Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехнікі та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розроблення системи автоматизації керування мобільною роботизованою платформою з використанням датчиків відстані
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТСІ-22-1
Данило КАНЦЕДАЛ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доцент Рауф АЛЛАХВЕРАНОВ
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАРБІ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Я, Канцедал Данило Олегович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію та підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і неодержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«02» липня 2026 р. _____ Данило КАНЦЕДАЛ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехнікі та безпекової інженерії

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
"____" _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Канцедалу Данилі Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматизації керування мобільною роботизованою платформою з використанням датчиків відстані
затверджена наказом по університету від "04" червня 2026 р. №473 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до ЕК 17 липня 2026 р.
3. Вхідні дані до роботи 3.1 Автоматизована система керування мобільною роботизованою платформою; 3.2 Технічні характеристики мобільної роботизованої платформи; 3.3 Характеристики мікроконтролера ESP32; 3.4 Технічні характеристики датчиків відстані; 3.5 Нормативно-технічна документація з автоматизації керування.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі 4.1 Аналіз об'єкта та існуючих рішень автоматизованих систем керування;
4.2 Структурна та функціональна схема автоматизованої системи керування;
4.3 Апаратна та програмна архітектура автоматизованої системи керування;
4.4 Алгоритм функціонування та програмне забезпечення системи;
4.5 Інтерфейс оператора автоматизованої системи керування;
4.6 Тестування та ефективність автоматизованої системи керування;
4.7 Заходи з охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Демонстраційний матеріал представлений у форматі PowerPoint (*.ppt) – 24 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області та постановка		
	задачі	27.04.26 – 08.05.26	виконано
2	Проєктування автоматизованої системи		
	керування мобільною роботизованою		
	платформою	09.05.26 – 29.05.26	виконано
3	Реалізація автоматизованої системи		
	керування мобільною роботизованою		
	платформою	30.05.26 – 20.06.26	виконано
4	Охорона праці	21.06.26 – 30.06.26	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	01.07.26 – 04.07.26	виконано
6	Подання роботи на перевірку		
	Інтернет-системою StrikePlagiarism	05.07.26 – 08.07.26	виконано
7	Подання роботи на рецензію	09.07.26 – 12.07.26	виконано
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	13.05.26 – 16.07.26	виконано
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	17.07.26	виконано

Дата видачі завдання " 27 " квітня 2026 р.

Здобувач _____ Данило КАНЦЕДАЛ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ доцент Рауф АЛЛАХВЕРАНОВ
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 77 с., 11 табл., 14 рис., 4 дод., 29 джерел.

МОБІЛЬНА РОБОТИЗОВАНА ПЛАТФОРМА, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, ДАТЧИКИ ВІДСТАНІ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, НАДІЙНІСТЬ, УНИКНЕННЯ ПЕРЕШКОД, МІКРОКОНТРОЛЕР.

Мета роботи – підвищення надійності функціонування мобільної роботизованої платформи в реальних умовах експлуатації.

Об’єкт розробки – процес автоматизованого керування рухом мобільної роботизованої платформи.

Предмет розробки – методи та засоби побудови автоматизованої системи керування мобільною роботизованою платформою з використанням датчиків відстані.

У кваліфікаційної роботі розглянуто розроблення автоматизованої системи керування мобільною роботизованою платформою з метою підвищення надійності її функціонування в реальних умовах експлуатації. Запропоновано структуру системи, алгоритм керування та методи обробки даних датчиків відстані. Проведено експериментальні дослідження роботи платформи в умовах наявності перешкод. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих рішень.

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п. 9.4 «Сприяти 12 прискореному розвитку високо- та середньо-високотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямами: розвиток інноваційної екосистеми”, індикатор 9.4.1.

ABSTRACT

Explanatory note: 77 pp., 11 tab., 14 figs., 4 appendices, 29 sources.

MOBILE ROBOTIC PLATFORM, AUTOMATED SYSTEM, DISTANCE SENSORS, CONTROL SYSTEM, RELIABILITY, OBSTACLE AVOIDANCE, MICROCONTROLLER.

The objective of this work is to improve the reliability of a mobile robotic platform's operation under real-world operating conditions.

The development focus is the process of automated motion control for a mobile robotic platform.

The subject of the development is the methods and means of constructing an automated control system for a mobile robotic platform using distance sensors.

This thesis examines the development of an automated control system for a mobile robotic platform with the aim of improving the reliability of its operation under real-world conditions. A system architecture, control algorithm, and methods for processing data from distance sensors are proposed. Experimental studies of the platform's operation in the presence of obstacles were conducted. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed solutions.

The results of this work can be linked to Sustainable Development Goal 9, "Industry, Innovation, and Infrastructure," specifically target 9.4: "Promote the accelerated development of high- and medium-high-tech manufacturing sectors based on the 'education–science–production' value chains and a cluster approach in the following areas: development of an innovation ecosystem," indicator 9.4.1.

ЗМІСТ

Перелік скорочень …… 7
Вступ ……..… 8
1 Аналіз предметної області та постановка задачі ……..…..…… 11
1.1 Особливості мобільних роботизованих платформ як об’єктів автоматичного керування ..……...…… 11
1.2 Датчики відстані та їх застосування в системах керування ……. 14
1.3 Аналіз методів керування рухом мобільною роботизованою платформою ……..……. 17
1.4 Аналіз існуючих автоматизованих систем керування …….. 20
1.5 Постановка задачі та формалізація системи керування …… 23
1.6 Висновки до першого розділу ……..... 24
2 Проєктування автоматизованої системи керування мобільною роботизованою платформою …….…….. 26
2.1 Загальна архітектура автоматизованої системи керування ..…… 26
2.2 Вибір апаратних засобів автоматизованої системи керування ..…….. 29
2.3 Розроблення алгоритму керування мобільною роботизованою платформою …….…….. 32
2.4 Організація обробки даних у автоматизованій системі керування ..… 35
2.5 Розроблення структури програмного забезпечення автоматизованої системи керування ..…….. 37
2.6 Висновки до другого розділу ……... 39
3 Реалізація автоматизованої системи керування мобільною роботизованою платформою ……..…… 41
3.1 Реалізація апаратної частини автоматизованої системи керування … 41
3.2 Реалізація програмного забезпечення автоматизованої системи керування ..……..……... 45

3.3 Реалізація інтерфейсу оператора автоматизованої системи керування …. ..……..……. 50
3.4 Тестування функціонування автоматизованої системи керування ….. 53
3.5 Висновки до третього розділу …… 65
4 Охорона праці ……..…..…… 67
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці ……..…….. 67
4.2 Промислова безпека на робочому місці ……..…….. 68
4.3 Виробнича санітарія у приміщенні …….……..…. 68
4.4 Пожежна безпека приміщення ……...…….……. 70
4.5 Висновки до четвертого розділу ……. 71
Висновки …… 73
Перелік джерел посилання ……... 75
Додаток А Програмний код мікроконтролера ESP32 ……..……. 78
Додаток Б Програмний код алгоритму автоматичного керування …….…. 82
Додаток В Програмний код керування двигунами …… 84
Додаток Г Програмний код інтерфейсу оператора автоматизованої системи керування ……..…. 87
Додаток Д Демонстраційний матеріал …… 92

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування;

ДВ – датчик відстані;

ІЧ – інфрачервоні;

МРП – мобільна роботизована платформа;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПК – персональний комп’ютер;

РС – роботизована система;

УЗ – ультразвукові;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

Мобільні роботизовані платформи (МРП) знаходять широке застосування у промисловості, логістиці, аграрному секторі, рятувальних та військових операціях. Вони використовуються для транспортування вантажів, моніторингу територій, виконання завдань у небезпечних або важкодоступних умовах. При цьому однією з ключових вимог до таких систем є їх надійність, що визначає здатність стабільно функціонувати в умовах зовнішніх збурень, невизначеності та змін середовища.

Реальні умови експлуатації МРП характеризуються наявністю перешкод, нерівностей поверхні, шумів вимірювальних сигналів, зміни освітленості, а також динамічних об’єктів. Це створює додаткові труднощі для забезпечення стабільного та безпечного руху. У зв’язку з цим важливого значення набуває використання сенсорних систем, зокрема датчиків відстані, які дозволяють отримувати інформацію про навколишнє середовище та формувати керуючі впливи для уникнення перешкод і коригування траєкторії руху.

Незважаючи на наявність великої кількості технічних рішень у сфері керування платформами, проблема підвищення надійності їх функціонування залишається актуальною. Це обумовлено необхідністю забезпечення стійкої роботи автоматизованої системи в умовах неповної або зашумленої інформації, а також потребою у простих та ефективних алгоритмах, придатних для реалізації на обмежених обчислювальних ресурсах мікроконтролерів.

Таким чином, актуальність даної роботи полягає у необхідності розроблення автоматизованої системи керування (АСК) МРП, яка забезпечує підвищення надійності її функціонування за рахунок ефективного використання датчиків відстані та алгоритмів обробки їх сигналів.

Мета роботи – підвищення надійності функціонування мобільної роботизованої платформи в реальних умовах експлуатації.

Об’єкт розробки – процес автоматизованого керування рухом мобільної роботизованої платформи.

Предмет розробки – методи та засоби побудови автоматизованої системи керування мобільною роботизованою платформою з використанням датчиків відстані.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати особливості функціонування МРП у реальних умовах експлуатації та визначити основні фактори, що впливають на їх надійність;

– дослідити принципи роботи та характеристики датчиків відстані (ДВ) і оцінити їх придатність для використання в умовах завад і невизначеності;

– виконати аналіз існуючих АСК МРП з точки зору забезпечення надійності;

– сформулювати вимоги до АСК, орієнтованої на підвищення надійності функціонування;

– розробити структуру АСК МРП з використанням ДВ;

– розробити алгоритм керування рухом, що забезпечує стабільну роботу АСК в умовах наявності перешкод і завад;

– реалізувати програмне забезпечення (ПЗ) АСК з урахуванням обмежених ресурсів мікроконтролера;

– здійснити практичну реалізацію АСК та провести експериментальні дослідження її роботи;

– виконати аналіз отриманих результатів та оцінити рівень підвищення надійності функціонування АСК:

– розробити заходи з забезпечення безпечних умов праці.

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні підходу до побудови АСК МРП шляхом використання комбінованої обробки даних від ДВ для підвищення точності виявлення перешкод та надійності функціонування системи в умовах змінного середовища.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні та впровадженні АСК МРП з використанням ДВ, яка забезпечує підвищення надійності її функціонування в реальних умовах експлуатації.

Пояснювальну записку кваліфікаційної роботи оформлено згідно з ДСТУ 3008:2015 [1] та з рекомендаціями з підготовки і оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти [2, 3].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Особливості мобільних роботизованих платформ як об’єктів автоматичного керування

МРП є складними технічними системами, що поєднують механічні, електронні та програмні компоненти для виконання задач автономного або дистанційного переміщення в навколишньому середовищі. Вони широко застосовуються у різних галузях, зокрема в промисловості, логістиці, сільському господарстві, сфері безпеки, рятувальних та військових операціях [4]. Основною перевагою таких систем є здатність виконувати завдання у складних або небезпечних умовах без безпосередньої участі людини [5].

На рис. 1.1 представлено схема застосування МРП.

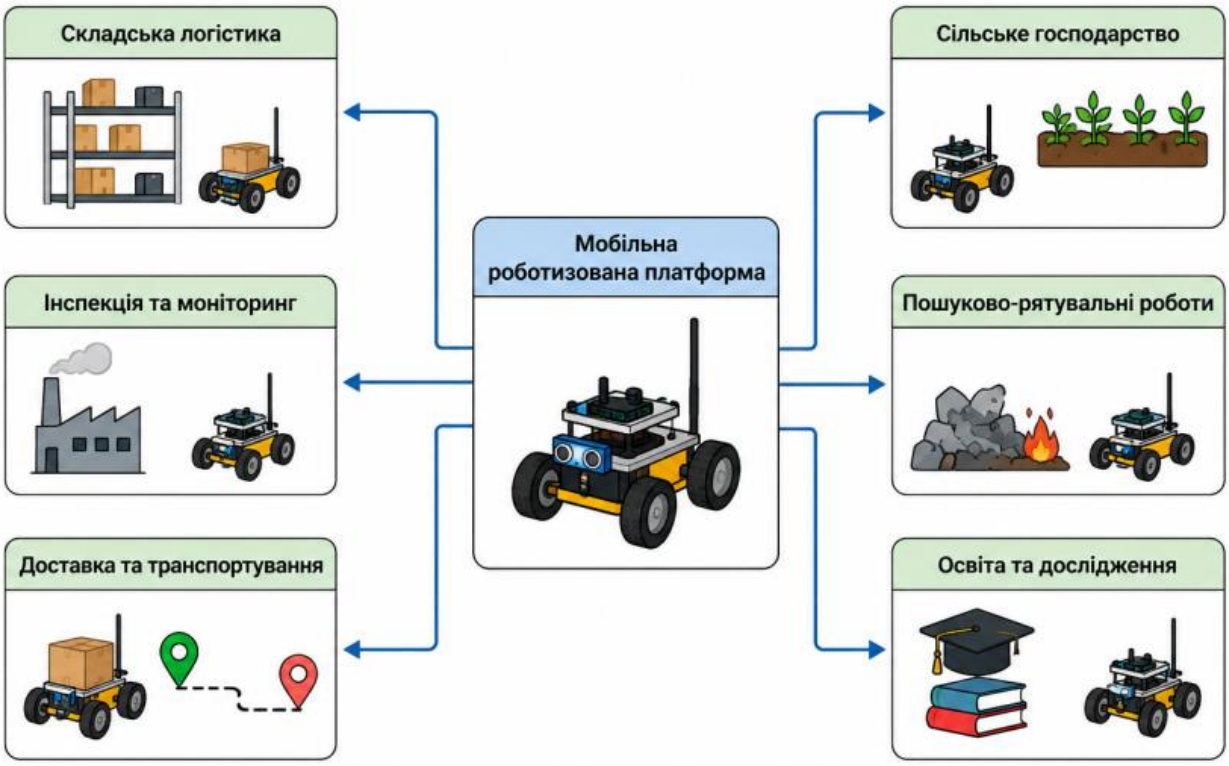


Рисунок 1.1 – Схема застосування МРП

З точки зору теорії автоматичного керування МРП розглядаються як динамічні об’єкти з багатоканальною структурою, що характеризуються взаємозв’язком між керуючими впливами та вихідними параметрами, такими як швидкість руху, напрямок переміщення, положення у просторі. При цьому на систему постійно діють зовнішні збурення, які можуть суттєво впливати на якість функціонування.

Однією з визначальних особливостей МРП є їх функціонування в умовах невизначеного та змінного середовища. На відміну від стаціонарних автоматизованих систем, де параметри об’єкта керування та середовища можуть бути заздалегідь відомими, МРП змушені працювати в реальному часі в умовах непередбачуваних змін. До таких змін належать поява статичних і динамічних перешкод, зміна типу поверхні, варіації освітлення, наявність шумів у вимірювальних каналах. Це створює значні труднощі для забезпечення стабільності та надійності роботи системи керування.

МРП класифікуються за різними ознаками. За типом рушійної системи виділяють колісні, гусеничні та крокуючі платформи [6, 7].

Колісні платформи є найбільш поширеними завдяки простоті конструкції, високій енергоефективності та відносній легкості реалізації алгоритмів керування.

Гусеничні платформи забезпечують кращу прохідність і стійкість на нерівних поверхнях, однак мають складнішу конструкцію і вищі енергетичні витрати.

Крокуючі платформи здатні долати складні перешкоди, але потребують значно складніших алгоритмів керування і мають обмежене застосування.

Важливим аспектом функціонування МРП є організація сенсорного забезпечення. Сенсорна система виконує функцію збору інформації про стан навколишнього середовища та внутрішні параметри платформи. До складу сенсорної системи можуть входити ДВ, інерціальні вимірювальні модулі, енкодери, камери та інші пристрої. У даній кваліфікаційної роботі основна увага приділяється датчикам відстані, які забезпечують визначення

положення перешкод відносно МРП та є основою для реалізації алгоритмів уникнення зіткнень.

З позиції теорії автоматичного керування МРП має ряд специфічних властивостей, які необхідно враховувати при розробленні системи керування:

– нелінійність – поведінка системи залежить від режиму руху, характеристик поверхні та параметрів навантаження;

– багатоканальність – керування здійснюється одночасно за декількома координатами (лінійна швидкість, кутова швидкість);

– наявність випадкових збурень – вплив перешкод, нерівностей поверхні, змін зовнішнього середовища;

– обмеженість обчислювальних ресурсів – використання мікроконтролерів із обмеженою продуктивністю;

– затримки в системі керування – час обробки сигналів і формування керуючих впливів;

– дискретність вимірювань – отримання інформації від датчиків з певною періодичністю.

Перелічені властивості ускладнюють процес керування і вимагають застосування ефективних алгоритмів, здатних працювати в умовах невизначеності та обмежених ресурсів.

Особливу увагу в даній роботі приділено забезпеченню надійності функціонування МРП. Надійність визначається як здатність системи виконувати задані функції з необхідною точністю протягом визначеного часу за умов впливу зовнішніх і внутрішніх факторів. Для МРП це означає забезпечення стабільного руху, своєчасного реагування на перешкоди та запобігання аварійним ситуаціям.

Основними показниками надійності функціонування МРП є:

– стабільність руху (відсутність різких відхилень від заданої траєкторії);

– час реакції на перешкоду;

– ймовірність уникнення зіткнення;

– стійкість до завад у вимірювальних каналах;

– безперервність функціонування системи.

На надійність роботи МРП впливає ряд факторів, які можна згрупувати наступним чином [4, 8]:

– сенсорні фактори: точність вимірювання відстані, швидкодія датчиків та наявність шумів і похибок;

– алгоритмічні фактори: ефективність обробки сигналів, адаптивність алгоритму керування та стійкість до помилок вимірювання;

– технічні фактори: характеристики виконавчих механізмів, якість електроживлення та надійність апаратних компонентів;

– експлуатаційні фактори: тип і стан поверхні, наявність перешкод та умови освітлення та навколишнього середовища.

З урахуванням зазначених факторів стає очевидним, що підвищення надійності функціонування МРП є комплексною задачею, яка потребує узгодженого підходу до розроблення апаратної та програмної складових системи.

Отже, МРП як об’єкт автоматичного керування є складною динамічною системою, що функціонує в умовах невизначеності та під впливом численних збурень. Це визначає необхідність розроблення ефективних автоматизованих систем керування, орієнтованих на підвищення надійності роботи платформи в реальних умовах експлуатації.

1.2 Датчики відстані та їх застосування в системах керування

Ефективність функціонування МРП значною мірою визначається якістю отримання інформації про навколишнє середовище. Основним джерелом такої інформації є сенсорна система, центральне місце в якій займають ДВ. Вони забезпечують визначення відстані до об’єктів у зоні руху платформи та використовуються для реалізації алгоритмів уникнення перешкод, стабілізації руху та орієнтації в просторі [9, 10].

ДВ працюють за різними фізичними принципами, що визначає їх точність, швидкодію, стійкість до завад та область застосування. У контексті МРП найбільш поширеними є ультразвукові (УЗ), інфрачервоні (ІЧ) та лазерні (LiDAR) ДВ (рис. 1.2) [16, 25].

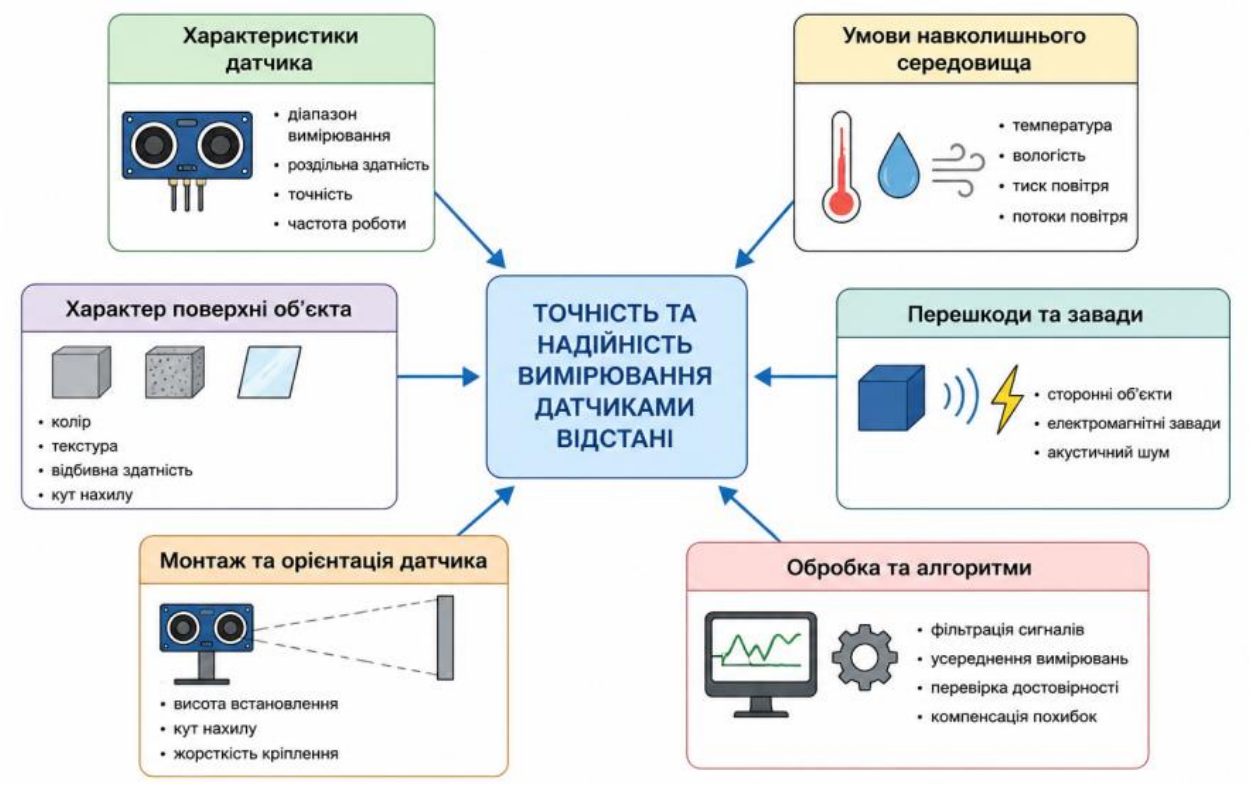


Рисунок 1.2 – Фактори точності та надійності вимірювання ДВ

УЗ ДВ базуються на випромінюванні звукової хвилі високої частоти (понад 20 кГц) та вимірюванні часу її відбиття від об’єкта [16, 20]. Відстань до об’єкта визначається за формулою:

$$d = \frac{v \cdot t}{2}, \tag{1.1}$$

де d – відстань до об’єкта, м;

v – швидкість звуку в середовищі (≈ 343 м/с);

t – час проходження сигналу, с.

До переваг УЗ ДВ належать: простота реалізації, низька вартість та незалежність від освітлення. До недоліків можна віднести: відносно низьку точність, залежність від температури і вологості та обмежену швидкодію.

ІЧ ДВ використовують випромінювання в ІЧ діапазоні для визначення відстані до об’єкта. Вони можуть працювати за принципом відбиття або триангуляції. До переваг ІЧ ДВ належать: швидка реакція, компактність та достатня точність на малих відстанях. До недоліків можна віднести: залежність від освітлення, чутливість до кольору і матеріалу поверхні та обмежений діапазон вимірювання.

Лазерні датчики (LiDAR, Light Detection and Ranging) – це сучасні датчики, що використовують лазерне випромінювання для точного визначення відстані. Вони забезпечують високу точність і можуть формувати карту навколишнього середовища. До переваг лазерних датчиків належать: висока точність, великий діапазон вимірювання та можливість побудови карти середовища. До недоліків можна віднести: високу вартість, складність обробки даних та більші вимоги до обчислювальних ресурсів.

Для вибору оптимального типу ДВ необхідно враховувати умови експлуатації та вимоги до АСК. Порівняння характеристик ДВ наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик датчиків відстані

Параметр	Ультразвукові	Інфрачервоні	Лазерні
Діапазон вимірювання	0,02 – 4 м	0,1 – 1.5 м	до 100 м
Точність	середня	середня	висока
Швидкодія	низька	висока	висока
Стійкість до освітлення	висока	низька	висока
Вартість	низька	низька	висока

Надійність функціонування АСК МРП значною мірою залежить від якості сенсорної інформації. Основними проблемами є наявність шумів у сигналі, похибки вимірювання, затримки передачі даних та втрата сигналу або хибні спрацювання.

Для підвищення надійності використовуються наступні методи [16, 18]:

– фільтрація сигналів (середнє, медіанне значення);

– усереднення вимірювань;

– використання порогових значень;

– комбінування даних з кількох датчиків.

Для даної кваліфікаційної роботи доцільним є використання УЗ ДВ, оскільки вони забезпечують достатню точність при низькій вартості та простоті реалізації. При цьому для підвищення надійності необхідно застосовувати методи обробки сигналів, що дозволяють зменшити вплив завад і нестабільності вимірювань.

1.3 Аналіз методів керування рухом мобільною роботизованою платформою

Керування рухом МРП є однією з ключових задач при створенні ефективної АСК. Від обраного методу керування залежить точність переміщення, швидкість реакції на зміну умов середовища, а також загальна надійність функціонування системи. У реальних умовах експлуатації АСК повинна забезпечувати стабільний рух МРП, своєчасне виявлення та об’їзд перешкод, а також адаптацію до зовнішніх збурень [26-28].

Методи керування МРП можна умовно поділити на три основні групи: ручні, автоматичні та інтелектуальні.

На рис. 1.3 наведено методи керування МРП.



Рисунок 1.3 – Методи керування МРП

Ручне керування передбачає безпосередню участь оператора у процесі керування платформою. Управління здійснюється за допомогою пульта дистанційного керування або комп'ютерного інтерфейсу. До переваг ручного керування належать: простота реалізації, повний контроль оператора та відсутність складних алгоритмів. До недоліків ручного керування можна віднести: залежність від людського фактору, низька швидкість реакції, відсутність автономності та знижена надійність у складних умовах. Отже, ручне керування не забезпечує необхідного рівня надійності при роботі в умовах невизначеного середовища.

Автоматичне керування базується на використанні сенсорної інформації для формування керуючих впливів без участі оператора. У таких системах широко застосовуються ДВ для виявлення перешкод. Найбільш поширеним є метод реактивного керування, при якому система реагує на поточні вимірювання без побудови складної моделі середовища. Основні принципи роботи при автоматичному керуванні: рух вперед при відсутності перешкод, зупинка або поворот при виявленні об'єкта та коригування траєкторії в реальному часі. До переваг автоматичного керування належать: автономність роботи, швидка реакція та простота реалізації. До недоліків

автоматичного керування можна віднести: відсутність прогнозування, можливість “зациклення” у складному середовищі та залежність від точності датчиків.

Для підвищення ефективності АСК застосовуються алгоритми уникнення перешкод. Найбільш поширені алгорітми уникнення перешкод [22]:

– пороговий метод – реакція системи залежить від порогового значення відстані;

– метод “стіна-наслідування” – рух вздовж перешкоди;

– векторний метод – врахування напрямків руху та перешкод;

– гібридні алгоритми – поєднання декількох підходів.

Пороговий метод є найпростішим і широко використовується в системах на базі мікроконтролерів. Його суть полягає в тому, що при зменшенні відстані до перешкоди нижче заданого значення система генерує команду на зміну напрямку руху.

Надійність функціонування МРП безпосередньо залежить від обраного методу керування. Основні аспекти надійності системи:

– час реакції – швидкість реагування на зміну умов;

– стійкість до завад – здатність працювати при шумних даних;

– відсутність помилкових рішень – мінімізація хибних спрацювань;

– стабільність руху – плавність і передбачуваність траєкторії.

Автоматичні алгоритми з елементами фільтрації та адаптації забезпечують більш високий рівень надійності порівняно з простими реактивними підходами.

З урахуванням умов кваліфікаційної роботи та вимог до АСК доцільно використовувати реактивний алгоритм керування з елементами фільтрації та порогового прийняття рішень.Такий підхід забезпечує простоту реалізації, достатню швидкодію, можливість підвищення надійності за рахунок обробки сигналів та придатність для реалізації на мікроконтролерах.

1.4 Аналіз існуючих автоматизованих систем керування

На сучасному етапі розвитку робототехніки існує значна кількість АСК, які відрізняються за рівнем складності, функціональними можливостями, апаратною реалізацією та областями застосування. Проведення їх аналізу дозволяє визначити переваги та недоліки існуючих підходів, а також обґрунтувати вибір методів і засобів для розроблення власної системи, орієнтованої на підвищення надійності функціонування.

АСК можна класифікувати за такими ознаками [4, 6, 25]:

– за рівнем автономності: керовані (управління здійснюється оператором), напівавтоматичні (частина функцій автоматизована) та автономні (система самостійно приймає рішення);

– за архітектурою: централізовані (обробка даних виконується одним контролером), розподілені (функції розподілені між декількома модулями) та ієрархічні (багаторівнева структура керування);

– за способом обробки даних: реактивні системи, системи з побудовою карти середовища та інтелектуальні системи (AI/ML).

Найбільш поширені у навчальних та простих прикладних задачах Arduino-based платформи – використовують ультразвукові або ІЧ ДВ та прості алгоритми уникнення перешкод [18, 20, 21]. До переваг Arduino-based систем належать: низька вартість, простота реалізації та доступність компонентів. До недоліків можна віднести: обмежену обчислювальну потужність, низьку стійкість до завад та відсутність складної обробки даних.

Платформи на базі одноплатних комп’ютерів (Raspberry Pi, Jetson) – забезпечують розширені можливості обробки даних, включаючи використання камер і алгоритмів комп’ютерного зору [18, 20, 21]. До переваг систем на базі одноплатних комп’ютерів належать: висока обчислювальна потужність, підтримка складних алгоритмів та гнучкість реалізації. До недоліків можна віднести: вищу вартість, більші енергоспоживання та складність реалізації.

У дослідницьких та промислових задачах використовуються ROS-орієнтовані платформи (Robot Operating System) – забезпечують модульність і масштабованість [22]. До переваг ROS-орієнтованих систем належать: висока гнучкість, модульна структура та підтримка складних алгоритмів. До недоліків можна віднести: складність налаштування, вимогу до ресурсів та надлишковість для простих систем.

Промислові роботизовані платформи (AGV/AMR) застосовуються у логістиці, мають високий рівень надійності та безпеки [25]. До переваг промислових роботизованих платформ належать: висока надійність, сертифікована безпека та стабільність роботи. До недоліків можна віднести: високу вартість, складність модернізації та закриті рішення.

На рис. 1.4 показано існуючі платформи для АСК [4, 5].



Рисунок 1.4 – Платформи для АСК

У табл. 1.2 наведено порівняльний аналіз існуючих платформ для АСК.

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз існуючих платформ для АСК

Критерій	Arduino	Raspberry Pi	ROS	Промислові
1	2	3	4	5
Вартість	низька	середня	висока	дуже висока
Складність	низька	середня	висока	висока

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5
Автономність	низька	середня	висока	висока
Надійність	середня	середня	висока	дуже висока
Стійкість до завад	низька	середня	висока	висока
Масштабованість	низька	середня	висока	обмежена

З точки зору підвищення надійності функціонування системи можна зробити такі висновки, що прості системи (Arduino) є недостатньо стійкими до завад і помилок вимірювання, а складні системи (ROS, промислові) забезпечують високу надійність, але мають високу вартість і складність. Оптимальним є компромісний підхід – використання простої апаратної бази з удосконаленими алгоритмами обробки даних.

У результаті аналізу встановлено такі основні недоліки існуючих АСК:

– недостатня обробка шумів у сенсорних даних;

– відсутність адаптивних алгоритмів;

– залежність від умов середовища;

– нестабільність роботи при зміні зовнішніх факторів;

– обмежена універсальність рішень.

З урахуванням проведеного аналізу визначено, що перспективним напрямом є розроблення АСК, яка:

– базується на доступній апаратній платформі;

– використовує датчики відстані як основне джерело інформації;

– включає алгоритми обробки сигналів для підвищення точності;

– забезпечує адаптивне реагування на перешкоди;

– підвищує надійність функціонування в реальних умовах.

1.5 Постановка задачі та формалізація автоматизованої системи керування

На основі проведеного аналізу МРП, сенсорних систем та існуючих методів керування встановлено, що основною проблемою є забезпечення надійного функціонування платформи в умовах невизначеного середовища, наявності перешкод та завад у вимірювальних каналах [4, 7].

У зв'язку з цим виникає необхідність формалізації задачі розроблення АСК МРП, яка забезпечує стабільний рух, своєчасне виявлення перешкод та коригування траєкторії з урахуванням впливу зовнішніх факторів.

Нехай МРП рухається в середовищі з невідомим розташуванням перешкод. АСК повинна:

– отримувати інформацію про відстань до об'єктів за допомогою ДВ;

– аналізувати отримані дані з урахуванням шумів і похибок;

– формувати керуючі сигнали для виконавчих механізмів;

– забезпечувати безпечний рух платформи без зіткнень.

Отже, задача полягає у побудові АСК, яка забезпечує мінімізацію ризику зіткнення, стабільність руху, своєчасність реагування на зміну середовища та підвищення загальної надійності функціонування.

АСК МРП можна представити у вигляді функціональної залежності:

$$U(t) = F(X(t), D(t), E(t)), \tag{1.2}$$

де $U(t)$ – керуючі впливи (сигнали на двигуни);

$X(t)$ – вектор стану платформи (швидкість, положення);

$D(t)$ – дані з датчиків відстані;

$E(t)$ – збурення (шуми, перешкоди, зміни середовища).

Вхідні параметри АСК: відстань до перешкод (дані ДВ), швидкість руху платформи та зовнішні збурення (нерівності, шум сигналів) [13,16].

Вихідні параметри АСК: швидкість обертання двигунів, напрям руху та команда зупинки або повороту.

При розробленні АСК необхідно враховувати такі обмеження:

– обмежена обчислювальна потужність мікроконтролера;

– затримки в обробці даних;

– похибки вимірювання датчиків;

– обмеження швидкості руху платформи;

– енергетичні обмеження.

Для оцінки ефективності АСК вводяться наступні критерії:

– ймовірність уникнення перешкод;

– час реакції системи;

– відхилення від заданої траєкторії;

– стабільність руху;

– стійкість до завад.

Основним критерієм є підвищення надійності функціонування АСК в умовах невизначеності.

З урахуванням обмежень та вимог до АСК обрано підхід до розв’язання задачі, який базується на:

– використанні ДВ як основного джерела інформації;

– застосуванні реактивного алгоритму керування;

– впровадженні методів фільтрації та обробки сигналів;

– використанні порогових значень для прийняття рішень.

Такий підхід дозволяє забезпечити баланс між простотою реалізації та підвищенням надійності АСК МРП.

1.6 Висновки до першого розділу

У першому розділі кваліфікаційної роботи було проведено аналіз особливостей МРП як об’єкт автоматичного керування та визначено основні фактори, що впливають на надійність їх функціонування в реальних умовах

експлуатації.

Встановлено, що МРП функціонують у складному, динамічному та невизначеному середовищі, яке характеризується наявністю перешкод, змін рельєфу та завад у вимірювальних каналах. Це зумовлює необхідність застосування ефективних АСК, здатних забезпечити стабільність і безпечність руху платформи.

У результаті аналізу сенсорних засобів визначено, що ДВ є ключовими елементами системи керування, оскільки забезпечують отримання інформації про навколишнє середовище в реальному часі. Розглянуто основні типи датчиків (УЗ, ІЧ, лазерні), їх переваги та обмеження, що дозволило обґрунтувати доцільність їх використання для задач виявлення перешкод.

Проведений огляд існуючих АСК МРП показав, що більшість з них орієнтовані на базові функції уникнення перешкод, однак не в повній мірі враховують вплив завад, нестабільності вимірювань та змін зовнішнього середовища на надійність функціонування. Це підтверджує актуальність розроблення більш ефективних підходів до обробки сенсорної інформації та формування керуючих впливів.

Визначено, що надійність функціонування МРП залежить від сукупності факторів, серед яких ключовими є точність і швидкодія датчиків, ефективність алгоритмів обробки сигналів, якість реалізації керуючих алгоритмів та умови експлуатації.

У результаті виконаного аналізу сформульовано постановку задачі дослідження, яка полягає у розробленні АСК МРП з використанням УЗ ДВ, орієнтованої на підвищення надійності її функціонування в умовах наявності перешкод та завад.

2 ПРОЄКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНОЮ РОБОТИЗОВАНОЮ ПЛАТФОРМОЮ

2.1 Загальна архітектура автоматизованої системи керування

Розроблення ефективної АСК МРП потребує побудови раціональної архітектури, яка забезпечує стабільне функціонування системи в умовах невизначеного середовища, наявності зовнішніх збурень та обмежених обчислювальних ресурсів [4, 7, 8]. Архітектура системи визначає принципи взаємодії між сенсорними, обчислювальними та виконавчими компонентами, а також способи обробки інформації та формування керуючих впливів.

Основною задачею автоматизованої системи є забезпечення безпечного та стабільного руху платформи шляхом аналізу інформації про навколишнє середовище, своєчасного виявлення перешкод та формування команд керування виконавчими механізмами.

На рис. 2.1 наведена загальна структурна схема АСК МРП.



Рисунок 2.1 – Загальна структурна схема АСК МРП

Загальна структурна схема АСК МРП складається з таких основних підсистем:

– сенсорна;

– обробки даних;

– прийняття рішень;

– виконавча;

– живлення;

– зворотного зв’язку.

Кожна з підсистем виконує окремі функції та взаємодіє з іншими компонентами АСК.

Сенсорна підсистема – призначена для отримання інформації про навколишнє середовище та стан МРП. Основними елементами є ДВ, які забезпечують визначення розташування перешкод відносно платформи. До складу сенсорної підсистеми входять: УЗ та ІЧ датчики, інерціальний модуль (IMU), а також енкодери двигунів. УЗ датчики використовуються для визначення відстані до об’єктів у фронтальній та бокових зонах. ІЧ датчики можуть застосовуватися як додаткові засоби контролю ближньої дистанції. Інерціальний модуль забезпечує оцінювання прискорення та кутового положення платформи, а енкодери дозволяють контролювати швидкість обертання двигунів. Сенсорна підсистема є критично важливою для забезпечення надійності функціонування системи, оскільки саме якість сенсорної інформації визначає точність прийняття рішень.

Підсистема обробки даних – виконує опитування датчиків, перевірку достовірності вимірювань, фільтрацію шумів, усереднення сигналів та формування масиву даних для подальшої обробки. Для зменшення впливу завад застосовуються методи: ковзного середнього, медіанної фільтрації та порогової перевірки. Фільтрація сигналів дозволяє знизити ймовірність хибного спрацювання системи та підвищити стабільність роботи МРП.

Підсистема прийняття рішень – центральний елемент АСК. Вона аналізує дані, отримані від сенсорної системи, та формує керуючі команди

для виконавчих механізмів. Основними функціями підсистеми є визначення наявності перешкод, оцінювання безпечності траєкторії, вибір напрямку руху, формування команд зміни швидкості або повороту, а також зупинка платформи при критичній ситуації. Алгоритм роботи базується на реактивному принципі керування, при якому система приймає рішення в реальному часі на основі поточних вимірювань.

Виконавча підсистема – забезпечує реалізацію команд керування, сформованих контролером. До її складу входять: драйвери двигунів, електродвигуни та механізми передавання руху. Драйвери двигунів формують сигнали керування для зміни швидкості та напрямку обертання двигунів. Керування здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Основними задачами виконавчої підсистеми є забезпечення плавності руху, стабілізація швидкості, реалізація маневрування та виконання команд зупинки.

Система живлення – забезпечує електроживлення всіх компонентів МРП. До її складу входять: акумуляторна батарея, стабілізатори напруги та захисні елементи. Стабільність живлення є важливим фактором забезпечення надійності функціонування системи, оскільки перепади напруги можуть призводити до помилок у роботі контролера та датчиків.

Зворотний зв’язок – використовується для контролю поточного стану системи та корекції керуючих впливів. До його основних функцій належать: контроль швидкості та напрямку руху, виявлення відхилень від заданого режиму, а також оцінювання ефективності виконання команд. Наявність зворотного зв’язку дозволяє підвищити точність керування та забезпечити стабільність роботи системи навіть при впливі зовнішніх збурень.

Принцип функціонування системи полягає у безперервному отриманні даних від датчиків відстані та передачі їх до контролера для подальшої обробки. Після фільтрації й аналізу сигналів система визначає наявність перешкод і формує відповідні керуючі команди для двигунів платформи. Драйвери двигунів реалізують необхідний режим руху – рух вперед, поворот

або зупинку. Система зворотного зв’язку забезпечує контроль виконання команд та підвищує надійність функціонування МРП.

Такий підхід забезпечує адаптивне реагування на зміну умов середовища та підвищує надійність функціонування МРП.

2.2 Вибір апаратних засобів автоматизованої системи керування

Одним із найважливіших етапів розроблення АСК МРП є вибір апаратних засобів. Від характеристик обраних компонентів залежать функціональні можливості системи, швидкодія, енергоефективність, точність роботи датчиків та загальна надійність функціонування платформи в реальних умовах експлуатації.

На рис. 2.2 наведена структура апаратної частини АСК МРП.

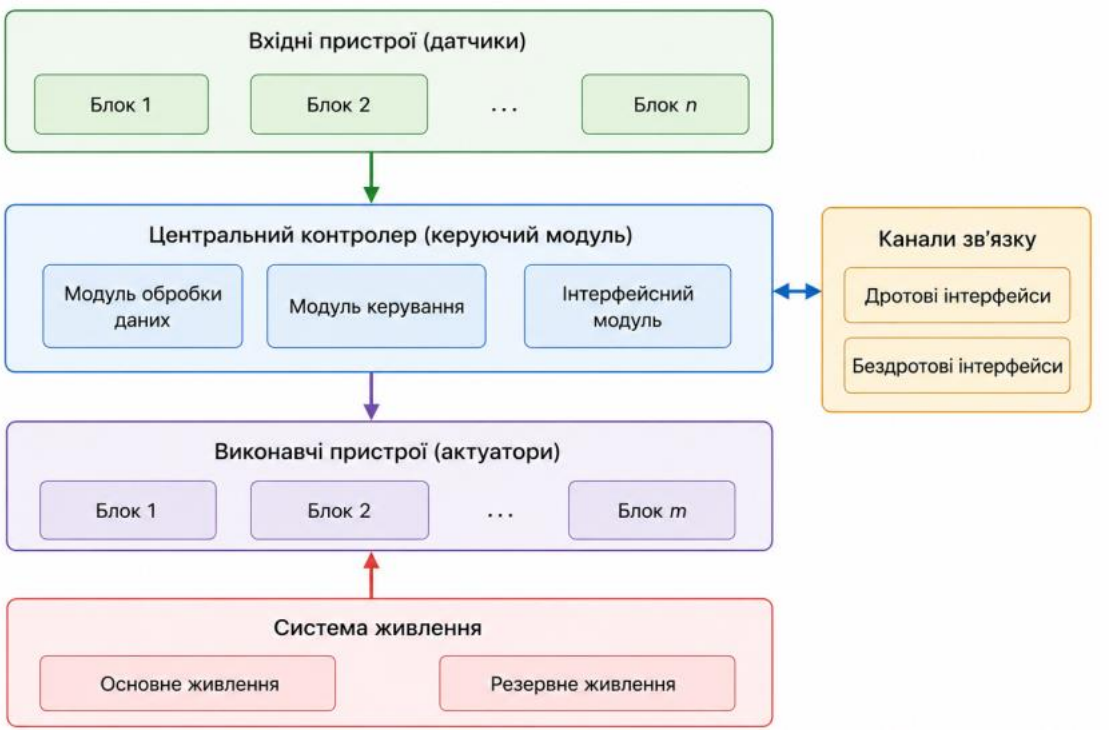


Рисунок 2.2 – Структура апаратної частини АСК

Основними вимогами до апаратної частини АСК є:

– забезпечення стабільної роботи в умовах зовнішніх збурень;

– достатня швидкодія обробки даних;

– підтримка роботи з датчиками відстані;

– низьке енергоспоживання;

– простота інтеграції компонентів;

– доступність та невисока вартість.

Центральним елементом АСК є мікроконтролер, який виконує функції опитування датчиків, обробки даних, формування керуючих сигналів та реалізації алгоритму керування [11, 18, 21]. Для реалізації системи доцільно використовувати мікроконтролер ESP32 або Arduino Uno.

Arduino Uno є одним із найпоширеніших мікроконтролерних модулів для РТС. До переваг Arduino Uno належать: простота програмування, велика кількість бібліотек, достатня кількість портів введення/виведення та низька вартість. До недолеків можна віднести: обмежену продуктивність, невеликий обсяг пам’яті та відсутність вбудованого бездротового зв’язку.

Мікроконтролер ESP32 є більш сучасним рішенням і має розширені функціональні можливості. До переваг ESP32 належать: двоядерний процесор, висока швидкодія, підтримка Wi-Fi та Bluetooth, велика кількість периферійних інтерфейсів та низьке енергоспоживання. До недолеків можна віднести: складність налаштування та вищі вимоги до програмної реалізації.

У табл. 2.1 наведено порівняння основних характеристик Arduino Uno та ESP32.

Таблиця 2.1 – Порівняння характеристик Arduino Uno та ESP32

Параметр	Arduino Uno	ESP32
1	2	3
Тактова частота	16 МГц	до 240 МГц
Оперативна пам’ять	2 КБ	520 КБ
Wi-Fi / Bluetooth	ні	так
Кількість GPIO	14	понад 30
Енергоспоживання	низьке	середнє

З урахуванням вимог до швидкодії та перспективи подальшого розширення функціональності доцільним є використання мікроконтролера ESP32.

Для реалізації системи уникнення перешкод використовуються ДВ. Основними критеріями вибору є точність, швидкодія, стійкість до завад та простота підключення. У роботі пропонується використання УЗ ДВ HC-SR04. Для підвищення надійності доцільно використовувати декілька датчиків: фронтальний, лівий та правий. Це дозволяє контролювати декілька зон навколо МРП. Принцип роботи ДВ HC-SR04 базується на вимірюванні часу проходження УЗ сигналу до об’єкта та назад [16, 25]. До переваг HC-SR04 належать: простота інтеграції, достатня точність та низька вартість. До недолеків можна віднести: чутливість до шумів, залежність від поверхні об’єкта та вплив температури та вологості.

У табл. 2.2 наведено основні характеристики УЗ ДВ HC-SR04.

Таблиця 2.2 – Основні характеристики УЗ ДВ HC-SR04

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання	2 – 400 см
Точність	±3 мм
Кут огляду	приблизно 15°
Напруга живлення	5 В

Виконавчі механізми забезпечують фізичне переміщення МРП. У роботі використовуються: двигуни постійного струму, драйвери двигунів та колісна база. Основними перевагами двигунів постійного струму є простота керування, можливість плавного регулювання швидкості та компактність. Для керування швидкістю використовується широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Драйвер двигунів L298N забезпечує керування напрямком обертання, регулювання швидкості та захист від перевантаження [17, 19]. До переваг L298N належать: підтримка двох двигунів, простота підключення та

сумісність з ESP32.

Система живлення повинна забезпечувати стабільне електроживлення всіх компонентів МРП. До основних вимог належать: достатня ємність акумулятора, стабільність напруги та захист від перевантаження. У роботі доцільно використовувати Li-Ion або Li-Po акумулятори, DC-DC перетворювачі, а також модулі стабілізації напруги.

Обрані апаратні засоби забезпечують ефективне функціонування АСК МРП. Використання мікроконтролера ESP32, УЗ ДВ HC-SR04 та драйвера двигунів L298N дозволяє реалізувати алгоритм уникнення перешкод і забезпечити стабільний рух платформи. Запропонована структура апаратної частини АСК підтримує роботу з декількома датчиками та забезпечує достатню швидкодію обробки даних у режимі реального часу. Використання методів фільтрації та контролю сигналів підвищує достовірність вимірювань і надійність функціонування системи. Крім того, модульна побудова апаратної частини забезпечує можливість подальшого розширення та модернізації АСК.

2.3 Розроблення алгоритму керування мобільною роботизованою платформою

Одним із ключових етапів створення автоматизованої системи є розроблення алгоритму керування МРП. Від ефективності алгоритму залежить здатність системи своєчасно реагувати на зміни навколишнього середовища, уникати перешкод, підтримувати стабільність руху та забезпечувати надійність функціонування в реальних умовах експлуатації [6, 25].

Основною задачею алгоритму є аналіз даних, отриманих від ДВ, та формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів.

При розробленні алгоритму керування необхідно враховувати такі вимоги, як:

– робота в режимі реального часу;

– швидка реакція на появу перешкод;

– стійкість до шумів і похибок вимірювання;

– простота реалізації на мікроконтролері;

– мінімальне навантаження на обчислювальні ресурси;

– забезпечення стабільності руху платформи.

Крім того, алгоритм повинен забезпечувати надійне функціонування системи навіть при частковій нестабільності сенсорної інформації.

На рис. 2.3 наведено алгоритм функціонування АСК МРП.



Рисунок 2.3 – Алгоритм функціонування АСК МРП

Алгоритм керування базується на реактивному принципі, при якому система формує керуючі дії на основі поточних даних від датчиків.

Принцип роботи АСК МРП полягає у безперервному контролі навколишнього середовища за допомогою датчиків відстані. Отримані сигнали надходять до мікроконтролера, де виконується перевірка достовірності вимірювань, фільтрація шумів та усереднення даних. Після обробки інформації система визначає наявність перешкод та оцінює безпечність подальшого руху. На основі отриманих результатів формується рішення щодо зміни напрямку руху, повороту або зупинки платформи. Далі керуючі сигнали передаються до виконавчих механізмів через драйвери двигунів. Система зворотного зв’язку забезпечує контроль виконання команд і підвищує надійність функціонування МРП в реальних умовах експлуатації.

Алгоритм керування МРП базується на безперервному аналізі інформації, отриманої від ДВ. Під час руху система постійно контролює наявність перешкод перед платформою та з бокових сторін, що дозволяє своєчасно реагувати на зміну умов навколишнього середовища. У разі виявлення перешкоди контролер виконує аналіз доступного простору та визначає найбільш безпечний напрямок подальшого руху. Після цього формується команда на зміну траєкторії, поворот або зупинку МРП.

Для підвищення стабільності роботи АСК виконується фільтрація та усереднення сигналів від датчиків, що дозволяє зменшити вплив випадкових шумів і похибок вимірювання [7, 25, 28].

Керування швидкістю та напрямком руху здійснюється за допомогою драйверів двигунів, які отримують сигнали від мікроконтролера.

У ПЗ реалізовано механізми контролю достовірності вимірювань та повторної перевірки критичних значень.

Крім того, АСК підтримує аварійний режим роботи, який активується у випадку виникнення помилок або критичного наближення до перешкоди.

Циклічний принцип функціонування АСК забезпечує адаптивне реагування МРП на зміну умов експлуатації та підвищує надійність її роботи

в реальному середовищі.

2.4 Організація обробки даних у автоматизованій системі керування

Ефективність функціонування АСК МРП значною мірою залежить від якості обробки даних, отриманих від сенсорної підсистеми. У реальних умовах експлуатації сигнали від датчиків можуть містити випадкові шуми, похибки вимірювання та нестабільності, що виникають під впливом зовнішніх факторів [10, 11]. Наявність таких завад може призводити до помилкового прийняття рішень, нестабільності руху та зниження надійності функціонування системи.

У зв’язку з цим організація обробки даних є одним із ключових етапів розроблення АСК. Основною задачею підсистеми обробки даних є підвищення достовірності сенсорної інформації та забезпечення стабільної роботи алгоритму керування [6, 10, 21].

На рисунку 2.4 наведена схема обробки даних у АСК МРП.

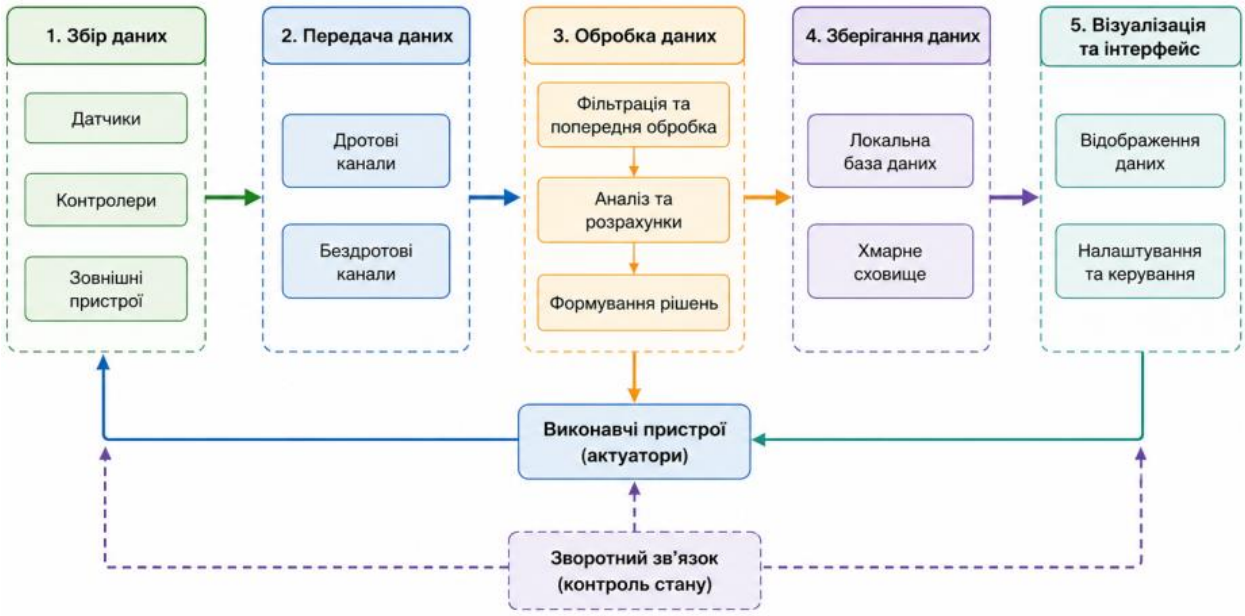


Рисунок 2.4 – Схема обробки даних у АСК МРП

Процес обробки даних у АСК МРП є одним із найважливіших етапів забезпечення її стабільного та надійного функціонування. Основною задачею підсистеми обробки даних є отримання достовірної інформації про навколишнє середовище та формування даних для подальшого прийняття рішень. Система використовує декілька УЗ ДВ, які розташовані у фронтальній та бокових частинах МРП. Під час роботи виконується безперервне циклічне опитування датчиків з однаковим часовим інтервалом, що дозволяє забезпечити стабільність функціонування системи та рівномірне навантаження на мікроконтролер. Отримані сигнали можуть містити випадкові шуми, похибки вимірювання та нестабільні значення, які виникають під впливом зовнішніх факторів.

Для підвищення достовірності вимірювань виконується перевірка отриманих даних на відповідність допустимому діапазону значень. У випадку виявлення аномальних або нестабільних сигналів система виконує повторне вимірювання та порівняння результатів. Після цього здійснюється фільтрація сигналів, основною задачею якої є зменшення впливу випадкових шумів і короткочасних помилок. Для цього використовується метод усереднення вимірювань, що дозволяє стабілізувати роботу алгоритму керування та підвищити точність визначення відстані до перешкод [26, 27]. Додатково виконується нормалізація даних, яка спрощує подальшу обробку інформації та забезпечує однаковий формат представлення сигналів.

Після завершення обробки формується масив даних, який містить інформацію про відстань до перешкод спереду та з бокових сторін платформи. Даний масив передається до підсистеми прийняття рішень, де визначається подальший режим руху МРП. Для забезпечення стабільної роботи АСК в умовах завад реалізовано додаткові механізми контролю достовірності сигналів, повторного опитування ДВ та резервування критичних вимірювань. Це дозволяє зменшити ймовірність хибного спрацювання системи та підвищити надійність функціонування МРП.

Важливою особливістю системи є її здатність працювати в реальних умовах експлуатації, де можуть виникати вібрації, нерівності поверхні, зміни освітлення та динамічні перешкоди. Безперервний циклічний процес обробки даних забезпечує адаптивне реагування на зміну умов навколишнього середовища та підтримує стабільність руху МРП.

2.5 Розроблення структури програмного забезпечення автоматизованої системи керування

ПЗ є ключовою складовою АСК МРП, оскільки саме воно забезпечує реалізацію алгоритмів обробки даних, прийняття рішень та формування керуючих впливів для виконавчих механізмів [10, 11]. Від якості програмної реалізації залежить швидкодія системи, стабільність функціонування та рівень надійності роботи платформи в реальних умовах експлуатації.

Основною задачею ПЗ є забезпечення безперервного циклу: отримання даних від датчиків, аналізу вимірювань, формування рішень, керування рухом платформи та контролю стану системи.

На рис. 2.5 наведена структура ПЗ АСК МРП.



Рисунок 2.5 – Структура ПЗ АСК МРП

ПЗ АСК МРП повинно забезпечувати стабільну та безперервну роботу всіх компонентів системи. Однією з основних вимог є функціонування в режимі реального часу, що дозволяє своєчасно реагувати на появу перешкод і зміну умов навколишнього середовища.

Важливими характеристиками ПЗ є висока швидкодія, стійкість до помилок та надійність роботи при нестабільності сенсорної інформації.

Для спрощення розроблення та подальшого вдосконалення АСК побудована за модульним принципом [10, 11]. Такий підхід дозволяє окремо реалізувати функції зчитування даних, обробки сигналів, прийняття рішень та керування виконавчими механізмами. Модульна структура також підвищує зручність налагодження та забезпечує можливість подальшого розширення функціональності АСК.

ПЗ оптимізоване для роботи на мікроконтролері з обмеженими обчислювальними ресурсами, що забезпечує ефективне функціонування МРП в реальних умовах експлуатації.

ПЗ АСК МРП побудоване за модульним принципом, що забезпечує стабільність функціонування, зручність налагодження та можливість подальшого розширення системи. До його складу входять модулі ініціалізації, роботи з датчиками, обробки даних, прийняття рішень, керування двигунами, контролю стану системи та аварійного захисту.

Після запуску системи виконується налаштування мікроконтролера, ініціалізація датчиків і перевірка працездатності основних компонентів.

У процесі роботи ПЗ здійснює циклічне опитування ДВ, фільтрацію та аналіз отриманих даних. На основі обробки результатів формується рішення щодо подальшого руху платформи та передаються відповідні сигнали до драйверів двигунів.

Для забезпечення стабільності роботи в структурі ПЗ реалізовано контроль достовірності вимірювань і механізми повторної перевірки сигналів.

У випадку виникнення критичних помилок або небезпечного наближення до перешкоди система переходить у аварійний режим і виконує зупинку МРП.

Реалізована структура ПЗ забезпечує підвищення надійності функціонування МРП в реальних умовах експлуатації.

Модульна структура дозволяє легко модернізувати систему та додавати нові функціональні можливості.

2.6 Висновки до другого розділу

У другому розділі кваліфікаційної роботи розроблено АСК МРП з використанням ДВ, орієнтовану на підвищення надійності функціонування в реальних умовах експлуатації.

У результаті проведених досліджень сформовано загальну структурну схему АСК, яка включає сенсорну підсистему, підсистему обробки даних, модуль прийняття рішень, виконавчу підсистему та систему зворотного зв’язку. Визначено принципи взаємодії між компонентами системи та обґрунтовано їх функціональне призначення.

Виконано вибір апаратних засобів АСК. Обґрунтовано доцільність використання мікроконтролера ESP32, УЗ ДВ HC-SR04 та драйвера двигунів L298N, які забезпечують необхідну швидкодію, простоту реалізації та достатній рівень функціональності для реалізації алгоритмів АСК МРП.

Розроблено алгоритм керування рухом МРП, який базується на аналізі даних ДВ та реалізує адаптивне реагування на появу перешкод. Запропонований алгоритм забезпечує автоматичний вибір напряму руху, коригування траєкторії та виконання аварійної зупинки у критичних ситуаціях.

Особливу увагу приділено організації обробки сенсорної інформації. Для підвищення достовірності вимірювань запропоновано використання методів фільтрації, усереднення та перевірки достовірності сигналів, що

дозволяє зменшити вплив шумів і нестабільності вимірювань на роботу АСК.

У процесі розроблення структури ПЗ реалізовано модульний підхід, який забезпечує простоту масштабування, зручність налагодження та стабільність функціонування АСК. Програмна структура включає модулі ініціалізації, роботи з датчиками, обробки даних, прийняття рішень, керування двигунами та аварійного захисту.

Результати другого розділу підтверджують, що запропоновані технічні та програмні рішення забезпечують підвищення надійності функціонування МРП за рахунок ефективної обробки даних ДВ, адаптивного алгоритму керування та реалізації механізмів контролю помилок і аварійного захисту.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНОЮ РОБОТИЗОВАНОЮ ПЛАТФОРМОЮ

3.1 Реалізація апаратної частини автоматизованої системи керування

Реалізація апаратної частини АСК МРП є одним із ключових етапів створення РС, оскільки саме апаратні компоненти забезпечують збір інформації про навколишнє середовище, її обробку та формування керуючих впливів на виконавчі механізми. Від правильного вибору елементної бази, способу їх взаємодії та надійності функціонування залежить ефективність роботи всієї системи автоматизації [11, 13, 18].

Під час розроблення апаратної частини основна увага приділялася забезпеченню високої надійності роботи АСК в реальних умовах експлуатації, простоті інтеграції окремих модулів, можливості подальшої модернізації та використанню доступних компонентів, що широко застосовуються у сучасних РС [13, 16-18].

Реалізована структура апаратної частини АСК МРП наведено на рис. 3.1.

Апаратна частина складається з мікроконтролерного модуля, сенсорної підсистеми, виконавчих механізмів, драйвера двигунів, системи живлення та допоміжних електронних компонентів, що забезпечують стабільне функціонування всієї МРП.

Основою системи є мікроконтролер ESP32, який виконує функції центрального керуючого пристрою. Його обчислювальні ресурси дозволяють реалізувати алгоритми обробки даних у режимі реального часу, забезпечити взаємодію з периферійними пристроями та формувати сигнали керування електроприводами. Використання ESP32 також забезпечує можливість бездротового обміну даними за допомогою інтерфейсів Wi-Fi та Bluetooth, що значно розширює функціональні можливості системи [13, 18, 21].

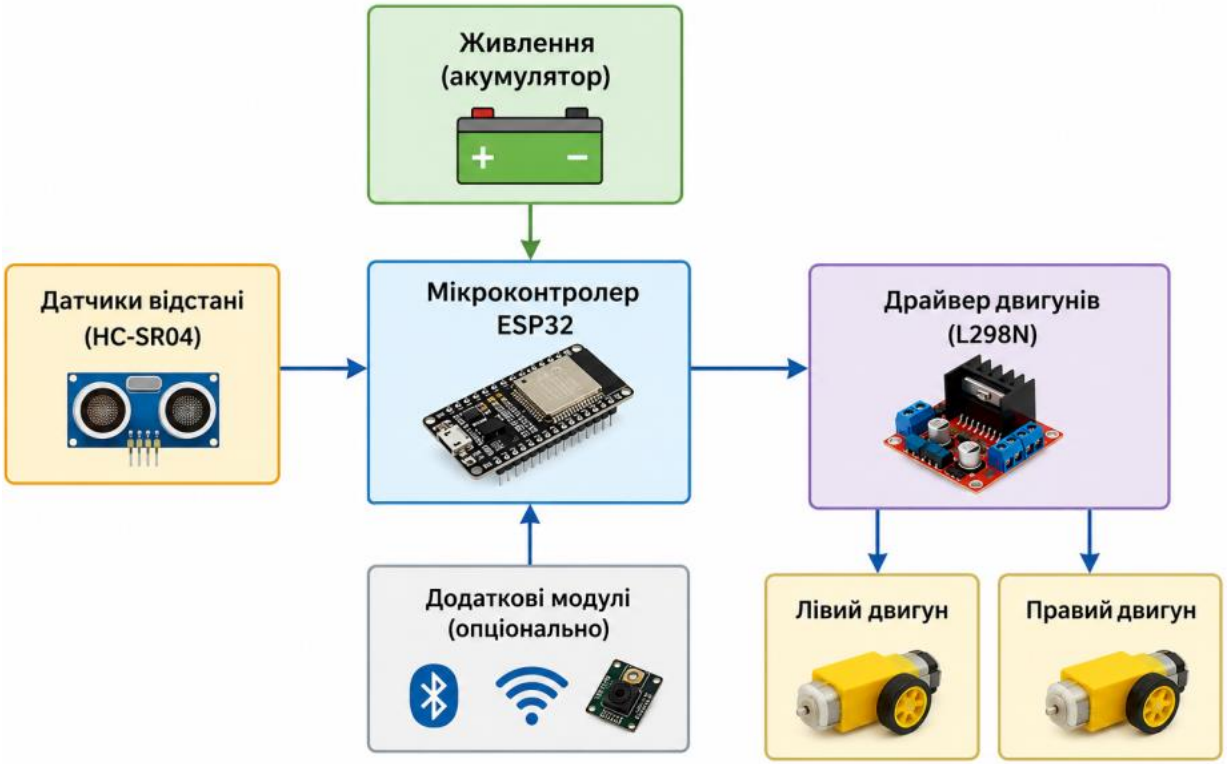


Рисунок 3.1 – Реалізована структура апаратної частини АСК МРП

Для контролю навколишнього середовища застосовано ультразвукові датчики HC-SR04, які встановлено у фронтальній та бокових частинах мобільної платформи. Таке розташування забезпечує контроль простору перед МРП та з обох сторін, що дозволяє своєчасно виявляти перешкоди та приймати рішення щодо зміни напрямку руху [16, 20].

Основні технічні характеристики використаних апаратних компонентів АСК МРП наведено в таблиці 3.1.

Дані від ДВ надходять до мікроконтролера, де проходять первинну обробку, перевірку достовірності та фільтрацію. Після цього формується масив інформації, який використовується алгоритмом керування для визначення поточного режиму руху МРП. Завдяки цьому забезпечується швидке реагування системи на появу перешкод і мінімізується кількість хибних спрацьовувань, викликаних випадковими шумами або похибками вимірювання [5].

Таблиця 3.1 – Основні технічні характеристики використаних апаратних компонентів АСК

Компонент	Основні технічні характеристики	Призначення в системі
Мікроконтролер ESP32	двоядерний процесор Xtensa LX6; тактова частота до 240 МГц; SRAM – 520 КБ; Flash – до 16 МБ; Wi-Fi 802.11 b/g/n; Bluetooth 4.2 BLE; робоча напруга – 3,3 В	центральний модуль керування, обробка даних датчиків, реалізація алгоритму керування та формування керуючих сигналів
Ультразвуковий датчик HC-SR04	діапазон вимірювання – 2 – 400 см; точність – ±3 мм; кут огляду – близько 15°; робоча напруга – 5 В; частота ультразвуку – 40 кГц	вимірювання відстані до перешкод та передавання інформації до мікроконтролера
Драйвер двигунів L298N	напруга живлення двигунів – 5 – 35 В; максимальний струм до 2 А на канал; керування двома двигунами постійного струму; підтримка ШІМ-керування	керування швидкістю та напрямком обертання двигунів МРП
Двигуни постійного струму (DC Motor)	напруга живлення – 6 – 12 В; швидкість обертання – до 300 об/хв; редукторний тип; номінальний струм – до 300 мА	забезпечення поступального руху та маневрування МРП
Li-Ion акумуляторна батарея	номінальна напруга – 7,4 В; ємність – 2200 – 3000 мА·год; багаторазовий цикл заряджання	автономне живлення всіх компонентів системи
DC–DC перетворювач напруги	вхідна напруга – 5 – 24 В; вихідна – 5 В або 3,3 В; ККД до 90 %	стабілізація живлення мікроконтролера та периферійних пристроїв
Колісна мобільна платформа	два ведучих колеса; диференціальна схема керування; опорне колесо	забезпечення переміщення МРП
З'єднувальні інтерфейси	GPIO, PWM, UART, I²C, SPI	обмін даними між апаратними компонентами системи

Для керування електродвигунами використовується драйвер L298N, який забезпечує зміну напрямку обертання двигунів, регулювання швидкості

за допомогою ШІМ та захист силових кіл від перевантаження. Драйвер взаємодіє з мікроконтролером через цифрові виходи та забезпечує стабільне керування двома двигунами постійного струму [17, 19].

Виконавча частина складається з двох двигунів постійного струму, механічно з'єднаних із ведучими колесами. Така конструкція забезпечує реалізацію диференціального способу керування, при якому зміна швидкості або напрямку обертання окремих двигунів дозволяє виконувати рух уперед, назад, повороти на місці та маневрування в обмеженому просторі. Диференціальне керування характеризується простотою реалізації, високою маневреністю та достатньою точністю позиціонування платформи [6].

Система живлення реалізована на основі акумуляторної батареї, що забезпечує автономну роботу МРП. Для живлення окремих модулів застосовуються стабілізатори напруги, які підтримують необхідні рівні живлення мікроконтролера, датчиків та драйверів двигунів. Використання стабілізованих джерел живлення дозволяє мінімізувати вплив перепадів напруги на точність вимірювань та стабільність функціонування системи [8].

З метою підвищення надійності роботи апаратної частини АСК передбачено розділення силових і сигнальних кіл, використання фільтрувальних конденсаторів у ланцюгах живлення та резервування критично важливих вимірювань шляхом повторного опитування датчиків. Такий підхід дозволяє знизити вплив електромагнітних завад, що виникають під час роботи двигунів, та забезпечити коректне функціонування мікроконтролерної системи.

Взаємодія всіх апаратних компонентів АСК здійснюється відповідно до структурної схеми, наведеної на рисунку 3.1. Сенсорна підсистема забезпечує збір інформації про навколишнє середовище, мікроконтролер виконує її аналіз і прийняття рішень, а виконавчі механізми реалізують сформовані керуючі команди. Завдяки використанню модульної архітектури окремі компоненти можуть бути легко замінені або модернізовані без суттєвих змін структури всієї системи [4, 7, 23].

Реалізована апаратна частина АСК забезпечує необхідний рівень функціональності, швидкодії та надійності МРП. Використання сучасної елементної бази, раціональної структури взаємодії компонентів і засобів захисту від завад створює передумови для ефективної роботи АСК в реальних умовах експлуатації МРП та є основою для подальшої реалізації ПЗ і проведення експериментальних досліджень.

3.2 Реалізація програмного забезпечення автоматизованої системи керування

ПЗ є центральною складовою АСК МРП, оскільки саме воно забезпечує взаємодію між апаратними компонентами, обробку інформації від сенсорної підсистеми та формування керуючих впливів для виконавчих механізмів. Від якості програмної реалізації безпосередньо залежать швидкодія, стабільність та надійність функціонування всієї АСК в реальних умовах експлуатації [10, 14, 21].

Під час розроблення ПЗ було поставлено завдання створити систему, яка забезпечувала б безперервний моніторинг навколишнього середовища, своєчасне виявлення перешкод, аналіз отриманої інформації від ДВ та оперативне формування команд керування двигунами. Крім того, ПЗ повинно було ефективно працювати в умовах обмежених обчислювальних ресурсів мікроконтролера та забезпечувати мінімальний час реакції АСК на зміну зовнішньої ситуації [10, 11, 20].

Реалізована структура ПЗ АСК МРП наведено на рисунку 3.2.

ПЗ АСК МРП складається з окремих програмних модулів, що виконують функції ініціалізації системи, опитування датчиків, обробки вимірювальної інформації, прийняття рішень, керування двигунами та контролю стану МРП. Використання модульного принципу побудови значно спрощує супровід ПЗ, його тестування та подальшу модернізацію [4].



Рисунок 3.2 – Реалізована структура ПЗ САК МРП

Після ввімкнення живлення виконується ініціалізація всіх апаратних ресурсів мікроконтролера. Фрагмент програмного коду реалізації процедури ініціалізації апаратних ресурсів ESP32 представлено у лістингу 3.1 (повний програмний код наведено у Додатку А).

Лістинг 3.1 – Ініціалізація апаратних ресурсів ESP32

```
// Ініціалізація виводів ESP32
const int TRIG = 5;
const int ECHO = 18;
const int ENA = 25;
const int IN1 = 26;
const int IN2 = 27;
void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    // Налаштування ультразвукового датчика
    pinMode(TRIG, OUTPUT);
    pinMode(ECHO, INPUT);
    // Налаштування драйвера двигуна
    pinMode(ENA, OUTPUT);
    pinMode(IN1, OUTPUT);
    pinMode(IN2, OUTPUT);
    // Початковий стан двигуна
    digitalWrite(IN1, LOW);
    digitalWrite(IN2, LOW);
    analogWrite(ENA, 0);
    Serial.println("ESP32 готовий до роботи");
}
void loop()
{
    // Основний алгоритм роботи системи
}
```

У наведеному фрагменті програмного коду (лістинг 3.1) показано основні етапи ініціалізації апаратних ресурсів мікроконтролера ESP32. Під час запуску програми виконується налаштування портів введення/виведення для підключення ультразвукового ДВ й драйвера двигуна. Далі встановлюється початковий безпечний режим роботи виконавчого механізму та ініціалізується послідовний інтерфейс для діагностики. Після завершення налаштування система переходить до виконання основного алгоритму автоматизованого керування МРП.

Після завершення ініціалізації АСК переходить до виконання основного циклу програми. У кожному циклі здійснюється опитування датчиків відстані, визначення поточних значень відстаней до об'єктів, перевірка коректності отриманих результатів та їх передача до модуля обробки даних. Для запобігання виникненню випадкових помилок вимірювання кожен датчик опитується декілька разів, після чого результати усереднюються. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити достовірність вимірювань і зменшити вплив випадкових шумів [20-22].

Наступним етапом роботи ПЗ є аналіз отриманої інформації. Якщо відстань до перешкоди перевищує встановлене порогове значення, система підтримує прямолінійний рух МРП. У випадку наближення до перешкоди виконується аналіз інформації від бокових датчиків, після чого обирається найбільш безпечний напрямок обходу. Фрагмент програмного коду реалізації алгоритму аналізу даних ДВ представлено у лістингу 3.2 (повний програмний код наведено у Додатку Б).

Особлива увага приділяється обробці сенсорної інформації. Перед прийняттям рішення виконується перевірка достовірності кожного вимірювання, усереднення отриманих значень та відкидання аномальних результатів. Це дозволяє зменшити вплив випадкових електромагнітних завад, коливань напруги живлення та особливостей роботи УЗ ДВ. У результаті підвищується точність визначення відстані до перешкод та забезпечується більш стабільна робота алгоритму керування [6, 10, 21].

Лістинг 3.2 – Реалізація алгоритму аналізу даних ДВ

```
// Аналіз даних ультразвукових датчиків
int frontDistance;
int leftDistance;
int rightDistance;
void analyzeDistance()
{
    frontDistance = readFrontSensor();
    leftDistance  = readLeftSensor();
    rightDistance = readRightSensor();
    if (frontDistance > 30)
    {
        moveForward();
    }
    else if (leftDistance > rightDistance)
    {
        turnLeft();
    }
    else
    {
        turnRight();
    }
}
```

Модуль керування двигунами забезпечує формування сигналів керування для драйвера L298N. Регулювання швидкості здійснюється шляхом зміни коефіцієнта заповнення сигналів ШІМ, що дозволяє плавно змінювати швидкість руху МРП. Одночасно ПЗ визначає напрямок обертання кожного двигуна, що забезпечує реалізацію руху вперед, назад, поворотів ліворуч і праворуч, а також розвороту на місці. Фрагмент програмного коду програмної реалізації керування двигунами через драйвер L298N представлено у лістингу 3.3 (повний програмний код наведено у Додатку В).

Для забезпечення високої надійності функціонування АСК реалізовано програмні механізми контролю помилок. Якщо один із датчиків не відповідає або повертає недостовірні дані, система автоматично виконує повторне опитування. У разі повторного отримання некоректної інформації активується аварійний режим, який передбачає зупинку МРП та повторну діагностику сенсорної підсистеми. Подібний підхід дозволяє уникнути прийняття неправильних керуючих рішень та значно підвищує безпечність експлуатації АСК [17, 19, 21].

Лістинг 3.3 – Програмна реалізація керування двигунами

```
// Керування двигунами через драйвер L298N
const int ENA = 25;
const int IN1 = 26;
const int IN2 = 27;
void moveForward()
{
    digitalWrite(IN1, HIGH);
    digitalWrite(IN2, LOW);
    analogWrite(ENA, 180);
}
void stopRobot()
{
    digitalWrite(IN1, LOW);
    digitalWrite(IN2, LOW);
    analogWrite(ENA, 0);
}
```

Під час розроблення ПЗ особлива увага приділялася оптимізації використання ресурсів мікроконтролера. Для цього використано циклічний принцип роботи програми без складних вкладених процедур, що забезпечує мінімальний час виконання кожного циклу керування. Завдяки цьому вдалося досягти високої швидкодії системи навіть при одночасному опитуванні декількох датчиків і керуванні виконавчими механізмами.

Використання модульної архітектури також забезпечує можливість подальшого розвитку ПЗ. У майбутньому до системи можуть бути інтегровані додаткові сенсори, модулі бездротового зв'язку, камери технічного зору або алгоритми інтелектуального керування без суттєвої зміни основної структури програми. Це значно підвищує універсальність запропонованого рішення та спрощує його адаптацію до інших типів МРП.

Розроблене ПЗ забезпечує безперервний збір, обробку та аналіз інформації від датчиків відстані, формування керуючих впливів для виконавчих механізмів і контроль технічного стану системи. Реалізовані алгоритми обробки даних, механізми перевірки достовірності вимірювань та аварійного захисту дозволяють підвищити надійність функціонування мобільної роботизованої платформи в реальних умовах експлуатації, що повністю відповідає поставленій меті бакалаврської роботи.

3.3 Реалізація інтерфейсу оператора автоматизованої системи керування

Ефективність функціонування АСК МРП значною мірою залежить не лише від апаратного та ПЗ, а й від зручності взаємодії оператора із системою. Саме інтерфейс оператора забезпечує відображення поточного стану платформи, результатів вимірювань датчиків, режимів роботи та дозволяє здійснювати дистанційне керування основними функціями системи. Використання сучасних програмних засобів побудови інтерфейсів людино-машинної взаємодії (HMI) значно підвищує ефективність експлуатації РС, спрощує процес керування та скорочує час прийняття рішень оператором [4, 8, 25].

Під час розроблення інтерфейсу оператора АСК основна увага приділялася простоті використання, інформативності та можливості швидкого отримання даних про поточний стан МРП. Крім цього, інтерфейс повинен забезпечувати мінімальний час відгуку системи, наочне представлення інформації та можливість подальшого розширення функціональних можливостей без суттєвої зміни програмної структури [10, 21].

Загальну структуру інтерфейсу оператора АСК МРП наведено на рисунку 3.3.

Вона включає інформаційну панель, область відображення показів датчиків, індикатори режимів роботи, кнопки керування платформою та область повідомлень про стан системи. Подібна структура забезпечує зручне розташування елементів керування та дозволяє оператору швидко оцінювати поточний стан РМП.

Головне вікно ПЗ містить інформацію про відстань до перешкод, швидкість руху, напрямок переміщення, стан двигунів та поточний режим функціонування системи. Дані від ДВ оновлюються в режимі реального часу після їх надходження від мікроконтролера ESP32. Завдяки цьому оператор

має можливість безперервно контролювати роботу МРП та своєчасно реагувати на зміни навколишнього середовища [13, 18, 21].

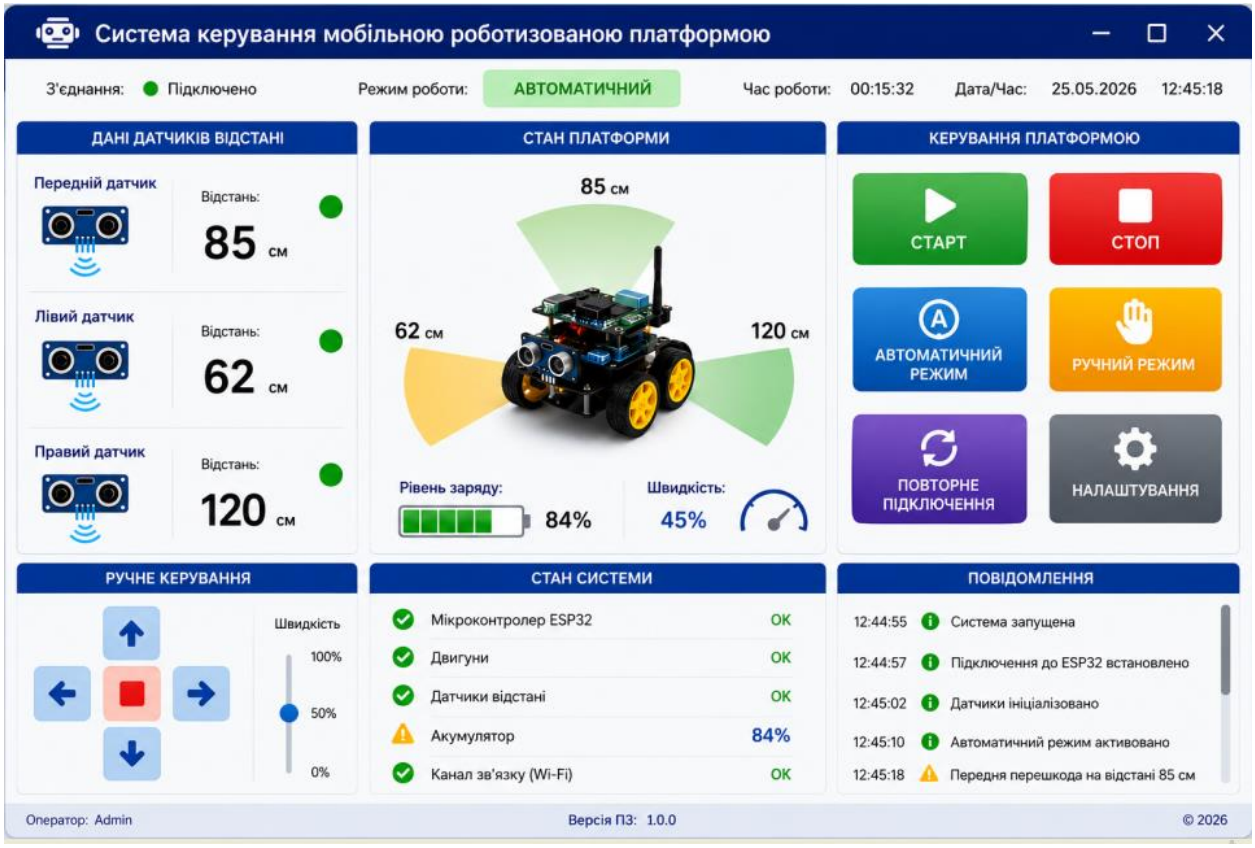


Рисунок 3.3 – Інтерфейс оператора АСК МРП

Для підвищення зручності використання інформація представлена не лише у числовому вигляді, а й за допомогою кольорових індикаторів. Зелений колір відповідає нормальному режиму роботи, жовтий сигналізує про наближення до перешкоди, а червоний використовується для індикації аварійного або небезпечного режиму. Такий спосіб відображення інформації дозволяє оператору швидко оцінювати ситуацію навіть без детального аналізу числових показників.

Функції керування МРП реалізовані за допомогою окремих кнопок інтерфейсу. Оператор може виконувати запуск системи, зупинку руху, переведення платформи в автоматичний або ручний режим, а також ініціювати повторне підключення до мікроконтролера. Крім того, інтерфейс дозволяє переглядати поточний стан датчиків та отримувати повідомлення

про можливі помилки функціонування АСК.

Обмін інформацією між програмою оператора та мікроконтролером здійснюється через послідовний інтерфейс або бездротовий канал зв'язку Wi-Fi. Отримані дані проходять перевірку коректності та після цього відображаються у відповідних елементах графічного інтерфейсу. Такий підхід забезпечує високу швидкість оновлення інформації та мінімізує ймовірність втрати даних під час передачі [13, 18, 20].

Структуру основних елементів інтерфейсу оператора АСК наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні елементи інтерфейсу оператора АСК

Елемент інтерфейсу	Призначення
Поле «Відстань»	відображення даних із датчиків HC-SR04
Індикатор режиму	відображення поточного режиму роботи системи
Кнопка «Старт»	запуск МРП
Кнопка «Стоп»	аварійна зупинка МРП
Кнопка «Автоматичний режим»	перехід до автономного керування
Кнопка «Ручний режим»	перехід до ручного керування
Поле повідомлень	відображення інформаційних та аварійних повідомлень

Для створення інтерфейсу оператора АСК використано середовище розроблення з підтримкою графічних компонентів, що дозволяє легко реалізувати кнопки керування, інформаційні поля та елементи індикації. Фрагмент програмного коду реалізації створення елементів інтерфейсу оператора представлено у лістингу 3.4 (повний програмний код наведено у Додатку Г).

Лістинг 3.4 – Створення елементів інтерфейсу оператора АСК

```
// Створення елементів інтерфейсу оператора
createLabel("Відстань до перешкоди");
createValueField(distanceValue);
createButton("СТАРТ", startRobot);
createButton("СТОП", stopRobot);
createButton("Автоматичний режим", autoMode);
createButton("Ручний режим", manualMode);
createStatusIndicator(systemStatus);
```

У наведеному фрагменті програмного коду показано принцип створення основних елементів графічного інтерфейсу оператора. Реалізовано інформаційне поле для відображення відстані до перешкод, кнопки запуску та зупинки МРП, вибору режиму роботи й індикатор поточного стану системи. У повній програмній реалізації ці елементи пов'язані з відповідними функціями керування та обробки даних, що забезпечує інтерактивну взаємодію оператора із АСК.

Використання графічного інтерфейсу значно підвищує зручність експлуатації МРП, забезпечує швидкий доступ до інформації про її технічний стан та спрощує процес керування. Реалізований інтерфейс дозволяє своєчасно виявляти можливі несправності, контролювати результати вимірювань ДВ та оперативно реагувати на зміну умов навколишнього середовища. Завдяки модульній побудові ПЗ інтерфейс може бути легко модернізований шляхом додавання нових інформаційних панелей, засобів візуалізації або функцій дистанційного керування, що робить запропоновану систему перспективною для подальшого розвитку [21, 22, 26].

3.4 Тестування функціонування автоматизованої системи керування

3.4.1 Методіка проведення випробувань

Завершальним етапом розроблення АСК МРП є проведення її тестування. Основною метою тестування є перевірка працездатності апаратної та програмної частин, оцінювання правильності функціонування алгоритму керування, визначення швидкодії системи та підтвердження її

надійності в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації [7, 25].

Під час випробувань перевірялася взаємодія всіх складових системи: мікроконтролера ESP32, ультразвукових ДВ HC-SR04, драйвера двигунів L298N, виконавчих механізмів та ПЗ. Особлива увага приділялася коректності передавання даних між окремими модулями, швидкості обробки інформації та своєчасності формування керуючих команд [10, 13, 18].

Перед початком тестування було виконано перевірку правильності підключення всіх апаратних компонентів, стабільності живлення та працездатності ПЗ. Після завершення підготовчого етапу система переводилася в автоматичний режим роботи, де виконувалося багаторазове проходження тестових маршрутів із різним розташуванням перешкод.

Загальну схему проведення випробувань АСК МРП наведено на рисунку 3.4.

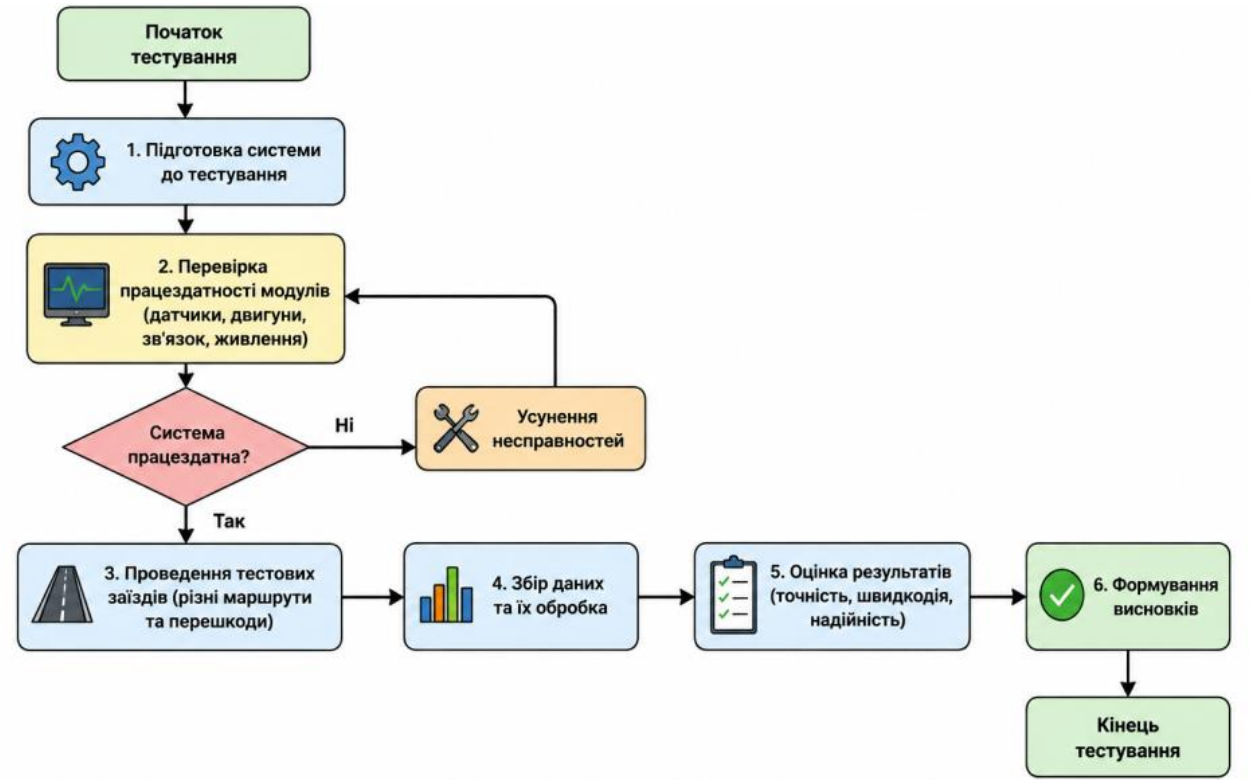


Рисунок 3.4 – Схема проведення тестування АСК МРП

Програма випробувань передбачала декілька режимів роботи. На першому етапі перевірялася працездатність кожного УЗ ДВ окремо. Наступним етапом стало тестування одночасної роботи всіх датчиків, що дозволило оцінити коректність обробки інформації та відсутність взаємного впливу між ними. Після цього перевірялася робота алгоритму автоматичного обходу перешкод, який реалізує зміну напрямку руху МРП відповідно до результатів аналізу даних датчиків [16, 18].

Окремим етапом дослідження стало тестування виконавчої системи. Під час випробувань оцінювалася правильність керування двигунами при русі вперед, виконанні поворотів, зміні швидкості та аварійній зупинці. Також перевірялася стійкість роботи драйвера L298N при тривалому навантаженні та безперервній роботі АСК [17].

Для оцінювання ефективності роботи АСК використовувалися такі показники:

– точність визначення відстані до перешкод;

– середній час реакції системи;

– кількість успішно виконаних маневрів обходу;

– кількість помилкових спрацьовувань;

– безвідмовність функціонування під час тривалих випробувань.

3.4.2 Розрахунок точності визначення відстані до перешкод

Одним із показників ефективності АСК МРП є точність визначення відстані до перешкод. Від цього параметра безпосередньо залежить своєчасність прийняття рішення щодо зміни траєкторії руху, виконання маневру обходу або аварійної зупинки платформи. Для визначення точності роботи АСК було проведено експериментальне порівняння фактичної відстані до перешкоди з результатами вимірювання, отриманими ультразвуковим датчиком HC-SR04 [16, 18].

Під час випробувань перешкода встановлювалася на відомих відстанях від мобільної роботизованої платформи. Для кожної точки виконувалося

декілька вимірювань, після чого визначалося середнє значення отриманих результатів. Результати експерименту наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати визначення точності вимірювання відстані

Фактична відстань, см	Виміряна відстань, см	Абсолютна похибка, см	Відносна похибка, %
30	29,8	0,2	0,67
50	49,7	0,3	0,60
100	99,4	0,6	0,60
150	149,0	1,0	0,67
200	198,8	1,2	0,60

Абсолютна похибка вимірювання (ΔD) визначається як модуль різниці між фактичною та виміряною відстанями:

$$\Delta D = \left| D_{факт} - D_{вим} \right|, \tag{3.1}$$

де $D_{факт}$ – абсолютна похибка вимірювання, см;

$D_{вим}$ – відстань, визначена датчиком, см.

Виконаємо розрахунок при фактичній відстані $D_{факт}$=50 см:

$$\Delta D = \left| 50 - 49{,}7 \right| = 0{,}3 \text{ см}$$

Для більш об'єктивної оцінки використовується відносна похибка вимірювання (δ):

$$\delta = \frac{\Delta D}{D_{факт}} \cdot 100\%, . \tag{3.2}$$

Підставимо отримані значення:

$$\delta = \frac{0,3}{50} \cdot 100\% = 0,6\,\%.$$

Отриманий результат свідчить про те, що похибка вимірювання не перевищує 0,6 %, що є цілком достатнім для реалізації алгоритмів автоматичного керування МРП.

Для оцінювання загальної точності роботи сенсорної підсистеми визначимо середню абсолютну похибку ($\overline{\Delta D}$) за результатами всіх проведених вимірювань:

$$\overline{\Delta D} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta D_i}{n}, \tag{3.3}$$

де $\overline{\Delta D}$ – абсолютна похибка окремого вимірювання, см;

n – кількість проведених вимірювань.

Після підстановки експериментальних значень у вираз (3.3) маємо:

$$\overline{\Delta D} = \frac{0,2 + 0,3 + 0,6 + 1,0 + 1,25}{5} = \frac{3,3}{5} = 0,66 \text{ см}.$$

Отже, середня абсолютна похибка визначення відстані становить 0,66 см, що підтверджує високу точність роботи ультразвукового ДВ HC-SR04.

Отримані результати свідчать, що навіть зі збільшенням відстані до перешкоди похибка вимірювання залишається незначною і не впливає істотно на роботу алгоритму автоматизованого керування. Реалізовані програмні методи усереднення вимірювань та перевірки достовірності отриманих даних дозволили мінімізувати вплив випадкових завад і забезпечити стабільне визначення відстані в реальних умовах експлуатації.

Це підтверджує можливість використання ДВ у складі АСК МРП та забезпечує рівень надійності функціонування системи [16, 18, 25].

3.4.3 Розрахунок середнього часу реакції автоматизованої системи

Параметр середнього часу реакції на появу перешкоди характеризує проміжок часу від моменту отримання сигналу від ДВ до формування керуючої команди для зміни режиму руху МРП.

Середній час реакції ($t_{сер}$)на появу перешкоди визначається за формулою:

$$t_{сер} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n}, \tag{3.4}$$

де t_i – час реакції системи під час iii-го вимірювання, с;

n – кількість проведених вимірювань.

Під час тестування було виконано п'ять незалежних вимірювань часу реакції АСК МРП.

Результати вимірювань часу реакції АСК наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати вимірювання часу реакції АСК

№ вимірювання	Час реакції, с
1	0,11
2	0,13
3	0,12
4	0,12
5	0,12

Підставимо отримані значення у формулу (3.4):

$$t_{сер} = \frac{0{,}11 + 0{,}13 + 0{,}12 + 0{,}12 + 0{,}12}{5} = \frac{0{,}6}{5} = 0{,}12 \text{ с.}$$

Отриманий результат свідчить про достатньо високу швидкодію розробленої АСК. Час реакції 0,12 с забезпечує своєчасне виявлення перешкод, оперативне формування керуючих команд та безпечне керування МРП в реальних умовах експлуатації. Отримане значення відповідає сучасним вимогам до РС та підтверджує ефективність використаних апаратних і програмних засобів [13, 16, 18, 25].

3.4.4 Розрахунок коефіцієнту успішно виконаних маневрів

Для оцінювання ефективності функціонування АСК визначався коефіцієнт успішного виконання маневрів ($K_{усп}$), який характеризує відношення кількості успішних проходжень маршруту до загальної кількості проведених випробувань:

$$K_{усп} = \frac{N_{усп}}{N_{заг}} \cdot 100\%, \tag{3.5}$$

де $N_{усп}$ – кількість успішно отриманих повідомлень;

$N_{заг}$ – загальна кількість переданих повідомлень.

Під час проведення тестування було 100 тестових проходжень, із яких 97 завершилися без зіткнень із перешкодами. Таким чином коефіцієнт успішного проходження повідомлень становить:

$$K_{усп} = \frac{97}{100} \cdot 100\% = 97\%.$$

Отримане значення $K_{усп}$ підтверджує, що АСК у переважній більшості випадків правильно розпізнає наявність перешкод і формує відповідні керуючі команди.

Причинами окремих помилкових спрацьовувань можуть бути випадкові електромагнітні завади, нестабільність відбитого ультразвукового сигналу, особливості форми поверхні перешкод, а також короткочасні зміни положення мобільної платформи під час руху. Для мінімізації таких випадків у ПЗ реалізовано алгоритми повторного опитування датчиків, усереднення результатів вимірювання та перевірки достовірності отриманої інформації перед формуванням керуючої команди [10,13, 21].

Проведені розрахунки показують, що частка помилкових спрацьовувань є незначною і не впливає істотно на ефективність функціонування АСК. Отримані результати підтверджують правильність вибору апаратних компонентів, ефективність алгоритмів обробки даних і високу надійність розробленої системи. Застосовані методи програмної фільтрації та перевірки вимірювань забезпечують стабільну роботу МРП в умовах наявності зовнішніх завад і змін навколишнього середовища [25, 26].

3.4.5 Розрахунок безвідмовності функціонування автоматизованої системи

Безвідмовність функціонування АСК під час тривалих випробувань є одним із ключових показників її надійності. Вона характеризує здатність системи виконувати задані функції протягом визначеного часу без відмов апаратних компонентів, збоїв ПЗ та втрати працездатності основних модулів. Для МРП цей показник є особливо важливим, оскільки від нього залежить стабільність руху, своєчасне реагування на перешкоди та безпечність експлуатації в реальних умовах [7, 24].

Під час тривалих випробувань АСК працювала безперервно протягом 3 год, результати яких наведено у табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати випробувань оцінювання безвідмовності

Показник	Значення
Тривалість випробувань	3 год
Загальна кількість контрольних інтервалів	60
Тривалість одного контрольного інтервалу	3 хв
Кількість інтервалів без відмов	59
Кількість зафіксованих збоїв	1

У процесі тестування перевірялася робота мікроконтролера ESP32, ультразвукових ДВ HC-SR04, драйвера двигунів L298N, виконавчих механізмів, системи живлення та ПЗ. За період випробувань було зафіксовано 1 короткочасний збій, який не призвів до повної втрати працездатності системи, оскільки ПЗ виконало повторне опитування датчиків і відновило нормальний режим роботи [13, 16, 21].

Для кількісного оцінювання роботи АСК визначимо коефіцієнт безвідмовного функціонування системи ($K_б$):

$$K_б = \frac{N_б}{N_{заг}} \cdot 100\%, \tag{3.6}$$

де $N_б$ – кількість контрольних інтервалів, протягом яких система працювала без відмов;

$N_{заг}$ – загальна кількість контрольних інтервалів.

Підставимо експериментальні значення у вираз (3.6):

$$K_{усп} = \frac{59}{60} \cdot 100\% = 98{,}3\% .$$

Отже, коефіцієнт безвідмовного функціонування АСК МРП становить 98,3 %.

Додатково визначимо коефіцієнт відмов ($K_{відм}$) під час тривалих випробувань системи:

$$K_{відм} = \frac{N_{відм}}{N_{заг}} \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

де $N_{відм}$ – кількість інтервалів, у яких було зафіксовано збій;

$N_{заг}$ – загальна кількість контрольних інтервалів.

Після підстановки значень у (3.7) отримаємо:

$$K_{відм} = \frac{1}{60} \cdot 100\% = 1{,}7\%.$$

Таким чином, частка збоїв під час тривалих випробувань становить 1,7 %, що є прийнятним результатом для експериментального зразка МРП.

Також визначили середній час безвідмовної роботи системи ($T_{ср}$) за результатами випробувань. Якщо протягом 3 годин було зафіксовано 1 збій, то середній час між збоями становить:

$$T_{ср} = \frac{T_{заг}}{N_{відм}}, \quad (3.8)$$

де $T_{заг}$ – загальна тривалість випробувань, год;

$N_{відм}$ – кількість зафіксованих збоїв.

Підставимо експериментальні значення в формулу (3.8):

$$T_{ср} = \frac{3}{1} = 3 \text{ год.} \quad (3.6)$$

Отримане значення показує, що середній час між зафіксованими збоями становить близько 3 годин. При цьому слід зазначити, що виявлений збій не був критичним і не призвів до аварійної ситуації або повної зупинки МРП.

Проведені розрахунки підтверджують достатній рівень безвідмовності функціонування розробленої АСК. Використання стабілізованого живлення, модульної структури ПЗ, повторного опитування датчиків і механізмів аварійного захисту дозволило забезпечити стабільну роботу МРП під час тривалих випробувань. Отриманий коефіцієнт безвідмовності 98,3 % свідчить про те, що розроблена АСК є придатною для використання в реальних умовах експлуатації та відповідає меті роботи щодо підвищення надійності функціонування МРП.

3.4.6 Аналіз результатів проведених випробувань

За результатами проведених випробувань встановлено, що розроблена АСК МРП забезпечує стабільне функціонування всіх апаратних і програмних модулів у реальних умовах експлуатації. Проведені експериментальні дослідження підтвердили правильність реалізованих алгоритмів збору, обробки та аналізу інформації від ультразвукових датчиків відстані, а також ефективність алгоритму автоматичного керування рухом платформи. Отримані результати свідчать про відповідність розробленої системи поставленій меті роботи щодо підвищення надійності функціонування МРП.

Під час випробувань оцінювалися основні технічні характеристики системи, серед яких точність визначення відстані до перешкод, швидкодія, ефективність обходу перешкод, кількість помилкових спрацьовувань та безвідмовність роботи. Аналіз отриманих результатів показав, що всі досліджувані показники перебувають у межах допустимих значень і забезпечують стабільне функціонування МРП.

Основні результати проведених випробувань наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Узагальнені результати випробувань АСК

Показник	Позначення	Отримане значення	Оцінка результату
Середня абсолютна похибка вимірювання	$\overline{\Delta D}$	0,66 см	Висока точність
Відносна похибка вимірювання	δ	0,6 %	Відповідає вимогам
Середній час реакції системи	$t_{сер}$	0,12 с	Висока швидкодія
Коефіцієнт успішного виконання маневрів	$K_{усп}$	97 %	Висока ефективність
Частка помилкових спрацьовувань	$K_{пом}$	3 %	Низький рівень помилок
Коефіцієнт безвідмовної роботи	$K_{б}$	98,3 %	Висока надійність
Середній час безвідмовної роботи	$T_{ср}$	3 год	Стабільна робота

Наведені результати свідчать, що використання ультразвукових ДВ HC-SR04 забезпечує достатню точність вимірювання відстані до перешкод. Середня абсолютна похибка становить лише 0,66 см, а відносна похибка не перевищує 0,6 %, що є достатнім для реалізації алгоритмів автоматичного керування МРП [16, 18].

Дослідження швидкодії системи показало, що середній час реакції становить 0,12 с, завдяки чому МРП своєчасно виявляє перешкоди та оперативно формує керуючі команди. Такий показник забезпечує безпечний рух платформи навіть за умови зміни навколишнього середовища в режимі реального часу [13, 21].

Ефективність алгоритму керування підтверджується коефіцієнтом успішного виконання маневрів, який дорівнює 97 %. Це означає, що майже

всі тестові проходження були виконані без зіткнення з перешкодами. Зафіксовані окремі помилкові спрацьовування (3 %) не призвели до аварійних ситуацій і були компенсовані алгоритмами повторного опитування датчиків та перевірки достовірності вимірювань.

Особливу увагу було приділено оцінюванню надійності функціонування системи під час тривалих випробувань. Коефіцієнт безвідмовної роботи становив 98,3 %, що підтверджує ефективність застосованих технічних і програмних рішень. Навіть у разі виникнення короткочасних збоїв АСК автоматично переходила до процедури повторної перевірки стану датчиків, після чого відновлювала нормальний режим роботи без втрати керованості МРП [18, 21, 24].

Загалом результати експериментальних досліджень підтвердили, що розроблена АСК відповідає сучасним вимогам до МРП. Реалізовані алгоритми обробки інформації, модульна структура ПЗ та використання сучасної мікроконтролерної платформи ESP32 забезпечили високу швидкодію, точність вимірювань, надійність функціонування та можливість подальшого розширення функціональних можливостей системи.

3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи реалізовано АСК МРП, що включає апаратну частину, ПЗ, інтерфейс оператора та комплекс експериментальних досліджень. Виконано обґрунтований вибір апаратних компонентів, до складу яких увійшли мікроконтролер ESP32, ультразвукові ДВ HC-SR04, драйвер двигунів L298N, двигуни постійного струму та система автономного живлення, що забезпечили необхідний рівень функціональності, швидкодії та надійності роботи системи.

Розроблено ПЗ АСК, яке реалізує ініціалізацію апаратних ресурсів, опитування та обробку даних датчиків, аналіз навколишнього середовища, формування керуючих команд для виконавчих механізмів, контроль

технічного стану системи та аварійний захист. Використання модульної структури ПЗ спростило процес налагодження, тестування та подальшої модернізації системи.

Створено сучасний графічний інтерфейс оператора, який забезпечує відображення поточного стану МРП, результатів вимірювання датчиків, параметрів руху, режимів роботи та повідомлень про стан системи. Реалізований інтерфейс дозволяє здійснювати дистанційне керування платформою, швидко оцінювати її технічний стан і своєчасно реагувати на зміну умов експлуатації.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили працездатність та ефективність розробленої АСК. У процесі тестування визначено, що середня абсолютна похибка вимірювання відстані становить 0,66 см, середній час реакції системи дорівнює 0,12 с, коефіцієнт успішного виконання маневрів становить 97 %, а коефіцієнт безвідмовного функціонування досягає 98,3 %. Отримані результати свідчать про високу точність роботи сенсорної підсистеми, достатню швидкодію ПЗ та надійність функціонування АСК в умовах, наближених до реальної експлуатації.

Таким чином, поставлені завдання третього розділу повністю виконано. Реалізована АСК МРП забезпечує ефективне виявлення перешкод, своєчасне прийняття керуючих рішень, стабільне функціонування всіх програмно-апаратних модулів та може бути рекомендована для подальшого вдосконалення і практичного використання в наземних робототехнічних комплексах.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці на робочому місці

В приміщенні лабораторіі на робочому місці оператора ПК згідно виникають небезпечні та шкідливі фактори: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітленості, шкідливі речовини, підвищений рівень електромагнітних випромінювань радіочастот, висока напруга електричної мережі, статична електрика та інші. Робота з ПК супроводжується також підвищеним ступенем напруженості трудового процесу. При систематичному впливі виробничих факторів, які не відповідають нормативним показникам, зростає рівень професійно зумовленої захворюваності працюючих та можуть виникнути професійні захворювання органів зору, руху, нервової системи. Таким чином, вивчення умов праці на робочому місці оператора ПК є необхідною умовою запобігання негативних наслідків впливу небезпечних та шкідливих факторів.

На рис 4.1 зображено приміщення лабораторіі, де виконувалась кваліфікаційна робота з розроблення АСК МРП.



Рисунок 4.1 – Приміщення лабораторії

Організація робочого місця. Приміщення лабораторії, в якому знаходиться робоче місце оператора ПК, загальною площею 48 м^2, і висотою стелі 3,5 м. У приміщенні знаходиться 6 робочих місць з ПК. Кожне робоче місце обладнане робочім столом, стільцем та ПК, що складається з монітора, системного блоку, клавіатури та миші.

4.2 Промислова безпека на робочому місці

Живлення ПК здійснюється від трифазної чьотирьох електричної мережі змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою 220 В, частотою 50 Гц. Згідно НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення можна віднести до категорії без підвищеної небезпеки, так як в приміщенні відсутні чинники, які викликають підвищену або особливу небезпеку [29].

Для створення безпечних умов праці необхідно провести ряд організаційних і технічних заходів. Згідно НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом в приміщенні застосовується система занулення [29].

4.3 Виробнича санітарія у приміщенні

Робота оператора ПК за енерговитратами відноситься до категорії легких робіт. В табл. 4.1 наведені оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях, де виконуються роботи операторського типу [29].

Виміряні за допомогою приладів температура та вологість у лабораторії відповідають вказаним у таблиці для теплого періоду року. Слід зазначити, що для нормалізації параметрів мікроклімату слід використовувати у приміщеннях кондиціювання повітря, або забезпечити подачу свіжого повітря системами вентиляції.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату для приміщень з ПК

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	22 – 24 °С; 40 – 60 %; до 0,1 м/с
Теплий	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	23 – 25 °С; 40 – 60 %; 0,1 – 0,2 м/с

Лабораторія, де виконується розробка конструкції модуля, має наступні характеристики:

– площа приміщення 48 м^2 (8 м × 6 м);

– висота 3,5 м;

– кількість робочих місць – 6 шт.;

– обладнання – стіл з ПК і периферією – 6 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, має забезпечувати 6 м^2 площі та 20 м^3 обсягу на одне окреме робоче місце з ПК [29]. Площа приміщення 48 м^2 та об’єм 168 м^3, на кожне робоче місце приходится 8 м^2 площі і об’єм 28 м^3, тобто вимога виконана.

Приміщення з ПК повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості не нижче 1,5 % [29].

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, викладеної в [29].

Розрахункова формула методу:

$$W = \frac{W_{\sum}}{S}, \tag{4.1}$$

де W – питома потужність, Вт/м^2;

S – площа приміщення, м^2;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W_{\sum} = W_{св} \cdot n_{св}, \tag{4.2}$$

де $W_{св}$ – потужність одного світильника, Вт;

$n_{св}$ – кількість світильників в приміщенні.

$$W_{\sum} = 100 \cdot 4 = 400 \text{ Вт}, \tag{4.3}$$

$$W = \frac{400}{48} = 8{,}33 \text{ Вт/м}^2. \tag{4.4}$$

Питомої потужності 8,33 Вт/м^2 по таблиці Б.3 із [29] відповідає освітленість в 250 лк при мінімальній допустимої освітленості 300 лк.

Отже, для створення сприятливих зорових умов в лабораторії необхідно збільшити кількість світильників або замінити лампи в світильниках на більш потужні.

4.4 Пожежна безпека приміщення

Пожежна безпека – стан об'єкта, при якім виключається можливість пожежі, а у випадку його виникнення запобігає вплив на людей небезпечних факторів пожежі й забезпечується захист матеріальних цінностей.

Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі й системою пожежного захисту. У всіх службових приміщеннях обов'язково повинен бути «План евакуації людей при пожежі», що регламентує дії персоналу у випадку виникнення вогнища загоряння, що й указує місця

розташування пожежної техніки [29].

Горючими компонентами у приміщенні лабораторії є: перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів і ін.

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження його поширення, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі [29].

Джерелами запалювання у виробничому приміщені можуть бути електронні схеми від ПК, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрою електроживлення, кондиціювання повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри й дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

У сучасних ПК дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості друг від друга розташовуються сполучні проведення, кабелі. При протіканні по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відводу надлишкової теплоти від ПК служать системи вентиляції й кондиціювання повітря. При постійній дії ці системи являють собою додаткову пожежну небезпеку.

Енергопостачання виробничого приміщення здійснюється за допомогою трансформаторної станції та за допомогою двигун-генераторних агрегатів. На трансформаторних підстанціях особливу небезпеку представляють трансформатори які мають масляне охолодження. У зв'язку із цим перевагу слід віддавати сухим трансформаторам [29].

4.5 Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз умов праці в лабораторному приміщенні, де здійснюється розроблення та дослідження АСК МРП. Встановлено, що під час роботи оператора ПК

можуть виникати небезпечні та шкідливі виробничі фактори, серед яких підвищений рівень шуму, електромагнітні випромінювання, несприятливі параметри мікроклімату, недостатній рівень освітленості та підвищена напруженість праці.

Проаналізовано вимоги промислової безпеки та визначено, що досліджуване приміщення належить до категорії приміщень без підвищеної небезпеки. Для забезпечення електробезпеки передбачено застосування системи занулення, що дозволяє знизити ризик ураження електричним струмом персоналу.

Виконано оцінювання параметрів виробничої санітарії та встановлено, що площа й об’єм приміщення відповідають нормативним вимогам щодо організації робочих місць з персональними комп’ютерами. Проведений розрахунок штучного освітлення показав, що фактичний рівень освітленості є нижчим за нормативне значення, у зв’язку з чим рекомендовано збільшити кількість світильників або використати джерела світла більшої потужності для покращення зорових умов праці.

Також розглянуто питання пожежної безпеки приміщення, визначено потенційні джерела займання та запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на запобігання виникненню пожеж і забезпечення безпечної евакуації персоналу.

Отже, виконаний аналіз показав, що за умови реалізації запропонованих заходів з охорони праці, виробничої санітарії, електро- та пожежної безпеки в лабораторному приміщенні можуть бути забезпечені безпечні та комфортні умови праці, які відповідають чинним нормативним вимогам.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота виконана відповідно до поставленої мети та передбачала комплексний аналіз предметної області, проєктування апаратної та програмної частин системи, практичну реалізацію розроблених рішень і експериментальне підтвердження їх ефективності.

Проведено аналіз особливостей МРП як об'єктів автоматичного керування, досліджено принципи роботи та характеристики сучасних ДВ, розглянуто основні методи керування рухом і виконано порівняльний аналіз існуючих АСК. На підставі проведеного аналізу сформульовано постановку задачі та визначено основні вимоги до автоматизованої системи керування, орієнтованої на забезпечення високої надійності роботи МРП.

Розроблено структуру АСК МРП, обґрунтовано вибір апаратних компонентів та запропоновано архітектуру програмно-апаратного комплексу. Розроблена система побудована на базі мікроконтролера ESP32, ультразвукових датчиків HC-SR04, драйвера двигунів L298N та виконавчих механізмів постійного струму. Запропонована структура забезпечує модульність, можливість подальшого розширення функціональних можливостей, високу швидкодію та ефективну взаємодію між усіма елементами системи.

Виконано практичну реалізацію АСК, розроблено ПЗ для опитування ДВ, обробки інформації, прийняття рішень та керування рухом МРП. Створено графічний інтерфейс оператора, який забезпечує відображення стану системи, результатів вимірювання датчиків, параметрів руху та режимів роботи, а також реалізує дистанційне керування платформою.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили працездатність розробленої системи та її відповідність поставленим вимогам. У процесі тестування визначено основні експлуатаційні характеристики АСК. Середня абсолютна похибка вимірювання відстані становила 0,66 см, середній час

реакції системи – 0,12 с, коефіцієнт успішного виконання маневрів досяг 97 %, а коефіцієнт безвідмовного функціонування під час тривалих випробувань склав 98,3 %. Отримані результати підтверджують високу точність роботи сенсорної підсистеми, ефективність алгоритмів керування та стабільність функціонування АСК в умовах, наближених до реальної експлуатації.

Розглянуто питання охорони праці в приміщенні лабораторії де виконувалась кваліфікаційна робота з розроблення АСК МРП. Проаналізовано умови праці оператора ПК, визначено потенційні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, а також запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечної роботи в приміщенні лабораторії.

Практичне значення роботи полягає у створенні АСК, яка може бути використана як навчально-дослідний зразок, а також як основа для побудови МРП різного призначення. Запропоновані технічні рішення можуть бути адаптовані для використання у складській логістиці, моніторингових системах, аграрному секторі, рятувальних комплексах та інших галузях, де необхідне автономне переміщення МРП.

Таким чином, поставлена у кваліфікаційній роботі мета досягнута повністю, а всі визначені завдання виконані. Розроблена АСК МРП забезпечує високу точність визначення відстані до перешкод, швидке формування керуючих впливів, надійне функціонування програмно-апаратного комплексу та ефективне реагування на зміну умов навколишнього середовища. Отримані результати підтверджують доцільність використання ДВ у поєднанні з сучасними алгоритмами обробки даних для підвищення надійності функціонування МРП.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. Київ. Держстандарт України, 2017. 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків: ХНУРЕ, 2023. 64 с.

3. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. 151 с.

4. Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics. 2nd ed. Cham: Springer, 2016. 2304 p.

5. Craig J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 4th ed. Boston: Pearson, 2018. 408 p.

6. Corke P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB. 2nd ed. Cham: Springer, 2017. 693 p.

7. Siegwart R., Nourbakhsh I., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2011. 476 p.

8. Bolton W. Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering. 7th ed. Harlow: Pearson Education, 2021. 688 p.