determination, positioning, encoders, gyroscope, distance sensors.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ ТА МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ПОЛОЖЕННЯ.....	8
1.1 Загальні відомості про мобільні роботи	8
1.2 Методи визначення положення мобільного робота	12
1.3 Аналіз існуючих рішень для визначення положення мобільних роботів.....	14
2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА.....	23
2.1 Визначення вимог до проєктованої системи.....	23
2.2 Обґрунтування структури системи визначення положення	24
2.3 Вибір та обґрунтування сенсорів	25
2.4 Розроблення алгоритму визначення положення.....	28
3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА	31
3.1 Проєктування електронної частини робота	31
3.2 Дослідження точності вимірювання відстані	48
3.3 Дослідження переміщення робота та система автоматичного регулювання.....	50
3.4 Дослідження орієнтації робота	53
3.5 Аналіз сумарної похибки системи.....	54
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	58
ДОДАТКИ.....	62

					ДП.АКІТ.10659690.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Буяр В.Р.			Автоматизована система визначення положення мобільного робота / Automated mobile robot position determination system	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Возна Н.Я.					5	61
Консульт.		Возна Н.Я.				ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41		
Н. Контр.								
Затверд.		Сегін А.І.						

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку робототехніки та автоматизованих систем особливої актуальності набувають задачі автономної навігації мобільних роботів. Визначення положення мобільного об'єкта в просторі є однією з ключових задач, від точності вирішення якої залежить ефективність функціонування роботизованих систем у різних галузях, зокрема в промисловості, логістиці, медицині та сфері обслуговування.

Сучасні мобільні роботи використовують різноманітні методи позиціонування, серед яких найбільш поширеними є одометричні, інерціальні та сенсорні методи. Однак кожен із них має свої обмеження, що пов'язані з наявністю похибок вимірювання та впливом зовнішніх факторів. Це обумовлює необхідність розробки комбінованих систем визначення положення, які забезпечують підвищення точності та надійності роботи мобільних роботів [1-3].

Особливої актуальності набуває створення автоматизованих систем визначення положення мобільних роботів із використанням сенсорної фузії, що дозволяє інтегрувати дані з різних джерел та компенсувати недоліки окремих методів.

Актуальність даної роботи зумовлена необхідністю підвищення точності визначення положення мобільних роботів в умовах обмеженого середовища та наявності перешкод. Використання окремих сенсорів не забезпечує необхідної точності, що вимагає розробки комбінованих систем позиціонування. Розробка таких систем є важливою задачею сучасної автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Метою даної роботи є розробка автоматизованої системи визначення положення мобільного робота на основі комбінованого використання сенсорів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз існуючих методів визначення положення мобільних роботів;

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- дослідити сучасні конструкції мобільних роботів та систем позиціонування;
- розробити структуру автоматизованої системи визначення положення;
- обґрунтувати вибір сенсорів для системи;
- розробити алгоритм визначення положення мобільного робота;
- проаналізувати похибки та ефективність застосованого підходу.

Об'єктом дослідження є процес визначення положення мобільного робота у просторі.

Предметом дослідження є методи та засоби побудови автоматизованої системи визначення положення мобільного робота з використанням комбінованих сенсорів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці автоматизованої системи визначення положення мобільного робота, яка може бути використана при створенні робототехнічних систем різного призначення. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність позиціонування та надійність роботи мобільних роботів у складних умовах експлуатації.

Апробація. Автоматизована система визначення положення / Володимир Буйар, Сергій Войцешко, Оксана Бурлак, Наталія Возна/ Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026). - Тернопіль, 2026. – С.107-110.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1 АНАЛІЗ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ ТА МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ПОЛОЖЕННЯ

1.1 Загальні відомості про мобільні роботи

Мобільні роботи є одним із ключових напрямів розвитку сучасної робототехніки та автоматизованих систем. На відміну від стаціонарних промислових роботів, вони здатні переміщуватися у просторі та виконувати поставлені завдання в динамічному середовищі без жорсткої прив'язки до фіксованого місця розташування. Це зумовлює широке застосування мобільних роботів у логістиці, промисловості, дослідницьких задачах, а також у сфері автономних транспортних систем.

Залежно від середовища функціонування мобільні роботи поділяються на такі основні типи:

- наземні роботи (Unmanned Ground Vehicles, UGV), що пересуваються за допомогою коліс, гусениць або крокуючих механізмів;
- повітряні роботи (Unmanned Aerial Vehicles, UAV), які здійснюють переміщення в повітряному просторі;
- підводні роботи (Autonomous Underwater Vehicles, AUV), що функціонують у водному середовищі.

У межах даної роботи розглядаються наземні мобільні роботи, які переміщуються за допомогою колісного рушія, оскільки саме цей тип є найбільш поширеним у задачах автономної навігації та визначення положення [4-6].

Однією з ключових характеристик мобільного робота є спосіб організації його руху, відповідно до якого розрізняють голономні та неголономні системи. Голономні роботи мають можливість рухатися у довільному напрямку без обмежень, пов'язаних із кінематикою руху. Неголономні роботи, навпаки, мають кінематичні обмеження, що виникають внаслідок взаємодії коліс із поверхнею. Зокрема, колеса таких роботів не

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

можуть здійснювати поперечне ковзання, а рух відбувається лише у напрямку обертання коліс.

Класифікація мобільних роботів також здійснюється за ступенями мобільності та керованості, які визначаються кількістю незалежних ступенів свободи руху та можливістю керування орієнтацією коліс. Ці параметри безпосередньо впливають на маневреність, точність переміщення та складність алгоритмів керування роботом.

Важливим аспектом функціонування мобільного робота є здатність визначати своє положення у просторі. Для цього використовуються різноманітні вимірювальні системи, що базуються на поєднанні даних із сенсорів, таких як енкодери, гіроскопи, акселерометри та датчики відстані. Саме ефективна обробка цих даних дозволяє реалізувати алгоритми навігації та забезпечити точне позиціонування робота під час виконання поставлених задач.

1.1.1 Голономні та неголономні мобільні роботи

Однією з основних характеристик мобільних роботів є тип кінематичних обмежень, що визначають можливості їх переміщення у просторі. За цією ознакою мобільні роботи поділяються на голономні та неголономні.

Голономні роботи характеризуються відсутністю кінематичних обмежень на рух у площині. Це означає, що робот може переміщуватися у довільному напрямку незалежно від своєї орієнтації. Така властивість досягається за рахунок використання спеціальних коліс, наприклад, всенапрямлених (шведських) коліс, які забезпечують можливість руху одночасно вздовж кількох осей.

Неголономні мобільні роботи, на відміну від голономних, мають обмеження на можливі траєкторії руху. Ці обмеження виникають внаслідок фізичних властивостей взаємодії коліс із поверхнею, зокрема відсутності можливості бокового ковзання. У таких роботах рух здійснюється лише в

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

напрямку обертання коліс, що ускладнює процес керування та планування траєкторії.

Більшість практичних реалізацій мобільних роботів, особливо колісного типу, належать саме до неголономних систем. Це обумовлено простотою конструкції, енергоефективністю та надійністю таких рішень. Водночас неголономність системи ускладнює задачу визначення положення робота, оскільки для точного позиціонування необхідно враховувати кінематичні обмеження та накопичення похибок під час руху.

У контексті автоматизованих систем визначення положення важливо враховувати, що тип кінематики робота безпосередньо впливає на вибір алгоритмів навігації та обробки сенсорної інформації.

1.1.2 Класи мобільних роботів за ступенями мобільності та керованості

Для більш детального опису кінематичних властивостей мобільних роботів використовується класифікація за ступенями мобільності та керованості. Такий підхід дозволяє формалізувати можливості руху робота та оцінити складність його керування [7].

Клас мобільного робота задається парою параметрів (Δm , Δs) [2, 3], де:

Δm — ступінь мобільності, що визначає кількість незалежних ступенів свободи руху платформи, які можуть змінюватися за рахунок керування приводами;

Δs — ступінь керованості, що характеризує кількість незалежно керованих кутів орієнтації коліс.

Для забезпечення можливості руху мобільного робота ці параметри повинні задовольняти наступні умови:

$$1 \leq \Delta m \leq 3; \quad 0 \leq \Delta s \leq 2; \quad 2 \leq \Delta m + \Delta s \leq 3$$

Ця класифікація дозволяє виділити кілька основних типів мобільних роботів.

До класу (1,1) належать роботи, що мають кінематику, подібну до автомобіля. Вони характеризуються високою стійкістю до нерівностей

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

поверхні, однак мають значний радіус повороту, що обмежує їх маневреність.

Клас (1,2) включає роботи з двома керованими колесами та одним опорним колесом. Такі системи забезпечують підвищену маневреність, але мають складнішу систему керування.

До класу (2,0) відносяться роботи з двома ведучими колесами, розташованими на одній осі (диференціальний привід). Це одна з найпоширеніших конструкцій, яка поєднує простоту реалізації та ефективність керування.

Клас (2,1) характеризується наявністю одного ведучого та двох опорних коліс. Такі роботи мають обмежену маневреність і складніші алгоритми керування.

До класу (3,0) належать голономні роботи, що використовують всенаправлені колеса. Вони здатні рухатися у довільному напрямку без зміни орієнтації, однак потребують складних алгоритмів керування.

На основі наведеної класифікації можна виділити основні класи мобільних роботів (рисунок 1.1)

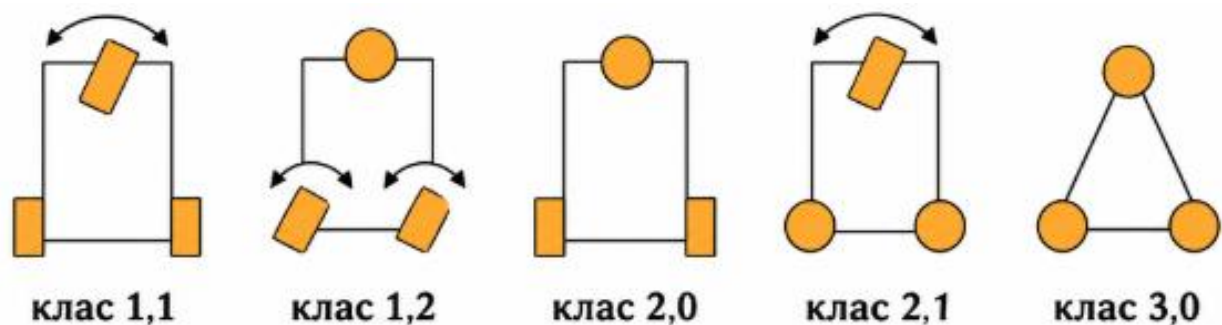


Рисунок 1.1 – Класи мобільних роботів

Зазначена класифікація має важливе значення при проектуванні систем визначення положення мобільного робота, оскільки від кінематичної структури безпосередньо залежить математична модель руху, а також точність і складність алгоритмів позиціонування.

1.2 Методи визначення положення мобільного робота

Однією з основних завдань у системах мобільної робототехніки є визначення поточного положення робота у просторі. Від точності та швидкодії цієї підсистеми залежить ефективність навігації, стабільність руху та здатність виконувати поставлені завдання в автономному режимі.

Під визначенням положення мобільного робота розуміють оцінку його координат у вибраній системі відліку, а також орієнтації відносно цієї системи. Для реалізації даної задачі застосовуються різні методи, що базуються на обробці інформації, отриманої від вимірювальних сенсорів. Як правило, жоден окремий сенсор не забезпечує достатньої точності та надійності, тому на практиці використовуються комбіновані підходи [8-11].

Відповідно до принципу отримання інформації, методи визначення положення мобільного робота можна поділити на одометричні, інерціальні, відносні та комбіновані.

1.2.1 Одометричні методи визначення положення

Одометричні методи ґрунтуються на визначенні переміщення робота шляхом вимірювання параметрів обертання його коліс. Основним джерелом інформації в цьому випадку є енкодери, які встановлюються на вали двигунів.

Енкодери формують імпульсні сигнали, кількість яких пропорційна куту повороту колеса. Знаючи радіус колеса та кількість імпульсів за один оберт, можна визначити пройдений шлях робота. Для мобільних роботів із диференціальним приводом положення визначається на основі різниці переміщень лівого та правого коліс.

Перевагами одометричних методів є простота реалізації, висока швидкодія та низька вартість. Однак основним недоліком є накопичення похибки, що виникає внаслідок ковзання коліс, нерівностей поверхні та

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

неточностей вимірювання. Це призводить до поступового відхилення розрахованого положення від реального.

1.2.2 Інерціальні методи визначення положення

Інерціальні методи базуються на використанні датчиків, що вимірюють кутову швидкість та лінійні прискорення робота. До таких сенсорів належать гіроскопи та акселерометри, які часто об'єднуються в єдині інерціальні вимірювальні модулі (IMU).

Гіроскопи дозволяють визначати зміну орієнтації робота, зокрема кут повороту відносно вертикальної осі. Це особливо важливо для задач навігації, оскільки навіть незначні похибки в орієнтації можуть призвести до значних відхилень траєкторії руху.

Основною проблемою інерціальних методів є наявність похибок вимірювання, зокрема дрейфу гіроскопа, який призводить до накопичення помилки з часом. Тому такі методи рідко використовуються самостійно і, як правило, поєднуються з іншими джерелами інформації.

1.2.3 Методи визначення відносного положення

Методи визначення відносного положення ґрунтуються на вимірюванні відстані до об'єктів навколишнього середовища. У мобільних роботах для цього широко застосовуються оптичні датчики, зокрема інфрачервоні (IR) сенсори.

Принцип роботи таких датчиків полягає у випромінюванні світлового сигналу та реєстрації відбитого променя. Інтенсивність відбитого сигналу залежить від відстані до перешкоди, що дозволяє оцінити положення робота відносно стін або інших об'єктів середовища.

Перевагою даного підходу є можливість отримання інформації про навколишнє середовище в реальному часі. Це дозволяє коригувати траєкторію руху та зменшувати накопичення похибок, характерних для

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

одометричних методів. Водночас точність вимірювання може залежати від умов освітлення, властивостей поверхні та характеристик сенсора.

1.2.4 Комбіновані методи визначення положення

У сучасних системах мобільної робототехніки найбільш ефективним підходом є використання комбінованих методів, що базуються на поєднанні даних з різних сенсорів. Такий підхід отримав назву сенсорної фузії.

Сенсорна фузія дозволяє компенсувати недоліки окремих методів та підвищити загальну точність визначення положення. Наприклад, дані енкодерів можуть використовуватися для оцінки переміщення, а інформація з гіроскопа — для уточнення орієнтації. Додатково, використання датчиків відстані дозволяє коригувати положення відносно навколишніх об'єктів.

У результаті об'єднання інформації з різних джерел формується більш точна та стійка оцінка стану мобільного робота. Це є важливо для реалізації автономних систем навігації, особливо в умовах невизначеного або змінного середовища.

1.3 Аналіз існуючих рішень для визначення положення мобільних роботів

Сучасні мобільні роботи, зокрема роботи класу Micromouse, є ефективною платформою для дослідження методів автономної навігації та визначення положення. У таких роботах використовуються компактні, енергоефективні та високоточні вимірювальні системи, що дозволяють реалізувати алгоритми орієнтації у просторі та побудови траєкторії руху.

Аналіз існуючих конструкцій показує, що більшість мобільних роботів використовують комбіновані системи позиціонування, які базуються на поєднанні даних від енкодерів, гіроскопів та оптичних сенсорів відстані. Такий підхід дозволяє досягти високої точності визначення положення навіть у складних умовах середовища.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Одним із найбільш ефективних представників класу Micromouse є робот GreenGigant v4.1 (рисунок 1.2), який характеризується високою швидкодією та точністю навігації [12].



Рисунок 1.2 – Робот GreenGigant v4.1

Як джерело живлення в роботі використовується літій-полімерний (Li-Po) акумулятор ємністю 120 мА·год, який поєднує малу вагу з достатнім часом автономної роботи. Центральним елементом обчислювальної системи є мікроконтролер STM32F405RGT6 на базі ядра ARM Cortex-M4, що виконує обробку даних і координує роботу всіх підсистем робота. Важливою перевагою цього ядра є підтримка апаратних обчислень із плаваючою комою одинарної точності, що значно підвищує швидкість виконання складних алгоритмів керування та навігації.

Для забезпечення руху застосовуються високоточні двигуни Faulhaber 1717 006SR IE2-512 із вбудованими енкодерами, які дають змогу точно визначати швидкість обертання та пройдений шлях. Керування двигунами реалізується за допомогою драйверів Zetex ZXМНС3F381N8 та МАХ4427, що забезпечують стабільну та ефективну роботу приводу.

Орієнтація робота в просторі визначається за допомогою гіроскопа ADXRS620, тоді як вимірювання відстані до стін лабіринту здійснюється інфрачервоною системою, що складається з діода SFH4545 і фототранзистора TEFT4300.

Загалом, конструкція робота базується на типових компонентах і технічних рішеннях, характерних для більшості систем цього класу, що забезпечує баланс між продуктивністю, точністю та енергоефективністю.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Робот Tetra (рисунок 1.3) є одним із найшвидших у своєму класі та демонструє ефективну реалізацію системи позиціонування [13].

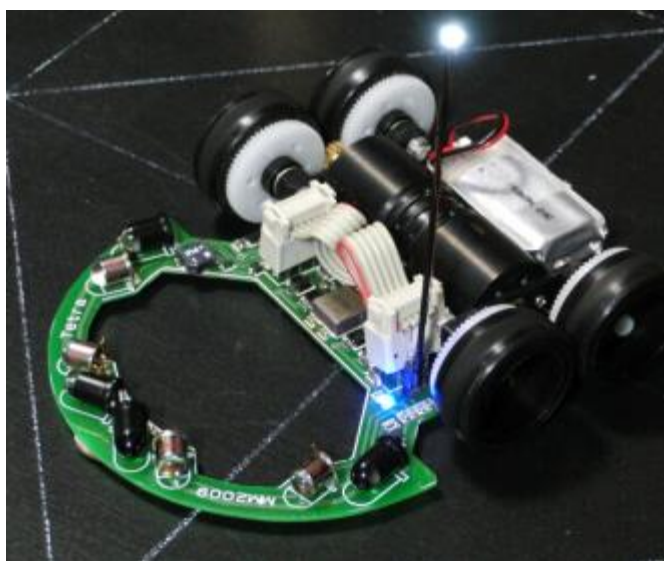


Рисунок 1.3 – Робот Tetra

Система побудови карти лабіринту в цьому роботі базується на використанні чотирьох оптичних далекомірів, енкадерів, вбудованих у двигуни, а також гіроскопа. Рух робота забезпечується двигуном постійного струму, доповненим спеціально розробленою передавальною системою (редуктором) та колесами типу Mini-Z, які характеризуються високим коефіцієнтом зчеплення з поверхнею.

Робот TETRA є прикладом високоефективної конструкції, оптимізованої для максимально швидкого проходження лабіринту. Його система навігації базується на поєднанні оптичних далекомірів, енкадерів і гіроскопа, що дозволяє точно визначати положення в просторі та мінімізувати похибки вимірювань. Важливу роль відіграє також привідна система, яка включає двигун постійного струму з індивідуально спроектованим редуктором, що забезпечує оптимальне співвідношення швидкості та керованості.

Додатковою перевагою є використання коліс типу Mini-Z з високим коефіцієнтом зчеплення, що дозволяє ефективно проходити повороти навіть на великій швидкості. Поєднання точної сенсорної системи, продуманої

механіки та ефективних алгоритмів керування забезпечило роботу можливість досягти дуже високих результатів, зокрема рекордного часу проходження лабіринту за 4,7 секунди.

Водночас така конструкція вимагає складного налаштування та точної калібровки, що може ускладнювати її відтворення. Незважаючи на це, TETRA є показовим прикладом оптимального інженерного рішення, у якому всі компоненти працюють узгоджено для досягнення максимальної продуктивності. Цей робот має компактні розміри приблизно $90 \times 74 \times 22$ мм і масу близько 71 г, що сприяє досягненню високої швидкості під час руху. Живлення системи забезпечується літій-полімерним акумулятором (*Li-Po*) ємністю 70 мА·год, який дозволяє зменшити загальну вагу конструкції при збереженні достатнього часу роботи.

У ролі обчислювального блоку використовується мікроконтролер сімейства STM32, який виконує обробку даних і забезпечує керування всіма підсистемами робота. Зокрема, він координує роботу приводів, системи орієнтації та сенсорів відстані.

Рух робота забезпечується двигунами Faulhaber 1717 003SR IE2-512 з вбудованими енкодерами, які дозволяють точно визначати швидкість обертання та пройдений шлях. Для ефективного керування цими двигунами застосовуються драйвери LTC4442 та ECH8659, що забезпечують стабільну роботу приводів і точне регулювання їх параметрів.

Орієнтація робота в просторі визначається за допомогою гіроскопа ADXRS610, який надає інформацію про кутову швидкість і допомагає підтримувати заданий напрям руху. Додатково, система вимірювання відстані реалізована на основі інфрачервоного діода SFH4550 та фототранзистора TPS601, що дозволяє роботу виявляти перешкоди та орієнтуватися в середовищі.

Завдяки комплексній взаємодії всіх цих компонентів конструктору вдалося вирішити низку складних технічних задач. Зокрема, робот характеризується високою маневреністю, незважаючи на використання лише

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

двох коліс по обидва боки платформи. При цьому забезпечено можливість майже миттєвої зупинки без виникнення ковзання, що є критично важливим для точного дотримання заданої траєкторії руху.

Робот Min7 (рисунок 1.4) відзначається високою швидкістю руху та ефективною системою сенсорного забезпечення [14].



Рисунок 1.4 – Робот Min7

Робот MIN7 є однією з найшвидших конструкцій у категорії Micromouse, що підтверджується встановленим у 2011 році рекордом під час змагань All Japan Micromouse Contest, де він досяг центру лабіринту за 3,9 секунди. Конструкція робота оптимізована для руху на високих швидкостях, які можуть сягати приблизно 3,5 м/с. Така продуктивність досягається завдяки поєднанню точної сенсорної системи, ефективних алгоритмів керування та добре збалансованої механічної частини. Важливу роль відіграє також стабільність руху та здатність зберігати контроль на великих швидкостях, що дозволяє роботу швидко проходити складні ділянки лабіринту без втрати точності.

Параметри та компоненти робота MIN7.

Робот MIN7 має компактні габарити приблизно 100 × 75 мм і масу близько 90 г, що забезпечує оптимальний баланс між стабільністю та

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

швидкістю руху. Живлення системи здійснюється від літій-полімерного акумулятора (Li-Po) ємністю 150 мА·год, який забезпечує достатньо тривалу автономну роботу порівняно з іншими подібними конструкціями.

Центральним керуючим елементом робота є мікроконтролер STM32F103RE, який виконує обробку даних із сенсорів і реалізує алгоритми керування рухом. На основі цих даних мікроконтролер координує роботу всіх підсистем пристрою.

Рух робота забезпечується двигунами Faulhaber 1717 T06 SR IE2-56 з вбудованими енкодерами, що дозволяють точно визначати швидкість обертання та інші параметри руху. Для керування двигунами використовується драйвер Zetex ZXМНС3А01Т8, який забезпечує необхідну потужність і точність керування.

Орієнтація робота в просторі визначається за допомогою гіроскопа ADXRS610, що дозволяє відстежувати зміну напрямку руху. Водночас система вимірювання відстані до стін лабіринту реалізована з використанням інфрачервоного діода SFH4511 та фототранзистора TEFT4300, що дає змогу ефективно виявляти перешкоди та забезпечувати точне проходження маршруту.

Таким чином, узгоджена робота обчислювального блоку, приводів і сенсорних систем забезпечує високу точність, стабільність та ефективність функціонування робота MIN7.

Робот Rapid є прикладом ефективної реалізації мобільної платформи з високими динамічними характеристиками [15].

Робот Rapid (рисунок 1.5) має габарити приблизно 112×77 мм та масу близько 85 г, що забезпечує оптимальне поєднання компактності та стабільності під час руху. Живлення системи здійснюється від літій-полімерного акумулятора ZIPPY Lightmax 138 mAh, який відзначається малою вагою та достатньою енергоємністю для автономної роботи.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

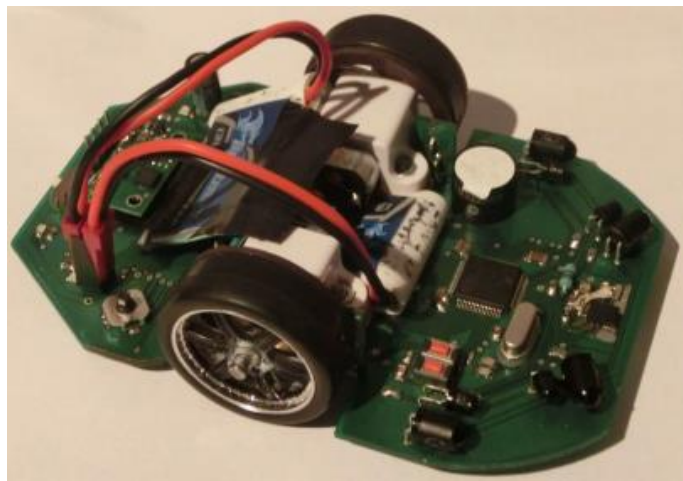


Рисунок 1.5 – Робот Rapid

Центральним елементом керування є мікроконтролер STM32F405RGT6, який виконує обробку даних із сенсорів і реалізує алгоритми керування рухом, координуючи роботу всіх підсистем робота.

Рух забезпечується двигунами Pololu 10:1, що дозволяють досягати високої швидкості пересування. Керування двигунами здійснюється за допомогою драйвера TB6612FNG, який забезпечує необхідну точність і стабільність роботи приводів.

Для забезпечення орієнтації в просторі використовується гіроскоп L3GD20, що дозволяє визначати зміну напрямку руху. Водночас точне вимірювання переміщення реалізується за допомогою енкодера AS5304, який забезпечує високу роздільну здатність і точність визначення положення.

Система визначення відстані до перешкод базується на інфрачервоному діоді SFH4511 та фототранзисторі TEFT4300, що дозволяє роботу ефективно виявляти стіни лабіринту та коригувати траєкторію руху.

Таким чином, узгоджена робота обчислювального блоку, приводів і сенсорних систем забезпечує високу точність, швидкодію та ефективність функціонування робота Rapid.

Робот Vampire2 (рисунок 1.6) є прикладом збалансованого підходу до побудови системи визначення положення [16].

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Рисунок 1.6 – Робот Vampire2

Центральним обчислювальним елементом системи є мікроконтролер STM32F407VGT6, який виконує обробку даних із сенсорів і реалізує алгоритми керування, забезпечуючи узгоджену роботу всіх підсистем робота.

Рух робота забезпечується двигунами Pololu 30:1, які характеризуються підвищеним крутним моментом, що є важливим для стабільного розгону та подолання інерційних навантажень. Керування двигунами здійснюється за допомогою драйвера TB6612FNG, який забезпечує надійну та точну роботу приводів.

Для визначення орієнтації в просторі використовується гіроскоп L3GD20, що дозволяє відстежувати зміну напрямку руху. Вимірювання переміщення реалізовано за допомогою енкодера AS5306, який забезпечує достатню точність позиціонування та контроль швидкості.

Система вимірювання відстані до стін лабіринту базується на інфрачервоному діоді SFH4511 та фототранзисторі TEFT4300, що дає змогу ефективно виявляти перешкоди та коригувати траєкторію руху.

Таким чином, поєднання обчислювального блоку, приводів і сенсорних систем забезпечує ефективну, точну та стабільну роботу робота VAMPIRE 2 в умовах проходження лабіринту.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Проведений аналіз існуючих рішень показав, що для визначення положення мобільного робота найчастіше використовується комбінація таких сенсорів:

- енкодери для визначення переміщення;
- гіроскопи для визначення орієнтації;
- оптичні датчики для визначення відстані до об'єктів.

Жоден із зазначених сенсорів не забезпечує достатньої точності при самостійному використанні, тому в сучасних системах застосовується підхід **сенсорної фузії** [17, 18].

Отже, найбільш ефективним рішенням є побудова комбінованої системи визначення положення, яка дозволяє компенсувати недоліки окремих методів та підвищити загальну точність позиціонування мобільного робота.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

2.1 Визначення вимог до проєктованої системи

Проєктування автоматизованої системи визначення положення мобільного робота є складною інженерною задачею, що передбачає врахування як конструктивних, так і функціональних обмежень. Основною метою розробки є забезпечення точного, стабільного та швидкодіючого визначення координат і орієнтації робота у процесі його руху.

Відповідно до проведеного аналізу існуючих рішень, ефективність системи позиціонування визначається точністю вимірювання фізичних величин, що характеризують рух робота, а також здатністю обробляти ці дані в реальному часі. До таких величин належать пройдений шлях, кут повороту та відстань до об'єктів навколишнього середовища [19-22].

При формуванні вимог до системи визначення положення необхідно враховувати обмеження, характерні для мобільних роботів. Зокрема, робот повинен мати компактні габарити та малу масу, що забезпечує можливість маневрування та досягнення високих швидкостей руху. Як зазначено у зразку, габаритні розміри робота повинні бути меншими за розмір комірки робочого середовища, що обумовлює необхідність мінімізації конструкції.

Крім того, важливим є забезпечення низького розташування центра мас та мінімального моменту інерції, що дозволяє покращити динамічні характеристики та керованість робота.

З урахуванням наведених факторів до системи визначення положення висуваються такі основні вимоги [19, 20]:

- забезпечення високої точності визначення координат та орієнтації;
- функціонування в режимі реального часу;
- стійкість до впливу зовнішніх факторів та перешкод;
- мінімізація похибок вимірювання;

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- забезпечення стабільності результатів.

Таким чином, система визначення положення повинна забезпечувати комплексне вимірювання параметрів руху мобільного робота та їх подальшу обробку з метою отримання достовірної інформації про його стан.

2.2 Обґрунтування структури системи визначення положення

Система визначення положення мобільного робота будується за принципом багаторівневої обробки інформації, що включає етапи вимірювання, обробки та формування керуючих впливів.

Типовий мобільний робот складається з таких функціональних підсистем: система живлення, вимірювальна система, мікроконтролер та виконавчі механізми. У контексті даної роботи основна увага приділяється саме вимірювальній підсистемі, яка забезпечує отримання інформації про стан робота та його положення у просторі.

Вимірювальна система включає сукупність сенсорів, призначених для визначення:

- відстані до найближчих об'єктів;
- пройденого шляху;
- кутової орієнтації робота.

Отримані дані надходять до мікроконтролера, який здійснює їх обробку та формує сигнали керування виконавчими механізмами. Таким чином, забезпечується замкнений цикл функціонування системи.

Важливим аспектом побудови системи є забезпечення узгодженої роботи всіх її елементів. Це досягається шляхом використання єдиного обчислювального ядра та стандартизованих інтерфейсів обміну даними.

Загальна структура системи визначення положення мобільного робота представлена на рисунку 2.1.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Рисунок 2.1 – Структурна схема системи визначення положення мобільного робота

Структурна схема відображає взаємозв'язок між сенсорними, обчислювальними та виконавчими компонентами.

2.3 Вибір та обґрунтування сенсорів

2.3.1 Вибір датчиків відстані

Система вимірювання відстані повинна бути стійкою до зовнішніх перешкод, зокрема до змін освітлення. Крім того, вимірювання мають виконуватися максимально швидко, щоб забезпечити ефективне керування роботом. З цією метою зазвичай застосовують інфрачервоні сенсори.

На ринку доступна велика кількість готових оптичних інфрачервоних датчиків, наприклад Sharp GP2Y0A21YK0F. Однак їхнім недоліком є відносно великі габарити або обмежений діапазон вимірювання, що робить їх не завжди придатними для компактних роботів типу Micromouse.

Більш ефективним рішенням є використання окремих компонентів - інфрачервоного діода та фототранзистора. Такий підхід дозволяє створити компактну, легку та просту у реалізації вимірювальну систему, де для визначення відстані достатньо виміряти напругу на фототранзисторі.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для підвищення точності вимірювань доцільно використовувати діоди з вузьким кутом випромінювання. Також важливо, щоб діод і фототранзистор працювали в однаковому діапазоні довжин хвиль.

Принцип роботи системи полягає в тому, що інфрачервоний діод випромінює світловий промінь, який відбивається від перешкоди та повертається до приймача. Відбитий сигнал частково відкриває фототранзистор. Оскільки інтенсивність відбитого випромінювання обернено пропорційна квадрату відстані до об'єкта, значення напруги на фототранзисторі можна використовувати для оцінки цієї відстані.

2.3.2 Вибір енкодерів

Для коректного руху в лабіринті робот повинен пересуватися з високою точністю. Зокрема, рух по прямій траєкторії має відбуватися стабільно та без відхилень.

У теорії, якщо на два двигуни постійного струму подати однакову напругу, їхні вали повинні обертатися з однаковою кутовою швидкістю. Проте на практиці це не так: через виробничі відмінності та зовнішні фактори швидкості обертання можуть відрізнятися, що призводить до відхилення робота від прямолінійного руху.

Для усунення цієї проблеми необхідно використовувати систему керування із замкненим контуром (із зворотним зв'язком). Це досягається шляхом вимірювання фактичної кутової швидкості та внесення коригувань у сигнали керування двигунами.

Інформацію про кутову швидкість можна отримати, використовуючи тахогенератор (тахометричну динамо-машину), напруга на виході якої пропорційна швидкості обертання вала.

Іншим поширеним методом є застосування енкодерів, які поділяються на абсолютні та інкрементальні [23] (рисунок 2.2).

Інкрементальний енкодер формує на виході імпульси, кількість яких відповідає обертанню вала. Основною характеристикою такого енкодера є

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

роздільна здатність, яка визначається кількістю імпульсів на один оберт. Чим більша ця величина, тим вищою є точність вимірювання.

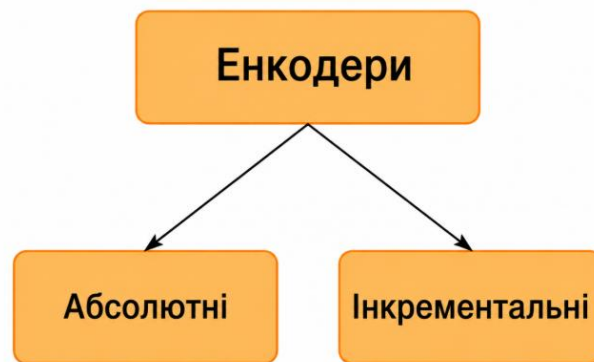


Рисунок 2.2 - Класифікація енкодерів за способом вимірювання

Конструкція інкрементального енкодера є відносно простою. Вона включає джерело світла (випромінювач) і приймач - фототранзистор. Між ними розташований диск (тарча), частково прозорий і частково затемнений.

Світло від випромінювача проходить через диск і потрапляє на фототранзистор (рисунок 2.3). Залежно від того, чи пропускає диск світло в конкретний момент, фототранзистор відкривається або залишається закритим. У результаті на виході формується прямокутний сигнал: високий рівень відповідає відкритому стану фототранзистора.



Рисунок 2.3 - Диски енкодерів:

(а) - інкрементальний енкодер, (б) - абсолютний енкодер

Абсолютні енкодери визначають положення валу на основі зчитування цифрового коду з диску енкодера. Кожному положенню відповідає унікальне числове значення, закодоване у вигляді двійкового або коду Грея.

На практиці частіше використовується код Грея, оскільки він зменшує ймовірність виникнення помилок під час зчитування, зокрема грубих помилок, пов'язаних із переходами між станами.

Важливою перевагою абсолютних енкодерів є те, що вони зберігають інформацію про поточне положення навіть після вимкнення живлення, на відміну від інкрементальних енкодерів.

2.3.3 Вибір гіроскопа

Для визначення орієнтації мобільного робота використовується гіроскоп, який вимірює кутову швидкість обертання.

Інтегрування сигналу гіроскопа дозволяє отримати значення кута повороту, що є необхідним для коректного визначення траєкторії руху. Однак гіроскоп характеризується наявністю систематичної похибки - дрейфу, що призводить до накопичення помилки з часом.

З метою зменшення впливу дрейфу доцільно використовувати комбіновану обробку даних із застосуванням інших сенсорів.

2.4 Розроблення алгоритму визначення положення

Розроблений алгоритм визначення положення мобільного робота (рисунок 2.4) базується на комбінованій обробці інформації, отриманій від різномірних сенсорів, зокрема енкодерів, гіроскопа та датчиків відстані. Такий підхід дозволяє реалізувати принцип **сенсорної фузії** та забезпечити підвищення точності визначення координат і орієнтації робота у процесі його руху.

На початковому етапі роботи алгоритму здійснюється ініціалізація системи, яка передбачає налаштування мікроконтролера, приведення сенсорів у робочий режим та задання початкових координат і кута орієнтації робота. Це дозволяє визначити початкову точку відліку, відносно якої в подальшому здійснюється обчислення переміщення.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк. 28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

У процесі функціонування системи алгоритм працює у циклічному режимі, що забезпечує безперервне оновлення інформації про положення робота. На кожній ітерації циклу виконується зчитування даних із сенсорів. Зокрема, отримуються значення приросту імпульсів енкодерів, що відповідають обертанню лівого та правого коліс, дані гіроскопа щодо кутової швидкості, а також інформація від датчиків відстані, яка характеризує положення робота відносно навколишніх об'єктів.

На основі даних енкодерів визначається лінійне переміщення робота. Для цього обчислюється переміщення кожного колеса, після чого визначається середнє значення, яке використовується як оцінка пройденого шляху. Одночасно з цим, на основі показів гіроскопа виконується визначення зміни кута орієнтації робота шляхом інтегрування кутової швидкості за часом. Отримане значення дозволяє оцінити зміну напрямку руху.

Подальший етап алгоритму передбачає формування попередньої оцінки положення робота на основі **одометричних** даних. Використовуючи обчислене лінійне переміщення та кут орієнтації, визначаються нові координати робота у вибраній системі відліку. Однак такий підхід характеризується накопиченням похибок, зумовлених ковзанням коліс, нерівностями поверхні та неточністю вимірювань.

З метою підвищення точності визначення положення здійснюється корекція отриманих координат на основі даних датчиків відстані. Аналізуючи значення відстаней до перешкод, алгоритм визначає відхилення фактичного положення робота від розрахованого та виконує відповідне уточнення координат. Така корекція дозволяє компенсувати похибки та зменшити вплив дрейфу гіроскопа.

Після виконання корекції здійснюється оновлення оцінки положення робота, що включає координати та кут орієнтації. Оновлені значення використовуються як вихідні дані для наступної ітерації алгоритму.

На завершальному етапі кожного циклу виконується перевірка умови продовження роботи системи. У разі необхідності подальшого

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

функціонування алгоритм переходить до наступного циклу обробки даних. Таким чином забезпечується безперервне визначення положення мобільного робота в режимі реального часу.

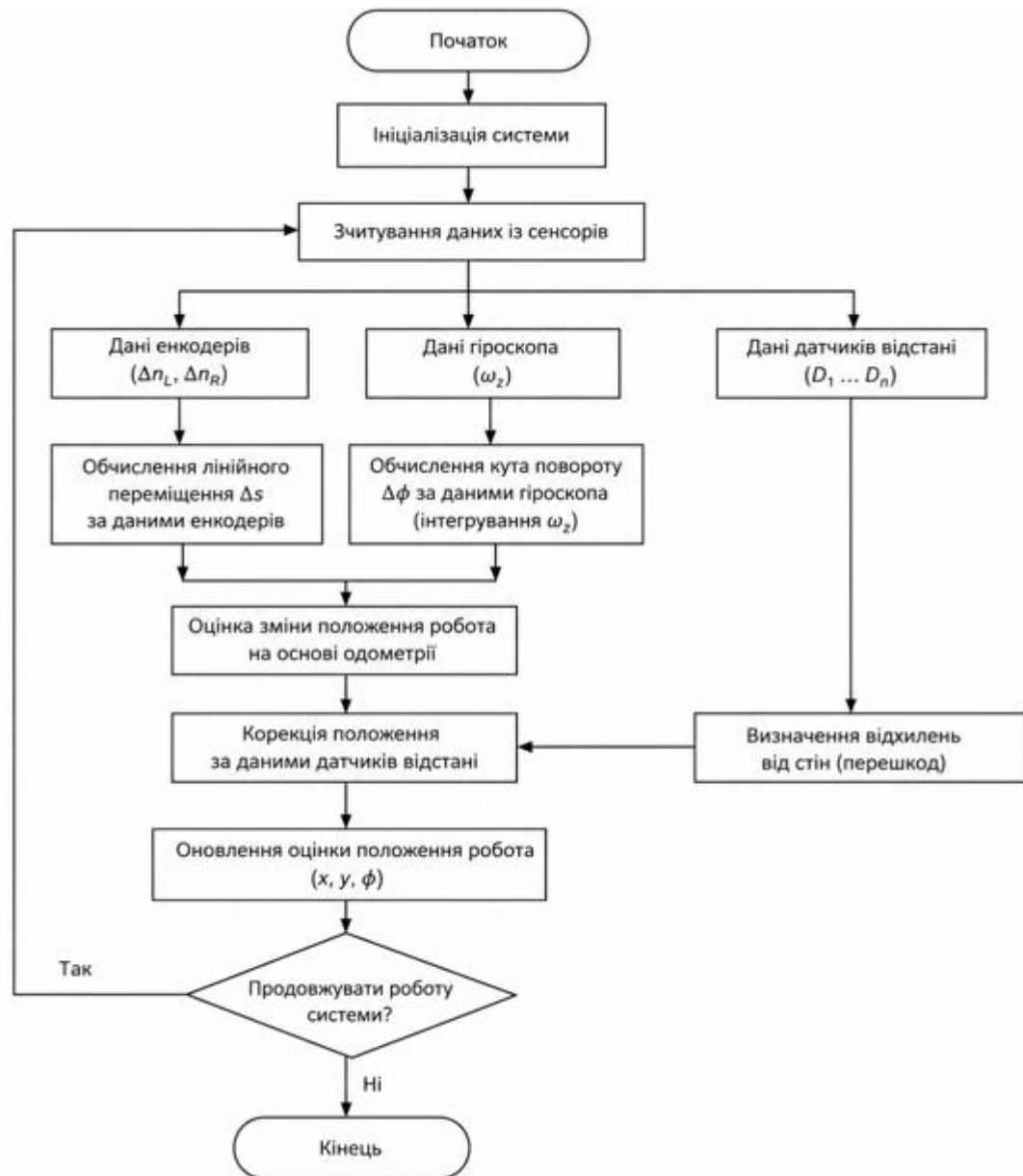


Рисунок 2.4 – Алгоритм визначення положення мобільного робота

Застосування запропонованого алгоритму дозволяє інтегрувати дані від різних сенсорів та забезпечити підвищення точності і надійності визначення положення мобільного робота в умовах невизначеного середовища.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

3.1 Проектування електронної частини робота

При написанні даного розділу використані літературні джерела [24-34].

3.1.1 Модуль живлення

Модуль живлення складається з двох лінійних стабілізаторів напруги, перемикача, фільтрувальних конденсаторів, а також світлодіодів, які сигналізують про наявність напруги на відповідних рівнях живлення.

Робот живиться від літій-полімерного акумулятора, що складається з двох елементів із номінальною напругою 3,7 В кожен. Таким чином, сумарна номінальна напруга живлення становить приблизно 7,4 В.

Окремі компоненти робота потребують різних рівнів напруги для коректної роботи, тому в системі застосовано два стабілізатори напруги. У результаті формується три рівні живлення, необхідні для різних підсистем робота. Схему модуля живлення наведено на рисунку 3.1.

Лінійні стабілізатори, на відміну від імпульсних перетворювачів, мають відносно низький коефіцієнт корисної дії (3.1), що приводить до втрат енергії у вигляді тепла:

$$\eta = \frac{P_{wy}}{P_{we}} \cdot 100\% = \frac{U_{wy} \cdot I_{wy}}{U_{we} \cdot I_{we}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Використовуючи формулу (3.2), було оцінено очікувані втрати потужності на стабілізаторах.

$$P_{strat} = (U_{we} - U_{wy}) \cdot I_{obc} \quad (3.2)$$

Розрахунки виконано за заданих значень струму навантаження та вхідної напруги, а результати наведено в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 - Втрати потужності на стабілізаторах

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

U_{we} [V]	U_{wy} [V]	I_{obc} [A]	P_{strat} [W]
7,4	5,0	0,2	0,48
5,0	3,3	0,2	0,34

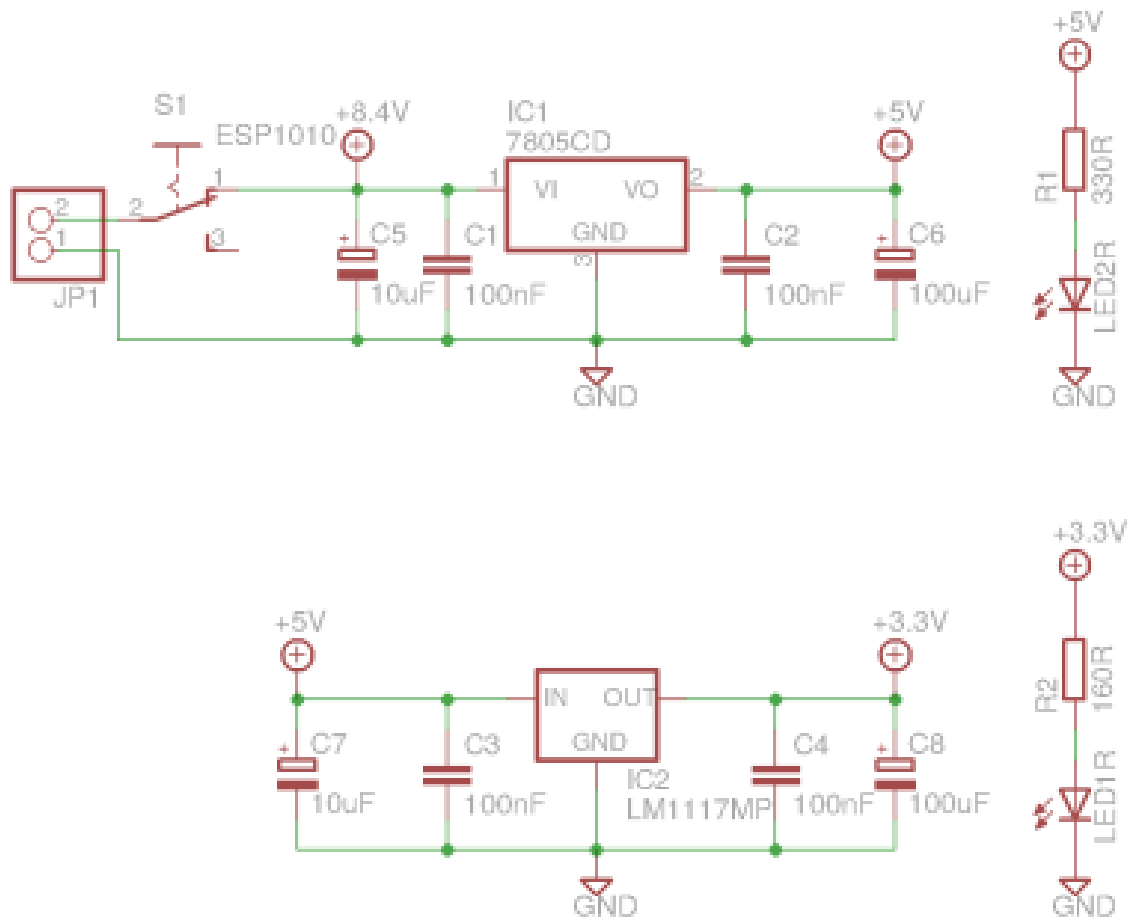


Рисунок 3.1 - Схема модуля живлення

У процесі розрахунків було визначено втрати потужності, що виникають у лінійних стабілізаторах напруги під час роботи системи. Ці втрати зумовлені різницею між вхідною та вихідною напругою, яка розсіюється у вигляді тепла.

Отримані результати показують, що при заданих умовах навантаження стабілізатори можуть генерувати помітну кількість теплових втрат, що необхідно враховувати під час проєктування системи живлення. Зокрема, це впливає на вибір компонентів і потребу в тепловідведенні для забезпечення стабільної та надійної роботи робота.

3.1.2 Модуль керування

Модуль керування є одним із основних елементів у структурі робота. Його основне призначення - координація роботи всіх підсистем для виконання поставленого завдання.

Як показано на рисунку 3.2, модуль отримує сигнали від вимірювальних систем, після чого обробляє отриману інформацію та формує керуючі сигнали для двигунів. Крім того, він забезпечує взаємодію робота з зовнішнім середовищем.

Схема електронної реалізації модуля керування наведена на рисунку 3.3.

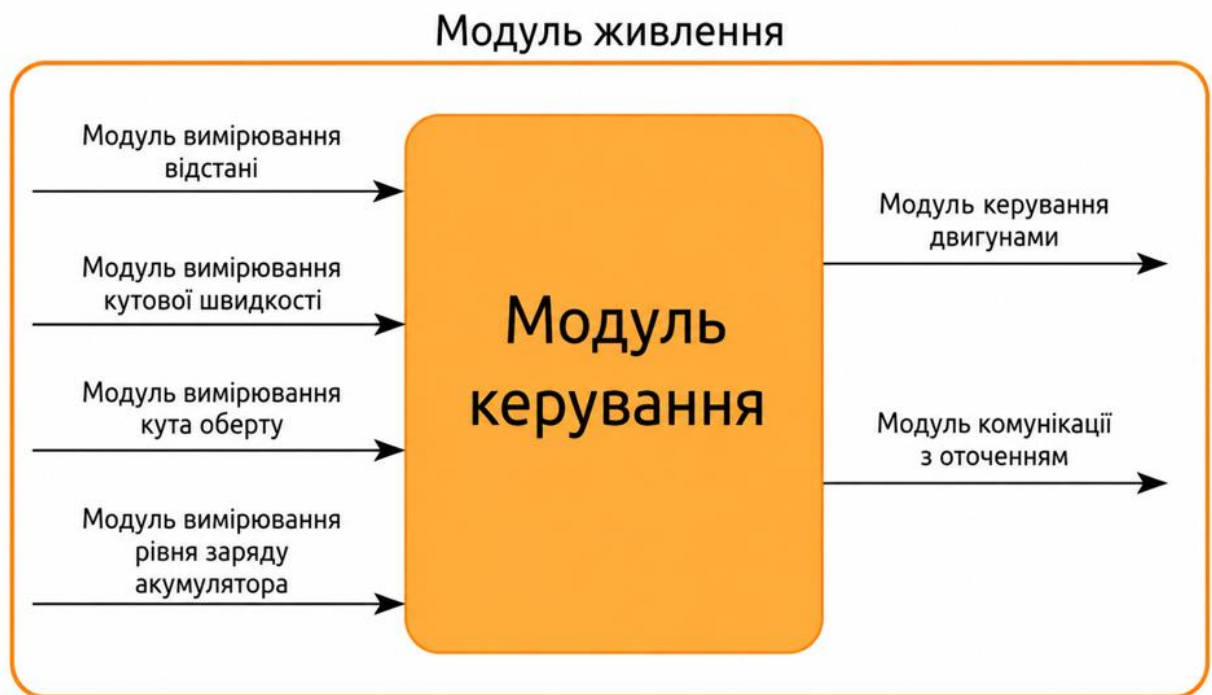


Рисунок 3.2 - Структура модуля керування

Як модуль керування було обрано мікроконтролер STM32F103RCT6, оснащений сучасним 32-бітним ядром ARM Cortex-M3. Він характеризується низьким енергоспоживанням і працює з тактовою частотою 72 МГц, що забезпечує достатню продуктивність для обробки даних і керування роботом.

Крім того, мікроконтролер містить 16-бітні таймери, необхідні для керування двигунами за допомогою широтно-імпульсної модуляції (PWM), а також підтримує апаратну обробку квадратурних сигналів. Наявність механізму прямого доступу до пам'яті (Direct Memory Access, DMA) дозволяє зменшити навантаження на процесор, зокрема під час виконання циклічних операцій або передачі великих обсягів даних, наприклад, з АЦП до пам'яті.

Мікроконтролер підтримує різноманітні інтерфейси зв'язку, серед яких UART, USART, SPI, I²C, USB та CAN, що забезпечує гнучкість у підключенні периферійних пристроїв.

Важливою перевагою є широка популярність мікроконтролерів сімейства STM32, їх доступна ціна, наявність на ринку та велика кількість навчальних матеріалів.

Обрано корпус типу LQFP-64, який поєднує компактність із можливістю відносно простого паяння навіть у домашніх умовах.

3.1.3 Модуль вимірювання відстані

Даний модуль складається з чотирьох інфрачервоних діодів, чотирьох фототранзисторів, а також підсилювального каскаду. Схема модуля вимірювання відстані приведена на рисунку 3.4.

Принцип роботи модуля є відносно простим. Інфрачервоний діод випромінює світловий сигнал у діапазоні інфрачервоних хвиль. Якщо цей сигнал потрапляє на перешкоду, він відбивається від неї та повертається до приймача.

Фототранзистор складається з бази, емітера та колектора, причому перехід колектор–база функціонує подібно до фотодіода. Падаюче на нього випромінювання спричиняє виникнення базового струму, який, у свою чергу, викликає пропорційний струм колектора.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

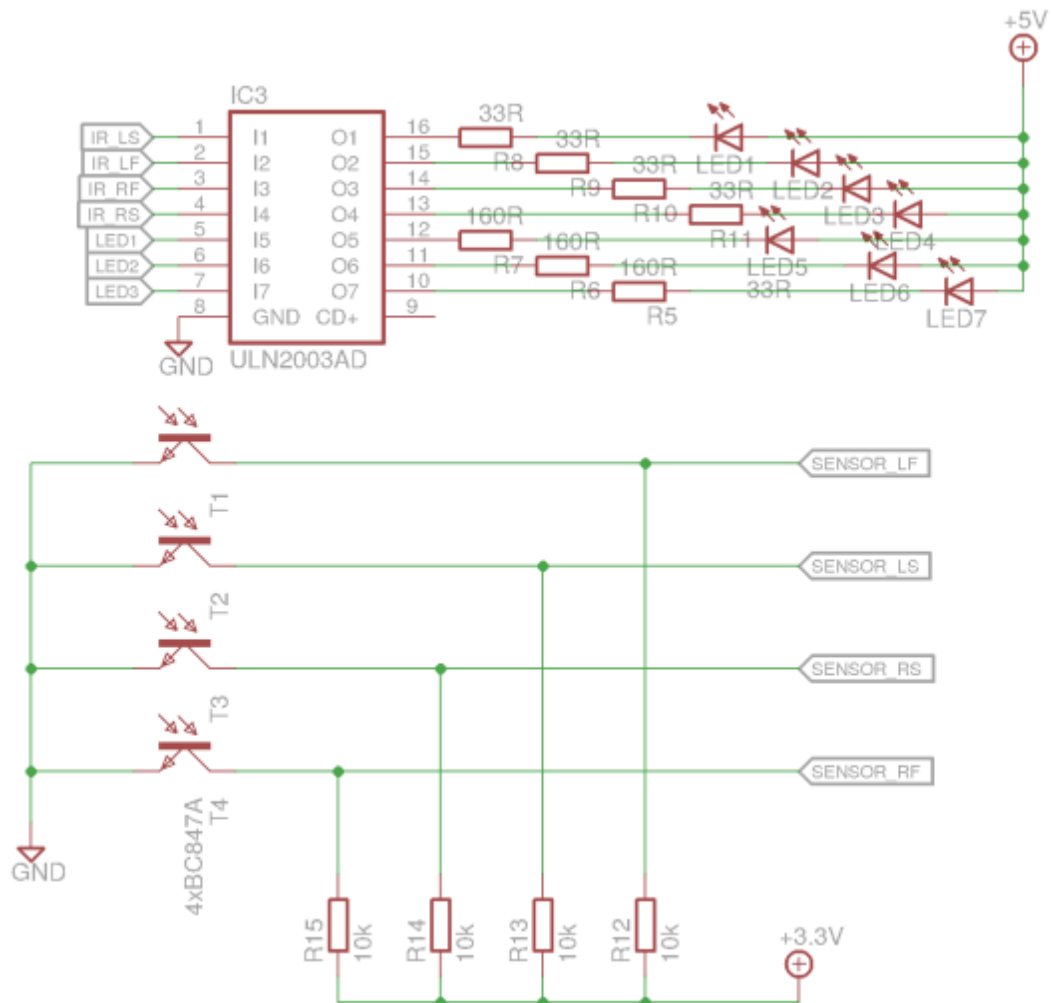


Рисунок 3.4 - Схема модуля вимірювання відстані

Таким чином, відбитий світловий сигнал призводить до появи струму бази і, як наслідок, до виникнення напруги між колектором і емітером. Вимірюючи цю напругу, можна визначити відстань від робота до перешкоди.

У конструкції використано чотири пари інфрачервоних діодів і фототранзисторів. Дві з них розташовані прямо перед роботом, тоді як інші встановлені під кутом 45°. Таке розміщення дозволяє не лише виявляти перешкоди попереду, але й фіксувати об'єкти, що знаходяться збоку від робота.

Схему розташування діодів і фототранзисторів на платі робота наведено на рисунку 3.5.

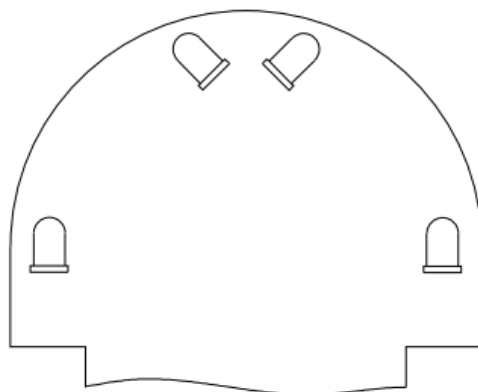


Рисунок 3.5 - Розміщення діодів і фототранзисторів на платі робота

Під час вибору інфрачервоних діодів і фототранзисторів необхідно враховувати, щоб обидва елементи працювали в однаковому діапазоні довжин хвиль. Інфрачервоний діод повинен мати якомога менший кут випромінювання, що забезпечує вузький і сфокусований світловий пучок. Водночас фототранзистор має характеризуватися широким кутом прийому, що підвищує ймовірність фіксації відбитого сигналу.

3.1.4 Модуль вимірювання кутової швидкості двигунів

Привід робота базується на двигунах постійного струму, керування якими здійснюється шляхом зміни напруги. У теорії швидкість обертання двигуна прямо пропорційна поданій напрузі. Проте на практиці двигуни можуть обертатися з дещо різною швидкістю, що призводить до відхилення траєкторії руху.

Для усунення цієї проблеми застосовується система керування зі зворотним зв'язком, яка дозволяє вимірювати реальну кутову швидкість і відповідно коригувати керуючі сигнали. З цією метою використано магнітні енкодери AS5040 виробництва компанії AMS. Схему підключення цього модуля наведено на рисунку 3.6.

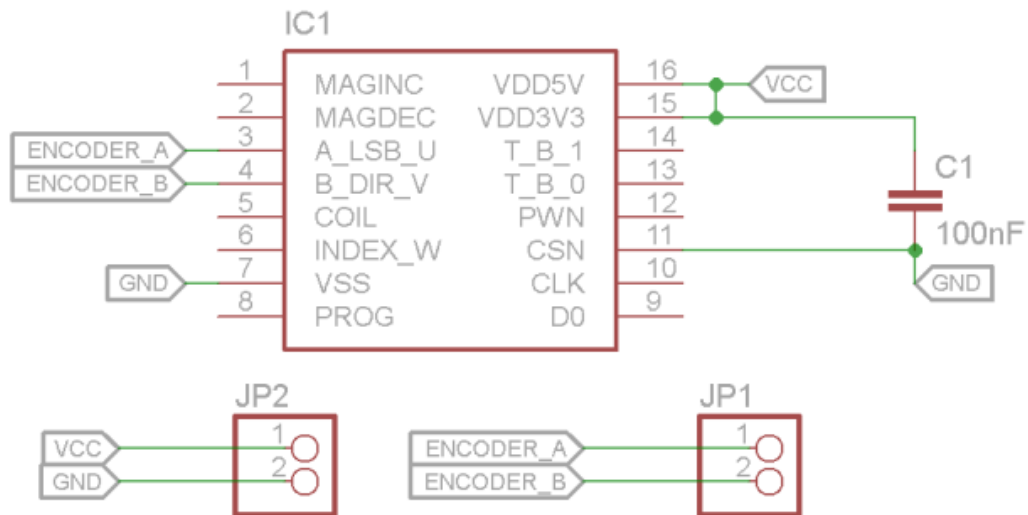


Рисунок 3.6 - Схема модуля вимірювання кутової швидкості двигунів

Даний пристрій відзначається компактними розмірами, що робить його одним із найменших магнітних датчиків обертання у своєму класі. Усередині розташовано інтегрований процесор разом із матрицею датчиків Холла.

Завдяки спеціальному алгоритму обробки сигналів визначається положення ліній магнітного поля відносно сенсорної структури, що дозволяє точно встановити кутове положення вала [23, 28].

Принципову схему мікросхеми AS5040 наведено на рисунку 3.7.

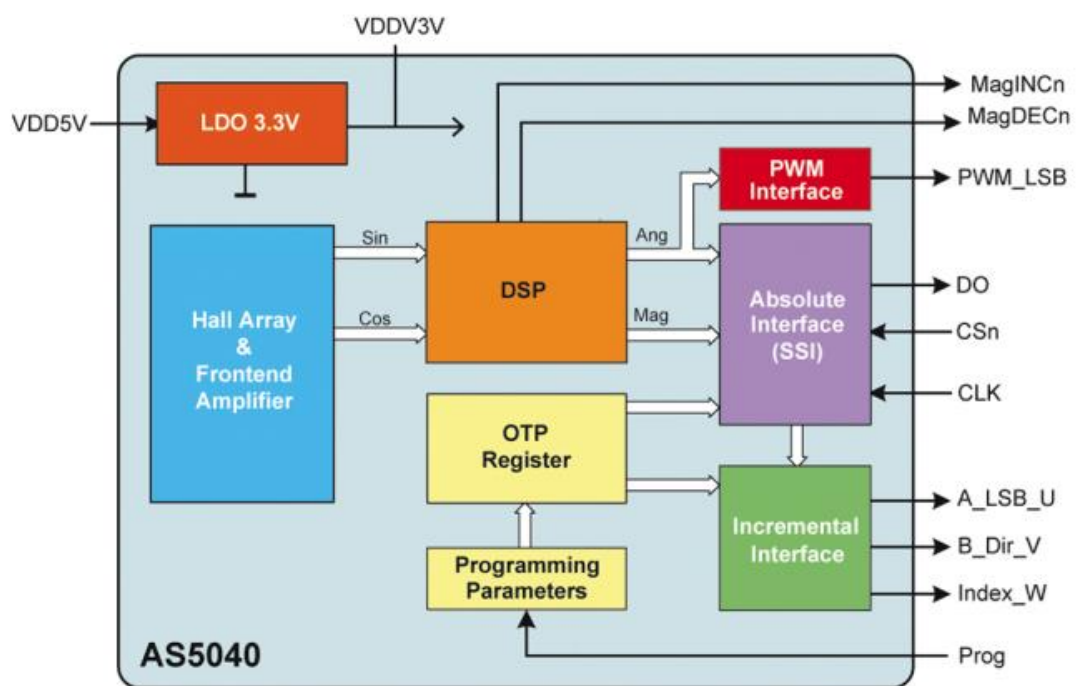


Рисунок 3.7 - Принципова схема мікросхеми AS5040 [29]

3.1.5 Модуль вимірювання кута обертання

Важливим елементом системи є вимірювання кута обертання, що дозволяє визначити орієнтацію робота в лабіринті. Для цього використовується одноосьовий аналоговий гіроскоп LY3200ALH, виготовлений за технологією MEMS. Схему підключення гіроскопа наведено на рисунку 3.8.

Під час роботи слід враховувати, що гіроскоп безпосередньо вимірює кутову швидкість. Для визначення кута повороту необхідно виконати інтегрування цього сигналу за часом. З цією метою застосовують методи чисельного інтегрування, зокрема метод прямокутників або метод трапецій.

Параметри гіроскопа LY3200ALH.

Гіроскоп LY3200ALH характеризується чутливістю приблизно 0,67 мВ/(°/с), що дозволяє точно вимірювати кутову швидкість. Діапазон вимірювання становить $\pm 2000^\circ/\text{с}$, що забезпечує можливість роботи навіть при швидких обертаннях робота. Сенсор має 10 виводів і формує аналоговий вихідний сигнал, який потребує подальшої обробки за допомогою аналого-цифрового перетворювача.

Живлення пристрою здійснюється в діапазоні напруг 2,7-3,6 В, що відповідає типовим умовам роботи сучасних мікроконтролерів. Гіроскоп виконаний у компактному корпусі типу LGA, що забезпечує малі розміри та зручність інтеграції в електронну плату робота.

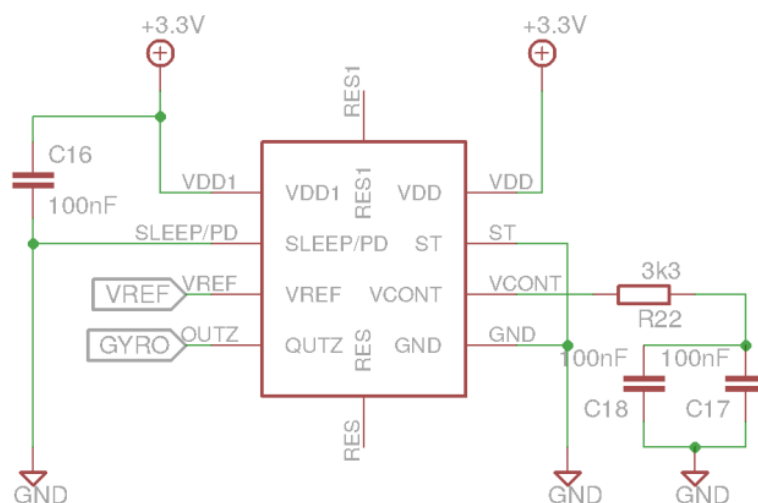


Рисунок 3.8 - Схема модуля вимірювання кута обертання

3.1.6 Модуль вимірювання рівня заряду акумулятора

Робот живиться від літій-полімерного акумулятора. Однією з важливих особливостей такого джерела живлення є те, що напруга на одній комірці не повинна знижуватися нижче допустимого рівня, оскільки це може призвести до її пошкодження.

Для контролю напруги використовується вимірювання за допомогою АЦП, вбудованого в мікроконтролер. Оскільки мікроконтролер може вимірювати напругу лише в діапазоні 0–3,3 В, застосовано дільник напруги, який знижує рівень сигналу до безпечного значення. Схему цього модуля наведено на рисунку 3.9.

Використання дільника напруги супроводжується втратами енергії, оскільки на резисторах розсіюється потужність у вигляді тепла. Ці втрати описуються рівнянням (3.3). Варто зазначити, що зі збільшенням опору резисторів втрати зменшуються.

$$P_{strat} = \frac{U^2}{R} \quad (3.3)$$

За умови, що вимірювана напруга становить 7,4 В, розрахункова потужність втрат дорівнює приблизно 10,5 мВт.

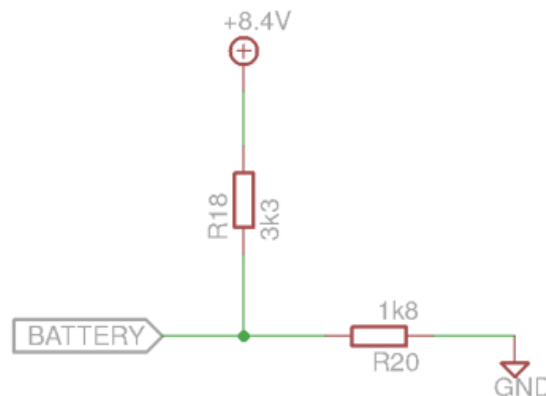


Рисунок 3.9 - Схема модуля вимірювання рівня заряду акумулятора

3.1.7 Модуль керування двигунами

До складу модуля входить двоканальний драйвер двигунів TB6612FNG. За допомогою цього пристрою можна керувати як напрямком

обертання, так і швидкістю двигунів. Такий тип керування реалізується за принципом так званого Н-моста.

Назва «Н-міст» походить від графічної схожості схеми з літерою «Н». Принцип його роботи полягає у зміні полярності напруги, що подається на двигун.

Схема складається з чотирьох ключів (механічних або напівпровідникових). Коли замкнені ключі S1 і S4, а S2 і S3 розімкнені, на двигун подається напруга, і він обертається в одному напрямку. Якщо ж замкнуті S2 і S3, а S1 і S4 розімкнуті, напрямок струму зміниться, і двигун почне обертатися у протилежному напрямку. Цей принцип ілюструє рисунок 3.10.

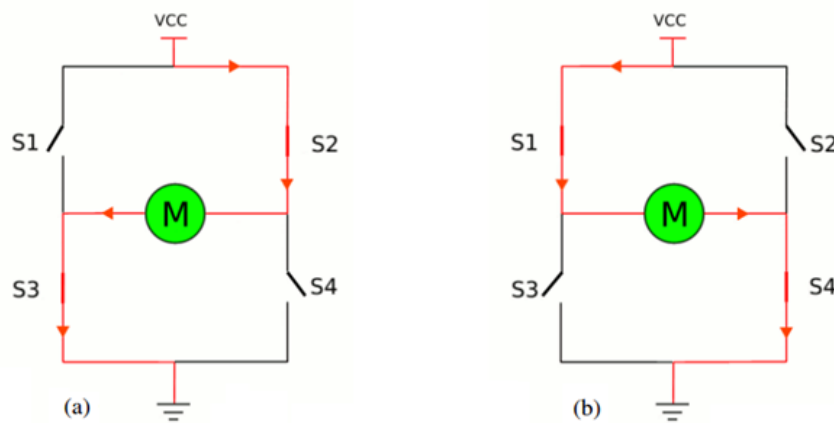


Рисунок 3.10 - Схематичний приклад роботи Н-моста:

а - обертання двигуна проти годинникової стрілки; б - обертання двигуна за годинниковою стрілкою

Мікросхема TB6612FNG реалізує подвійний Н-міст, що дозволяє керувати двома двигунами одночасно. Вона виконана в компактному корпусі типу SSOP-24 та забезпечує безперервний вихідний струм до 1 А на канал.

Мікросхема забезпечує максимальну частоту сигналу PWM до 100 кГц. За допомогою цього драйвера можна реалізувати п'ять режимів роботи двигуна, які визначаються логічними сигналами на входах керування.

Якщо на входи подається комбінація сигналів, при якій активується один напрямок обертання, двигун обертається назад зі швидкістю,

пропорційною коефіцієнту заповнення PWM. У протилежному випадку, при зміні логічних рівнів, двигун обертається вперед, також зі швидкістю, що залежить від PWM.

У разі, коли обидва керуючі сигнали встановлені в однаковий стан (0 або 1), реалізується режим плавного гальмування (soft-stop), при якому двигун поступово зупиняється. Якщо ж подається відповідна комбінація сигналів із нульовим PWM, двигун переходить у режим різкого гальмування (hard-stop), що забезпечує швидку зупинку.

Модуль керування двигунами підключено до основного модуля керування таким чином, щоб можна було задавати логічні рівні 0 і 1, а також формувати сигнал PWM за допомогою мікроконтролера. Схему цього модуля наведено на рисунку 3.11.

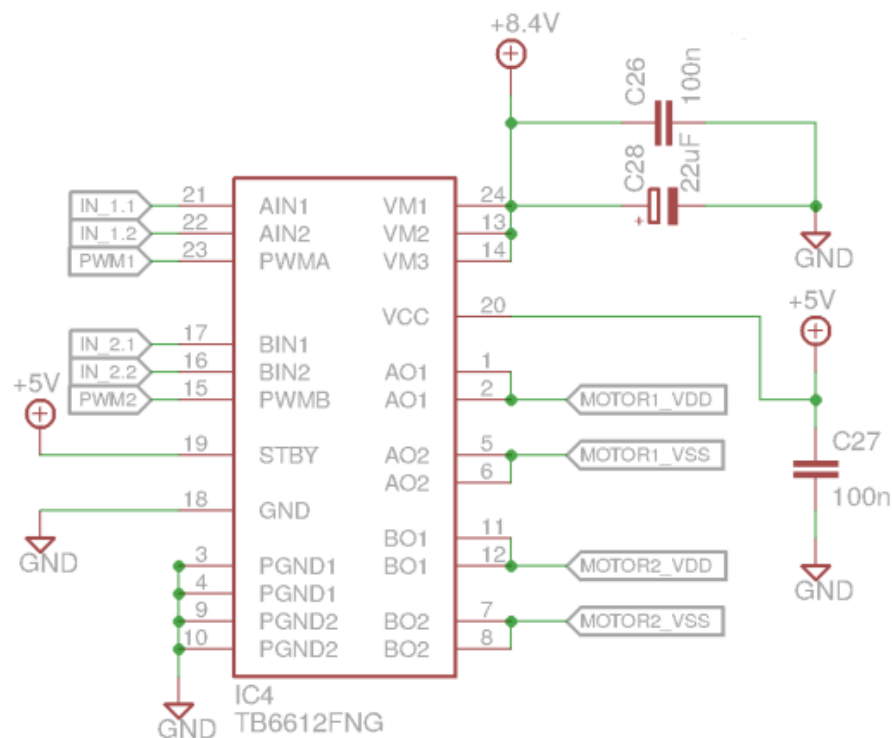


Рисунок 3.11 - Схема модуля керування двигунами

3.1.8 Модуль взаємодії з користувачем

Цей модуль призначений для обміну інформацією з користувачем: він сигналізує про різні стани роботи робота та передає дані з окремих сенсорів.

До його складу входять два кнопкові перемикачі, звуковий сигналізатор (зумер), три світлодіоди, а також виведений інтерфейс UART, до якого підключається Bluetooth-модуль для бездротового зв'язку. Схему модуля наведено на рисунку 3.12.

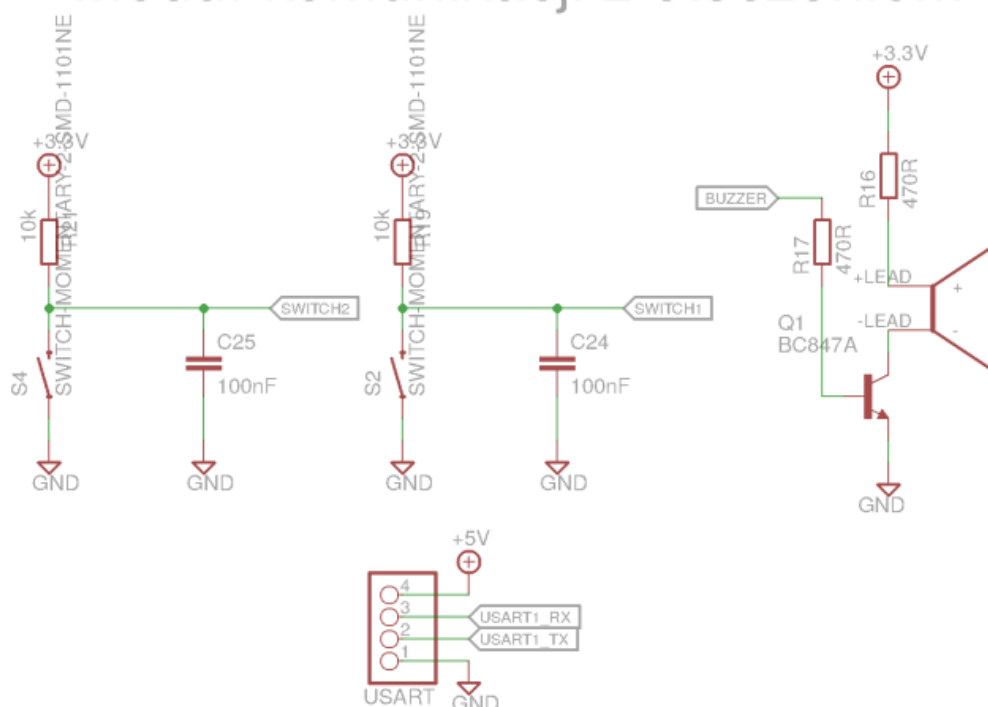


Рисунок 3.12 - Схема модуля взаємодії з користувачем

Кнопки використовуються для запуску різних режимів роботи робота. Світлодіоди виконують індикаційну функцію, наприклад, відображають стан системи або рівень заряду акумулятора.

Зумер застосовується для звукового супроводу, зокрема для відтворення сигналів після досягнення фінішу або проходження певної ділянки лабіринту.

Інтерфейс UART використовується для передачі даних на персональний комп'ютер через Bluetooth-з'єднання. Отримані дані можуть відображатися у вигляді панелі керування (dashboard).

Bluetooth-модуль, зокрема BTM222, має такі характеристики: напруга живлення в діапазоні 3,0–3,6 В, низьке енергоспоживання з підтримкою режиму сну, потужність передавача до 18 dBm (клас 1), радіус дії до 100 м,

Проект Bluetooth-модуля наведено на рисунках 3.13 та 3.14.

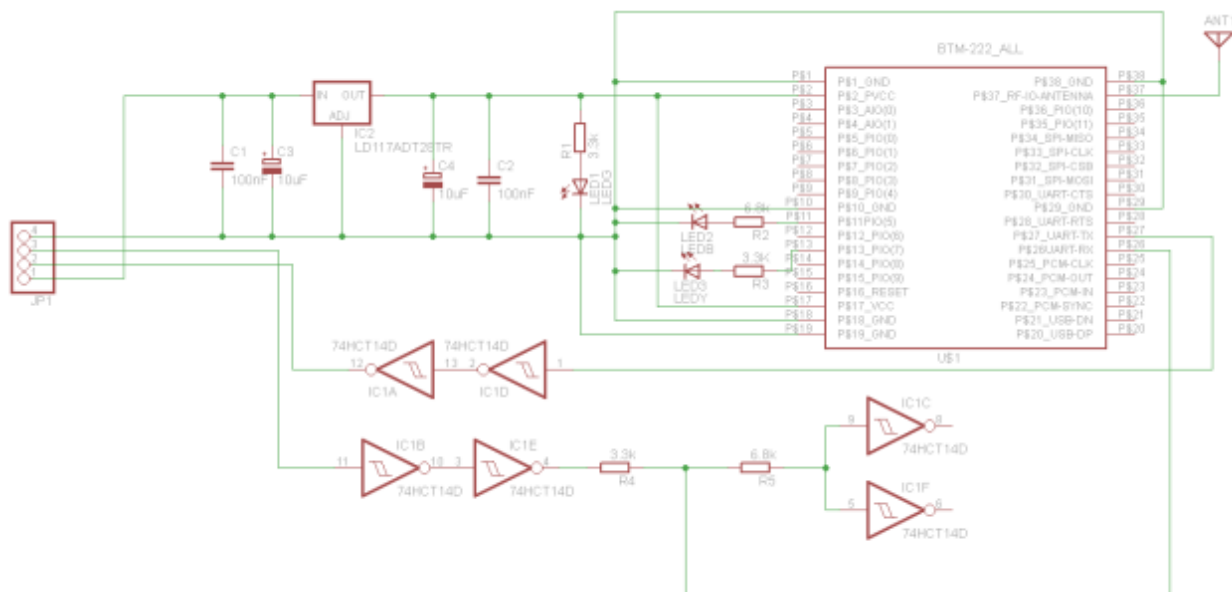


Рисунок 3.13 - Схема Bluetooth-модуля

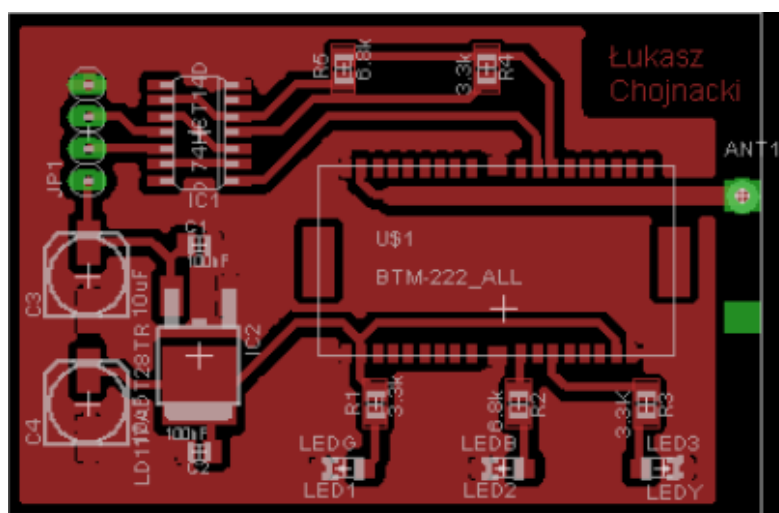


Рисунок 3.14 - Проект Bluetooth-модуля

3.1.9 Проєкт друкованої плати робота

Підключення елементів робота до мікроконтролера організовано відповідно до функціональних модулів.

У модулі вимірювання відстані керування інфрачервоними діодами здійснюється через виводи PC2, PC3, PC4 та PC5, які працюють як цифрові виходи та відповідають за відповідно лівий передній, лівий діагональний, правий діагональний і правий передній датчики. Сигнали з фототранзисторів зчитуються через входи PA0–PA3, що підключені до АЦП і відповідають тим самим напрямкам.

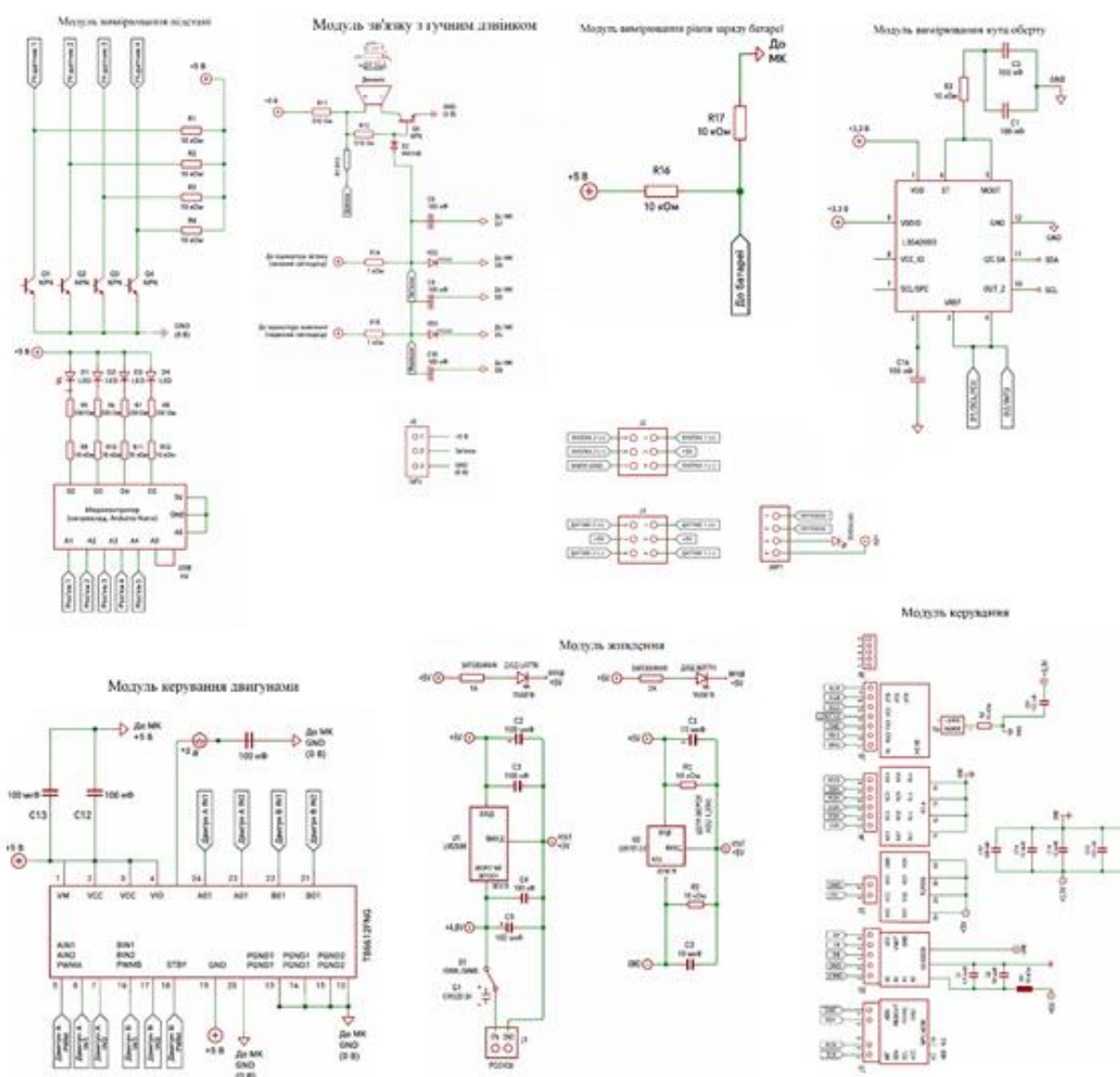


Рисунок 3.15 - Схема друкованої плати робота

У модулі вимірювання кутової швидкості двигунів використовуються таймери для обробки сигналів енкодерів. Виводи PB4 і PB5 (таймер TIM3) застосовуються для лівого двигуна, тоді як PB6 і PB7 (таймер TIM4) — для правого.

Для визначення кута обертання робота гіроскоп підключено до входу PA5 (ADC IN5), а опорна напруга - до PA6 (ADC IN6). Вимірювання напруги акумулятора здійснюється через вивід PA4 (ADC IN4), що належить до модуля контролю рівня заряду.

У модулі керування двигунами сигнали керування подаються через виводи PB9, PB11, PB10 та PB12, які задають напрямок обертання, тоді як сигнали PWM формуються через PB14 (TIM1 CH2N) і PB13 (TIM1 CH1N) для відповідних двигунів. Модуль взаємодії з користувачем використовує виводи PC1, PC0 та PB0 для керування світлодіодами, а кнопки підключені до PC11 і PC12 як цифрові входи. Зумер керується через PB3 (TIM2 CH2). Для обміну даними через UART застосовуються виводи PA9 (TX) та PA10 (RX), які підключені до інтерфейсу USART1.

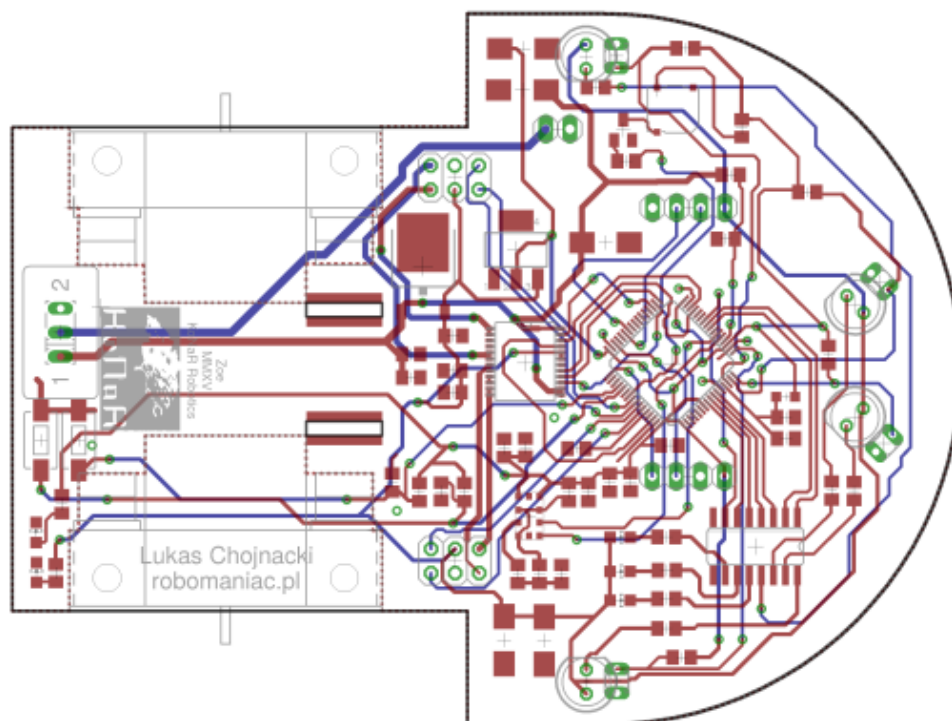


Рисунок 3.16 - Проект друкованої плати (PCB) робота

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3.1.10 Проєкт алгоритму керування роботом

Робот повинен постійно отримувати інформацію про навколишнє середовище, оперативно її обробляти та на основі цього виконувати відповідні дії. Такий підхід забезпечує автономну та ефективну навігацію в лабіринті. Робот реалізує всі етапи, представлені на рисунку 3.17. На основі даних, отриманих від сенсорів, система керування виконує комплекс взаємопов'язаних завдань, спрямованих на автономну навігацію в лабіринті.

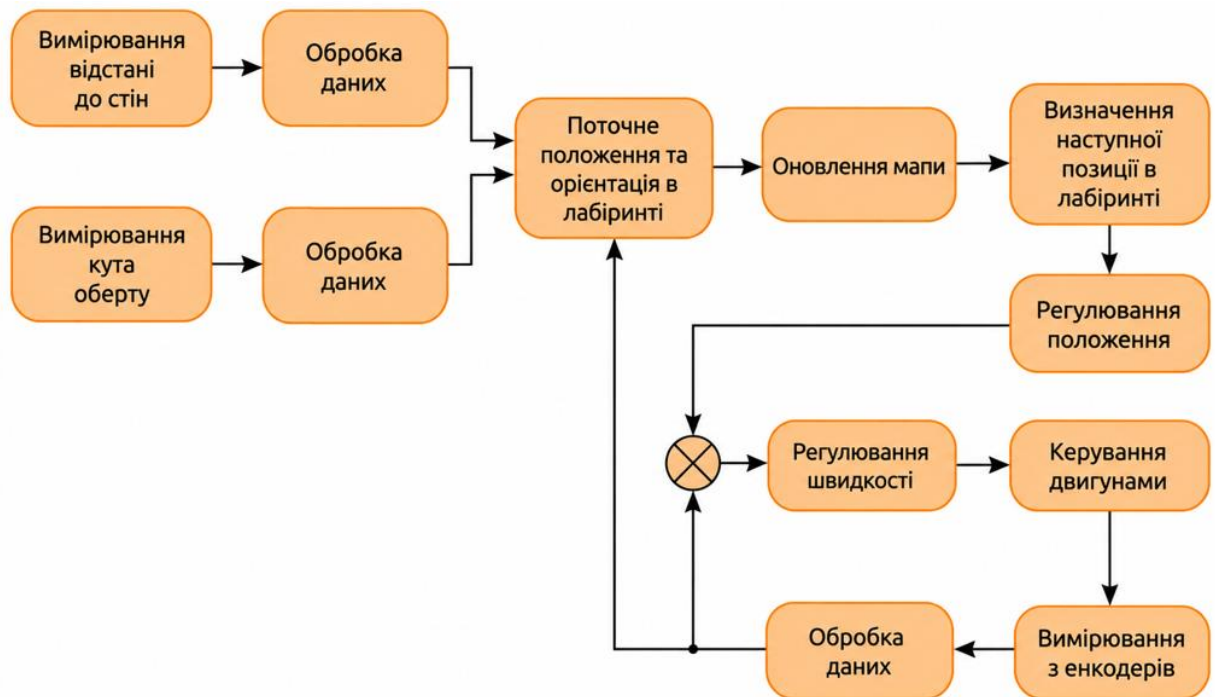


Рисунок 3.17 - Структурна схема системи керування роботою робота

Передусім відбувається обробка інформації про відстань до стін. Вимірювальний модуль передає аналогові сигнали до модуля керування, де вони аналізуються для визначення наявності та розташування стін у безпосередньому оточенні робота.

Далі здійснюється обробка даних про кут обертання. Оскільки гіроскоп вимірює кутову швидкість, отриманий сигнал інтегрується чисельно, що дозволяє визначити поточну орієнтацію робота в лабіринті. Паралельно аналізуються сигнали з енкодерів. На основі квадратурних імпульсів визначається як швидкість руху, так і пройдена відстань.

Об'єднання даних із різних сенсорів дає змогу визначити поточне положення робота в конкретній клітинці лабіринту, його орієнтацію, а також розташування стін. На основі цієї інформації відбувається оновлення карти лабіринту, яка формується в пам'яті робота з урахуванням відомих обмежень щодо розміщення перешкод.

Використовуючи сформовану карту, система визначає оптимальний маршрут від старту до цілі. Для цього застосовуються алгоритми пошуку найкоротшого шляху в графі. Під час руху здійснюється постійна корекція положення робота. Фактичне положення порівнюється із заданим, і на основі цього вносяться необхідні коригування.

Крім того, відбувається регулювання швидкості руху. Враховуються поточне положення, запланована траєкторія, максимальна швидкість, допустиме прискорення та час, необхідний для гальмування.

Завершальним етапом є керування двигунами. Воно реалізується через модуль керування двигунами шляхом зміни ширини імпульсів PWM, які подаються на H-міст, що забезпечує необхідну швидкість і напрямок руху робота.

3.2 Дослідження точності вимірювання відстані

Для оцінки точності роботи датчиків відстані було проведено експериментальне моделювання, метою якого є встановлення залежності між реальною відстанню до об'єкта та вимірним сигналом сенсора.

Дослідження виконувалося шляхом розміщення датчика на різних відстанях від плоскої поверхні в діапазоні від 50 мм до 300 мм. На кожній відстані проводилося 5 вимірювань, після чого визначалося середнє значення. Результати моделювання наведено в таблиці 3.1.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 3.1 – Результати моделювання оцінки точності роботи датчиків відстані

Реальна відстань, мм	Виміряна відстань, мм	Похибка, мм
50	52	2
100	104	4
150	157	7
200	210	10
250	263	13
300	318	18

Залежність між реальною та виміряною відстанню представлена на рисунку 3.18. Із графіка видно, що зі збільшенням відстані зростає похибка вимірювання.

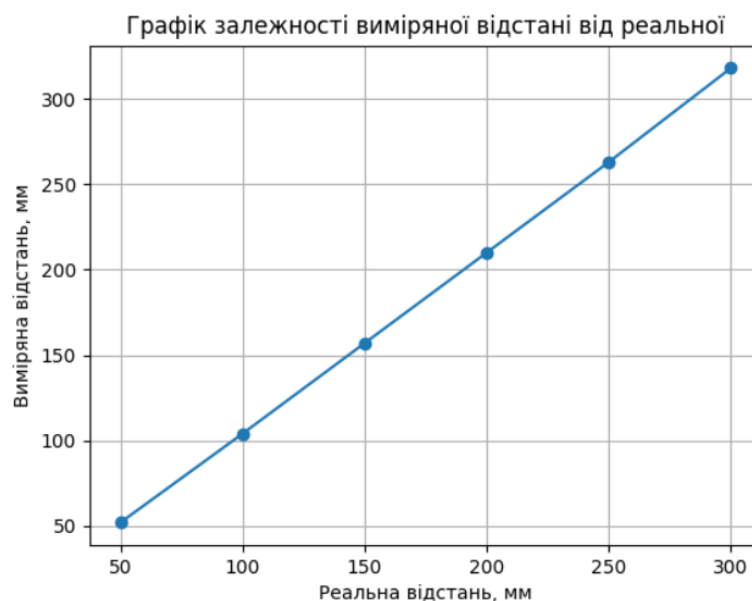


Рисунок 3.18 – Залежність виміряної відстані від реальної

Аналіз отриманих результатів показує, що похибка вимірювання зростає зі збільшенням відстані. Це пояснюється нелінійною характеристикою сенсора та зменшенням інтенсивності відбитого сигналу.

Таким чином, для підвищення точності визначення положення необхідно виконувати калібрування датчиків та використовувати їх у межах робочого діапазону.

3.3 Дослідження переміщення робота та система автоматичного регулювання

Суть моделювання полягає в тому, що кожна клітинка лабіринту має фіксований розмір, а робот повинен проїхати задану кількість клітинок. За умови коректної роботи енкодерів це завдання має виконуватися з високою точністю.

Як показано на **рисунку 3.19**, робот розміщується в одній із клітинок лабіринту, після чого йому задається рух на певну кількість клітинок вперед.

Для досягнення необхідної точності потрібно реалізувати систему автоматичного регулювання. З цією метою використовується регулятор типу PID. Оскільки система керування працює зі зворотним зв'язком, необхідно мати математичну модель об'єкта керування — у даному випадку двигунів.

Для отримання цієї моделі проводиться процедура ідентифікації, яка дозволяє визначити передавальну функцію системи. У наступних підрозділах буде розглянуто методику ідентифікації та використання отриманої моделі для проєктування системи автоматичного керування.

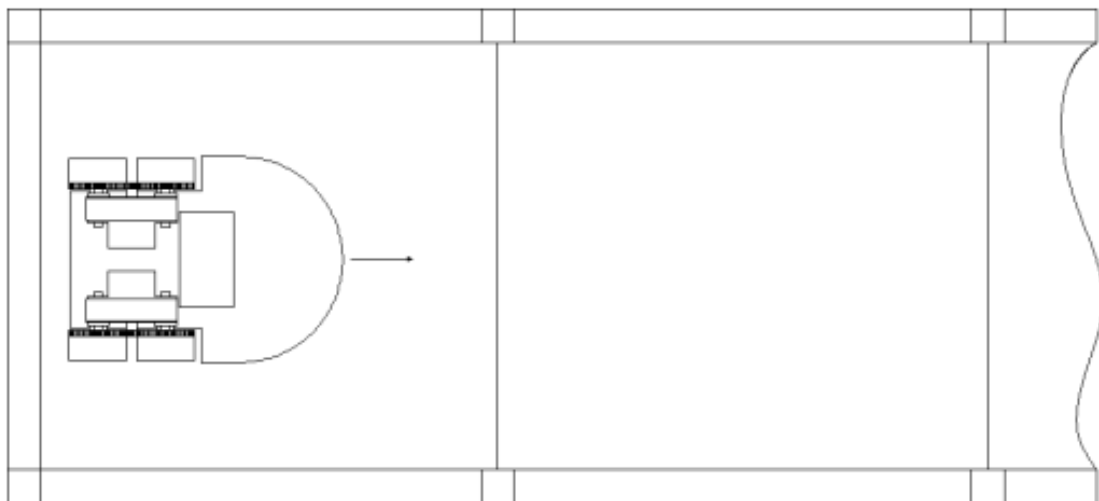


Рисунок 3.19 - Схема переміщення робота

Результати експерименту наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати моделювання оцінки точності визначення переміщення

Задана відстань, мм	Виміряна енкодером, мм	Фактична відстань, мм	Похибка, мм
200	205	198	7
400	410	395	15
600	620	590	30
800	835	790	45
1000	1050	980	70

Як видно з рисунка 3.20, спостерігається відхилення фактичного переміщення від заданого, що пояснюється накопиченням похибок одометрії.

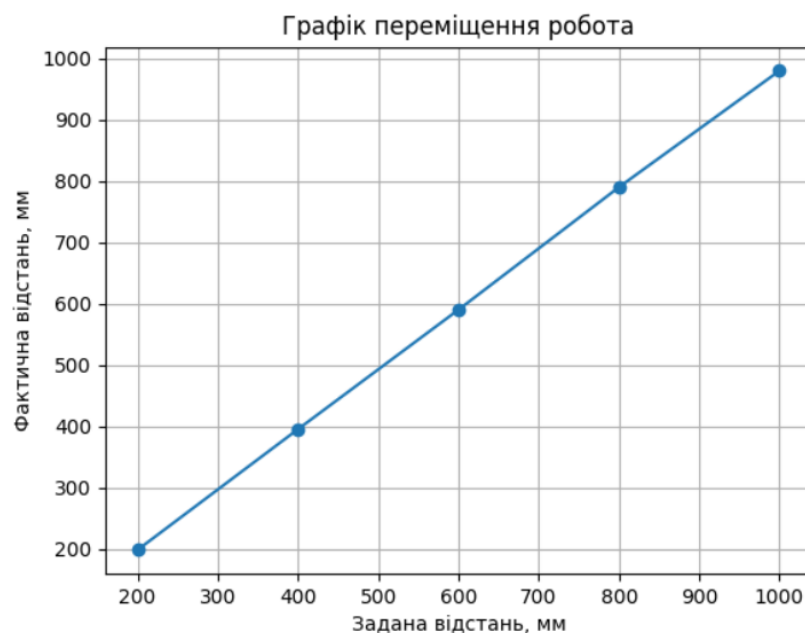


Рисунок 3.20 – Залежність фактичного переміщення робота від заданого

З отриманих даних видно, що похибка збільшується зі збільшенням пройденої відстані. Основною причиною є накопичення похибок одометрії, викликаних ковзанням коліс та нерівномірністю обертання двигунів.

Система автоматичного керування зі зворотним зв'язком (рисунок 3.21) дозволяє керувати об'єктом таким чином, щоб досягти заданого значення. У

даному випадку основним параметром є пройдена відстань, яка визначається кількістю імпульсів, отриманих з енкодера.



Рисунок 3.21 - Схема системи автоматичного регулювання

На вхід системи подається задана відстань, яку робот повинен пройти. У якості зворотного зв'язку використовується інформація з енкодерів, що дозволяє визначити фактично пройдений шлях.

Модель двигунів визначається шляхом ідентифікації та подається у вигляді передавальної функції в області Лапласа. Параметри PID-регулятора підбираються за допомогою середовища MATLAB, що дозволяє оптимізувати роботу системи керування.

Середовище MATLAB дозволяє визначити передавальну функцію об'єкта. Одним із поширених методів є ідентифікація на основі реакції системи на одиничний стрибок.

Для цього проводяться експериментальні дослідження. Оскільки керування здійснюється за відстанню, необхідно отримати перехідну характеристику у відповідь на зміну кількості імпульсів енкодера. Зокрема, на вхід системи подається стрибкоподібний сигнал, наприклад у діапазоні від 0 до 10000 імпульсів, після чого вимірюється фактично пройдена відстань, визначена за даними енкодерів.

На основі отриманої перехідної характеристики за допомогою інструментів MATLAB визначається передавальна функція системи. Отримана модель використовується для проєктування системи автоматичного керування та підбору оптимальних параметрів PID-регулятора.

3.4 Дослідження орієнтації робота

Для дослідження точності визначення орієнтації робота було проведено експеримент, у якому робот здійснював поворот на заданий кут.

Фактичний кут повороту визначався за допомогою зовнішнього вимірювання. Результати наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати моделювання оцінки точності визначення кута повороту

Заданий кут, °	Виміряний гіроскопом, °	Фактичний кут, °	Похибка, °
45	47	46	1
90	94	92	2
135	142	138	4
180	190	185	5

З рисунка 3.22 видно, що похибка визначення кута зростає зі збільшенням кута повороту, що пов'язано з дрейфом гіроскопа.

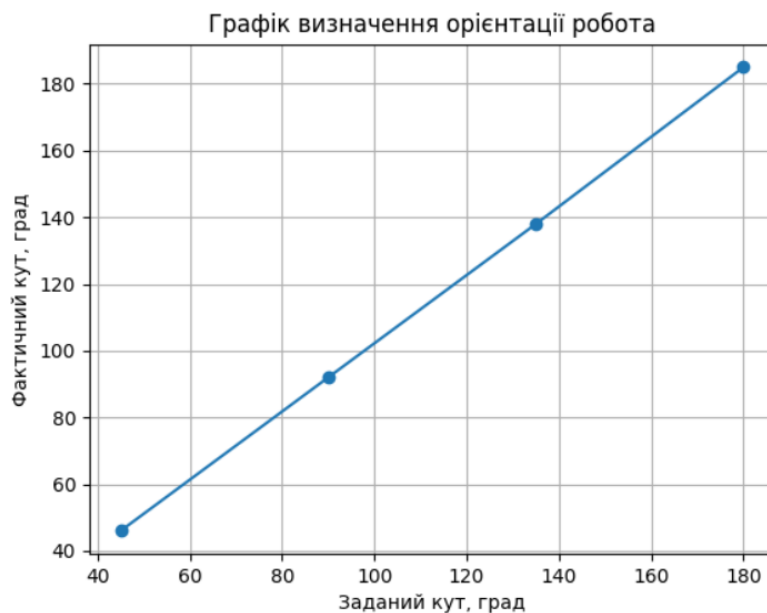


Рисунок 3.22 – Залежність фактичного кута повороту від заданого

Результати показують, що при збільшенні часу роботи гіроскопа спостерігається накопичення похибки. Це пов'язано з явищем дрейфу, що є характерною особливістю інерціальних сенсорів.

3.5 Аналіз сумарної похибки системи

Для оцінки ефективності комбінованої системи було проведено порівняння результатів визначення положення: лише за енкадерами; з використанням комбінованого підходу. Результати наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати моделювання сумарної похибки

Метод	Похибка координат, мм
Енкодери	70
Енкодери + гіроскоп	45
Комбінований (з датчиками відстані)	20

На рисунку 3.23 представлено узагальнений графік похибок, отриманих під час дослідження різних складових системи визначення положення мобільного робота.

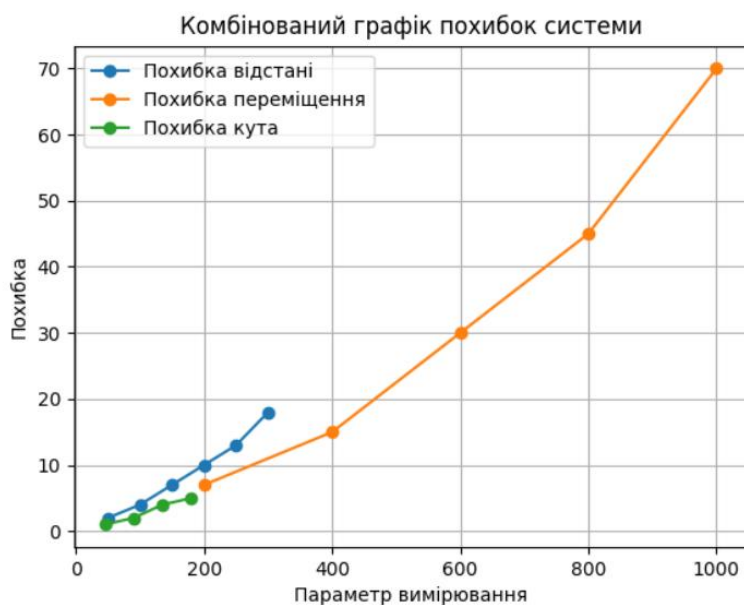


Рисунок 3.23 – Узагальнений графік похибок системи визначення положення мобільного робота

Аналіз графіка показує, що найбільшу похибку має одометричний метод визначення переміщення, тоді як похибка визначення кута та відстані є меншою. Це підтверджує необхідність використання комбінованого підходу для підвищення точності позиціонування.

Аналіз показує, що використання сенсорної фузії дозволяє значно зменшити похибку визначення положення.

У результаті проведеного моделювання встановлено, що кожен із сенсорів має власні джерела похибок, які суттєво впливають на точність визначення положення мобільного робота.

Показано, що: похибка датчиків відстані зростає зі збільшенням дистанції; одометрія характеризується накопиченням похибки; гіроскоп має дрейф.

Використання комбінованої системи дозволяє зменшити похибку більш ніж у три рази, що підтверджує ефективність застосованого підходу.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті виконання даної роботи розв'язано задачу розробки автоматизованої системи визначення положення мобільного робота.

У процесі виконання роботи проведено аналіз сучасних методів визначення положення мобільних роботів, зокрема одометричних, інерціальних та сенсорних. Встановлено, що кожен із зазначених методів має обмеження, пов'язані з наявністю похибок вимірювання та впливом зовнішніх факторів, що ускладнює їх самостійне застосування.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність використання комбінованого підходу до визначення положення мобільного робота, який передбачає інтеграцію даних від різних сенсорів. Запропоновано структуру автоматизованої системи визначення положення, що включає енкодери, гіроскоп та датчики відстані, а також обчислювальний модуль для обробки інформації.

У роботі розроблено алгоритм визначення положення мобільного робота, який базується на поєднанні одометричних та інерціальних даних із подальшою корекцією за допомогою сенсорів відстані. Запропонований алгоритм забезпечує підвищення точності визначення координат та орієнтації робота в процесі його руху.

Проведені експериментальні дослідження дозволили оцінити точність роботи окремих сенсорів та системи в цілому. Встановлено, що похибка вимірювання відстані зростає зі збільшенням дистанції, одометричний метод характеризується накопиченням похибки при збільшенні пройденого шляху, а гіроскоп має дрейф, що призводить до похибки визначення кута орієнтації.

Показано, що використання комбінованої системи визначення положення дозволяє значно зменшити сумарну похибку позиціонування порівняно з використанням окремих сенсорів. Це підтверджує ефективність застосування методів сенсорної фузії у задачах навігації мобільних роботів.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої системи при створенні мобільних роботів для вирішення задач автономної навігації в обмежених та невизначених середовищах.

Таким чином, поставлена мета роботи досягнута, а визначені задачі вирішені у повному обсязі.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сівухін Д.В. Основи робототехніки та автоматизації. Київ: Техніка, 2018. 364 с.
2. Siegwart R., Nourbakhsh I.R., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. 2nd ed. MIT Press, 2011. 472 p.
3. Siegwart R. Introduction to Autonomous Mobile Robots / Roland Siegwart, Illah R. Nourbakhsh, Davide Scaramuzza. – 2nd ed. – Cambridge : MIT Press, 2011. – 472 p.
4. Ганенко Л. Д., Жебка В. В. Аналітичний огляд питань навігації мобільних роботів в закритих приміщеннях // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2023. – № 3. – С. 80–87. DOI: 10.31673/2412-4338.2023.038087.
5. Петренко Д. В., Протасов А. Г. Огляд сучасних технологій підвищення автономності мобільних колісних роботів // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2024. – Т. 35 (74), № 2. – С. 122–128.
6. Лі Ю., Ван Т. Алгоритми та системи автономної навігації мобільних роботів. Харків: Видавництво Харківського національного університету, 2019. 284 с.
7. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005. 672 p.
8. Колендовська М. М. Методи автономної навігації групи мобільних роботів / М. М. Колендовська // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2023. – № 1. – С. 45–52.
9. Рудик А. В. Методи оцінки просторового положення об'єктів / А. В. Рудик // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2016): матеріали 9-ої міжнародної науково-практичної конференції. – Київ : НАУ, 2016. – С. 31–33.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

10. Kok M. Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation / M. Kok, J. D. Hol, T. B. Schön // Foundations and Trends in Signal Processing. – 2017. – Vol. 11, № 1–2. – P. 1–153.

11. Hartley R. Legged Robot State-Estimation Through Combined Forward Kinematic and Preintegrated Contact Factors / R. Hartley, J. Mangelson, L. Gan та ін. // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2018. – P. 1–8.

12. Luzhau Le, Документація робота Green Giant V4.1 Lite, Електронний ренсурс. – Режим доступу: <http://www.greenye.net/Pages/Micromouse/Micromouse2013-2014.htm>.

13. Kato Yuusuke, Документація робота Terta, Електронний ренсурс. – Режим доступу: <http://seesaawiki.jp/w/roboLabo/d/Tetra>

14. Ng Beng Kiat, Документація робота Min7. Електронний ренсурс. – Режим доступу: <https://sites.google.com/site/ngbengkia/Downhome/Topic1/min7>

15. Marcin Niestrój, Документація робота Rapid, Електронний ренсурс. – Режим доступу: <http://www.forbot.pl/forum/topics7/micromouse-rapid-vt8164.htm>

16. Adrian Muzyka, Документація робота Vampire2. Електронний ренсурс. – Режим доступу: <http://www.forbot.pl/forum/topics7/micromouse-vampire2-vt8531.htm>

17. Borenstein J. Mobile Robot Positioning: Sensors and Techniques / J. Borenstein, H. Everett, L. Feng. – Michigan : University of Michigan, 1996. – 139p.

18. Masalskyi V. Hybrid Mode Sensor Fusion for Accurate Robot Positioning / V. Masalskyi // Sensors. – 2025. – Vol. 25, № 10. – P. 3008.

19. Абделькефі, А., та Маареф, Х. (2017). Проектування та управління автономним мобільним роботом з використанням одометрії та сенсорного злиття. Вісник управління, автоматики та електротехніки, 28(1), 36-49/

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

20. Чен, Л., Чжао, Ж., та Чжу, Г. (2018). Планування траєкторії мобільного робота на основі одометрії та сенсорного злиття. Вісник фізики: Збірник наукових праць, 1059(1), 012101/

21. Stibinger P. Mobile Manipulator for Autonomous Localization, Grasping and Precise Placement of Construction Material in a Semi-structured Environment / P. Stibinger, G. Broughton, F. Majer та ін. // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2020. – Vol. 6, № 2. – P. 2595–2602.

22. Hoang T. T. Development of a Multi-Sensor Perceptual System for Mobile Robot and EKF-based Localization / T. T. Hoang, P. M. Duong, N. T. T. Van, D. A. Viet, T. Q. Vinh // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2016. – Vol. 13, № 6. – P. 1–12.

23. Матвієнко С. Урок 14.18 по STM32: Таймери – енкодер (encoder) // ITMaster. Електронний репсурс. – Режим доступу: https://www.itmaster.biz.ua/electronics/stm32/stm32-encoder.html?utm_source=chatgpt.com

24. Трет'як А. В., Кльон А. М. Основи робототехніки : навчальний посібник / А. В. Трет'як, А. М. Кльон. – Полтава : Полтавська політехніка, 2024. – 135 с.

25. Руденок С. І., Ковальов О. В. Система управління роботом для автоматизованого моніторингу приміщень на базі STM32 // Матеріали конференції Харківського національного університету радіоелектроніки. – 2021. – С. 1–4.

26. Пащенко В. І., Горбачов О. В. Мікроконтролери і сенсорні системи. —К.: Ліра-К, 2020. — 320 с.

27. Сташко П.А., Коломієць Д.О. Робототехніка та сенсорні системи. —Київ:Наука і освіта, 2021.

28. Edgar Ostrowski, Jan Kędzierski, Магнітний енкодер AS5040. Електронний репсурс. – Режим доступу: <http://lirec.iar.pwr.edu.pl/~konarch/download/sensory/enkoder.pdf>

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

29. Вебсайт компанії ASM. Електронний ресурс. – Режим доступу:
<https://ams.com>
30. Бойко В. І., Кулик М. С. Основи метрології та вимірювальної техніки: навч. посіб. – Київ : Вища школа, 2012. – 312 с.
31. Bentley J.P. Principles of Measurement Systems / J.P. Bentley. – 4th ed. – Harlow : Pearson Education, 2005. – 604 p.
32. Кулик В. М., Жуков І. В. Теорія автоматичного керування : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 250 с.
33. Ogata K. Modern Control Engineering / K. Ogata. – 5th ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2010. – 894 p.
34. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems / R. C. Dorf, R. H. Bishop. – 13th ed. – Boston : Pearson, 2016. – 1042 p.

					ДП.АКІТ. 10659690.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		