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 утримання рівноваги під час руху мобільною роботизованою платформою для пошуково-рятувальних робіт
(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,

групи АКТСІ-22-1

Артем ТУРОВ
(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, Туров Артем Вячеславович, 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.

«29» червня 2026 р. _____ Артем ТУРОВ

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 Турову Артему Вячеславовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматизації утримання рівноваги під час руху мобільною роботизованою платформою для пошуково-рятувальних робіт
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 Система автоматизації утримання рівноваги мобільної роботизованої платформи; 3.2 Технічні характеристики мобільних роботизованих платформ; 3.3 Параметри сенсорних систем; 3.4 Алгоритми автоматичного керування та стабілізації; 3.5 Характеристики мікроконтролера STM32.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі 4.1 Аналіз умов застосування мобільних платформ;
4.2 Основні фактори, що впливають на втрату рівноваги;
4.3 Огляд існуючих методів і засобів забезпечення стабільності руху
4.4 Вимоги до системи з урахуванням умов експлуатації платформи;
4.5 Структурна схема автоматизованої системи;
4.6 Алгоритм функціонування системи на основі обробки даних сенсорів;
4.7 Розроблення програмного забезпечення системи автоматизації;
4.8 Експериментальні дослідження роботи системи автоматизації;
4.9 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 презентації 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	Проектування системи автоматизації		
	утримання рівноваги	09.05.26 – 29.05.26	виконано
3	Реалізація та дослідження ефективності		
	системи автоматизації утримання		
	рівноваги	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 2026р.

Здобувач _____ Артем ТУРОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 80 с., 16 табл., 16 рис., 4 дод., 29 джерел.

МОБІЛЬНА РОБОТИЗОВАНА ПЛАТФОРМА, СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ, ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНІ РОБОТИ, УТРИМАННЯ РІВНОВАГИ, СТАБІЛІЗАЦІЯ РУХУ, СЕНСОРИ, АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ.

Мета роботи – підвищення стійкості та надійності руху мобільної роботизованої платформи шляхом розроблення системи автоматизації утримання рівноваги в умовах нерівної поверхні та дії зовнішніх збурень.

Об’єкт розробки – процес руху мобільної роботизованої платформи в умовах дії зовнішніх збурень.

Предмет розробки – система автоматизації утримання рівноваги мобільної роботизованої платформи.

У кваліфікаційної роботі проведено аналіз умов експлуатації та існуючих методів стабілізації руху мобільної роботизованої платформи. Запропоновано структуру системи автоматизації, обґрунтовано вибір сенсорів і апаратної платформи, а також розроблено алгоритм керування. Реалізовано програмне забезпечення та проведено експериментальне дослідження роботи системи автоматизації. Отримані результати підтверджують підвищення стійкості мобільної роботизованої платформи в умовах дії зовнішніх збурень.

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

ABSTRACT

Explanatory note: 80 pp., 16 tab., 16 figs., 4 appendices, 29 sources.

MOBILE ROBOTIC PLATFORM, AUTOMATED SYSTEM, SEARCH-AND-RESCUE ROBOTS, BALANCE MAINTENANCE, MOTION STABILIZATION, SENSORS, CONTROL ALGORITHM.

The objective of this work is to improve the stability and reliability of a mobile robotic platform by developing an automated balance maintenance system capable of operating on uneven surfaces and under the influence of external disturbances.

The object of development is the motion process of a mobile robotic platform under the influence of external disturbances.

The subject of development is an automated balance maintenance system for a mobile robotic platform.

This thesis analyzes the operating conditions and existing methods for stabilizing the motion of a mobile robotic platform. The structure of the automated system is proposed, the selection of sensors and the hardware platform is justified, and a control algorithm is developed. The software is implemented, and an experimental study of the automated system’s operation is conducted. The results confirm an increase in the stability of the mobile robotic platform under the influence of external disturbances.

The results of the work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 “Industry, Innovation and Infrastructure,” in particular to paragraph 9.4 “Development of high-tech engineering”.

ЗМІСТ

Перелік скорочень …… 7
Вступ ……..… 8
1 Аналіз предметної області та постановка задачі …… 10
1.1 Особливості застосування мобільних роботизованих платформ у пошуково-рятувальних роботах …..……..……..... 10
1.2 Класифікація мобільних роботизованих платформ ……... 12
1.3 Проблема втрати рівноваги та її вплив на ефективність роботи платформи ……..…….…… 14
1.4 Огляд існуючих систем автоматизації стабілізації платформ .……..... 17
1.5 Постановка задачі щодо розробки системи автоматизації …….…. 20
1.6 Висновки до першого розділу ……. 22
2 Проектування системи автоматизації утримання рівноваги ……. 24
2.1 Структурна схема системи автоматизації утримання рівноваги …….. 24
2.2 Вибір та обґрунтування сенсорів …….…….. 27
2.3 Вибір апаратної платформи керування …….…….. 30
2.4 Розроблення алгоритму утримання рівноваги …….…….. 33
2.5 Структура програмного забезпечення системи автоматизації утримання рівноваги …….…… 37
2.6 Висновки до другого розділу ……..…….……... 40
3 Реалізація та дослідження ефективності системи автоматизації утримання рівноваги …….…….…….. 42
3.1 Опис реалізації системи автоматизації утримання рівноваги ……. 42
3.2 Реалізація алгоритму керування системи автоматизації утримання рівноваги ……..… 46
3.3 Розроблення програмного забезпечення системи автоматизації утримання рівноваги ……...… 49
3.4 Інтерфейс оператора системи автоматизації утримання рівноваги. 53

3.5 Тестування системи автоматизації утримання рівноваги …… 56
3.6 Оцінка ефективності та аналіз результатів роботи системи автоматизації утримання рівноваги …… 62
3.7 Висновки до третього розділу ……..……..……... 68
4 Охорона праці ……..…… 70
4.1 Аналіз умов праці у навчальної лабораторії ……..…… 70
4.2 Промислова безпека навчальної лабораторії ……..…… 71
4.3 Виробнича санітарія і гігієна праці і ……..……. 71
4.4 Пожежна безпека навчальної лабораторії ……..…….. 73
4.5 Висновки до четвертого розділу ……. 74
Висновки …… 76
Перелік джерел посилання ……... 78
Додаток А Програмний код ініціалізації та опитування сенсорного модуля MPU6050 ……..…… 81
Додаток Б Програмний код реалізації алгоритму ПІД-регулювання ……. 85
Додаток В Програмний код керування електроприводами ……. 87
Додаток Г Програмний код інтерфейсу моніторингу ……..… 91
Додаток Д Демонстраційний матеріал …… 93

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСУР – система автоматизації утримання рівноваги;

МРП – мобільна роботизована платформа;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференційний;

ПК – персональни комп'ютер;

ПРР – пошуково-рятувальні роботи;

РС – роботизована система.

ВСТУП

Сучасний розвиток робототехніки та систем автоматизації відкриває нові можливості для застосування мобільних роботизованих платформ (МРП) у складних і небезпечних умовах, зокрема під час проведення пошуково-рятувальних робіт (ПРР). У ситуаціях техногенних катастроф, руйнування будівель, природних лих або бойових дій використання роботизованих систем дозволяє значно знизити ризики для життя людини та підвищити ефективність виконання завдань.

Однією з ключових проблем функціонування МРП у таких умовах є забезпечення їхньої стійкості та здатності утримувати рівновагу під час руху по нерівній, нестабільній або частково зруйнованій поверхні. Порушення рівноваги може призводити до втрати керованості, зниження точності виконання задач, а в окремих випадках – до повного виходу системи з ладу. Це особливо критично для платформ, які виконують важливі функції, такі як пошук постраждалих, транспортування вантажів або проведення розвідки.

Проблема утримання рівноваги МРП є комплексною та залежить від багатьох факторів, серед яких: конструктивні особливості платформи, розташування центру мас, характеристики поверхні руху, динаміка руху та зовнішні збурення. Вирішення цієї задачі потребує розроблення ефективної системи автоматизації, яка забезпечує збір даних про стан платформи, їх обробку та формування керуючих впливів у реальному часі.

Актуальність даної роботи обумовлена необхідністю підвищення надійності та ефективності МРП, що використовуються у ПРР, шляхом впровадження систем автоматичного утримання рівноваги. Особливу увагу приділено створенню такої системи, що дозволяє зосередитися на практичній реалізації, алгоритмах керування та інженерних рішеннях.

Мета роботи – підвищення стійкості та надійності руху мобільної роботизованої платформи шляхом розроблення системи автоматизації

утримання рівноваги в умовах нерівної поверхні та дії зовнішніх збурень.

Об’єкт розробки – процес руху мобільної роботизованої платформи в умовах дії зовнішніх збурень.

Предмет розробки – система автоматизації утримання рівноваги мобільної роботизованої платформи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести аналіз умов застосування мобільних платформ та визначити основні фактори, що впливають на втрату рівноваги;

– виконати огляд існуючих методів і засобів забезпечення стабільності руху плаяформ та визначити їх переваги і недоліки;

– сформулювати вимоги до системи з урахуванням умов експлуатації;

– розробити структурну схему системи;

– обґрунтувати вибір сенсорів, апаратної платформи та виконавчих механізмів системи;

– розробити алгоритм функціонування системи на основі обробки даних сенсорів;

– реалізувати програмне забезпечення системи;

– провести експериментальне дослідження роботи системи в різних умовах руху та оцінити її ефективність;

– розробити заходи для забезпечення безпечних умов праці у приміщенні навчальної лабораторії.

Наукова новизна полягає у розробленні системи автоматизації утримання рівноваги мобільної платформи, що підвищує її стійкість у складних 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 застосування мобільних роботизованих платформ у пошуково-рятувальних роботах

МРП є важливим елементом сучасних технологій автоматизації, що активно використовуються у ПРР (рис. 1.1). Їх застосування дозволяє виконувати складні та небезпечні завдання в умовах, де перебування людини є утрудненим або становить загрозу для життя. До таких умов належать зруйновані будівлі, шахти, підземні комунікації, зони техногенних аварій, території після землетрусів, повеней, пожеж та бойових дій [4-6].

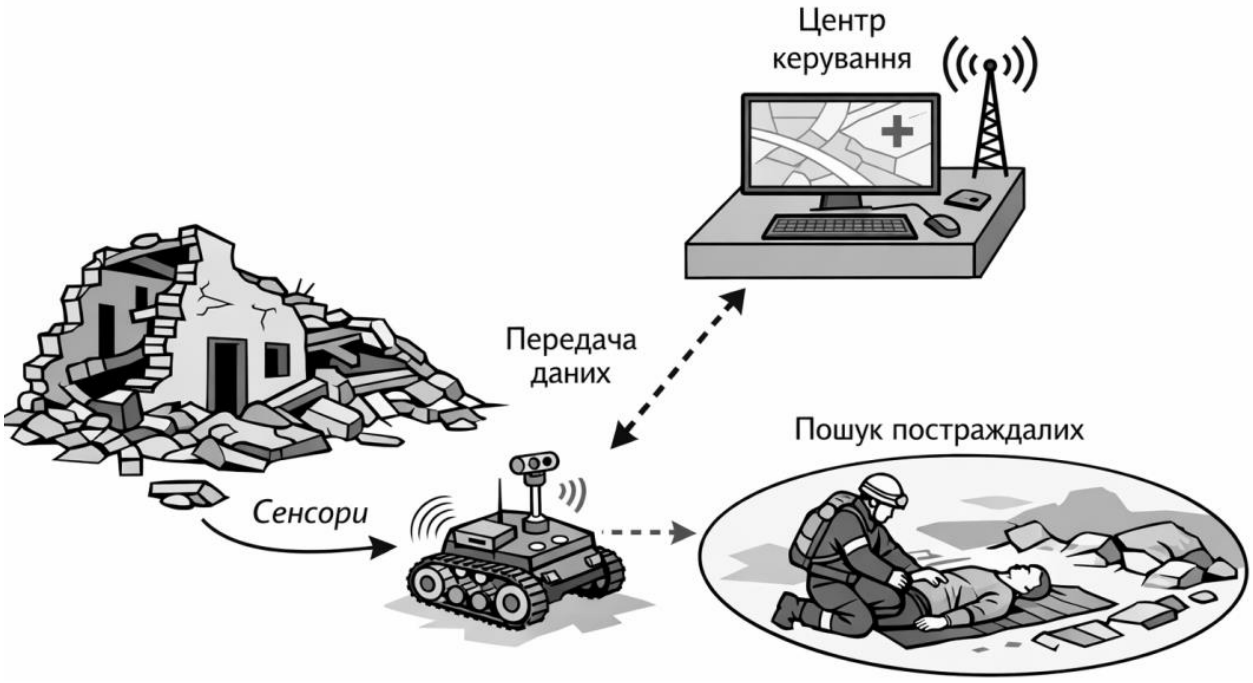


Рисунок 1.1 – Схема застосування МРП у ПРР

Основними функціями МРП у ПРР є:

– проведення розвідки місцевості та побудова карти середовища;

– виявлення постраждалих за допомогою сенсорних систем (відеокамери, тепловізори, газоаналізатори);

– транспортування обладнання або медичних засобів;

– передача інформації до центру керування в режимі реального часу;

– виконання допоміжних операцій (розчищення проходів, обстеження небезпечних зон).

Умови функціонування МРП суттєво відрізняються від стандартних середовищ, у яких працюють промислові роботи. Основними особливостями таких умов є [10-12]:

– нерівність поверхні (уламки, ями, похилі площини);

– нестабільність опорної поверхні (рухомі або слабко закріплені елементи);

– обмежений простір для маневрування;

– наявність перешкод і випадкових впливів;

– відсутність попередньо відомої структури середовища;

– динамічні зміни умов експлуатації.

У зв’язку з цим до МРП висуваються підвищені вимоги, серед яких:

– висока стійкість та здатність до самобалансування;

– маневреність і адаптивність до складного рельєфу;

– надійність роботи в умовах невизначеності;

– автономність функціонування;

– швидкодія систем керування.

Особливе значення має забезпечення стійкості платформи під час руху. У процесі переміщення по нерівній поверхні виникають значні відхилення від рівноважного стану, які можуть призводити до перекидання або втрати керованості. Це обумовлено зміщенням центру мас, зміною точок опори та дією зовнішніх збурень.

З точки зору автоматизації, МРП розглядається як складна динамічна система, що функціонує в умовах невизначеності. Ефективність її роботи значною мірою залежить від здатності системи керування швидко реагувати на зміни стану платформи та навколишнього середовища [7, 9].

Важливу роль у забезпеченні стабільності відіграють сенсорні системи, які здійснюють вимірювання параметрів руху (кут нахилу, прискорення,

кутова швидкість) [11, 15]. Отримані дані використовуються для формування керуючих впливів, спрямованих на компенсацію відхилень від рівноваги.

Аналіз особливостей застосування МРП у ПРР показує, що забезпечення їх стійкості є однією з ключових задач. Це визначає необхідність розроблення ефективних систем автоматизації утримання рівноваги, які враховують специфіку умов експлуатації та забезпечують надійне функціонування платформи.

1.2 Класифікація мобільних роботизованих платформ

МРП, що застосовуються у ПРР, можуть бути класифіковані за різними ознаками, серед яких основною є тип руху (рис. 1.2). Вибір типу платформи безпосередньо впливає на її прохідність, стійкість, маневреність та здатність утримувати рівновагу в складних умовах експлуатації [4, 6, 10].

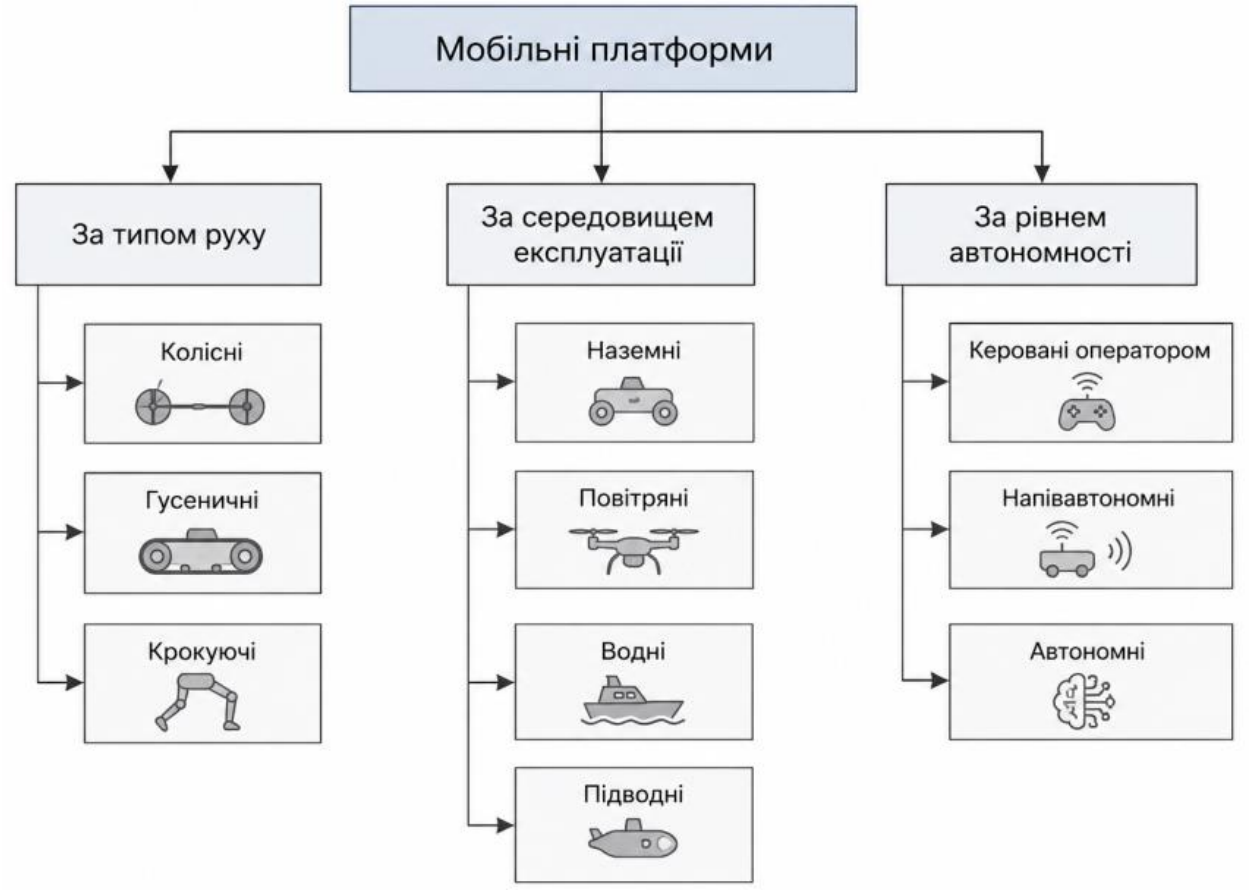


Рисунок 1.2 – Класифікація мобільних роботизованих платформ

За типом рушійної системи МРП класифікуються на [4, 8, 13]:

– колісні платформи, є найбільш поширеними завдяки простоті конструкції, високій швидкості руху та енергоефективності. Вони добре працюють на рівних та твердих поверхнях. До переваг колісних платформ можна віднести: просту конструкцію, низьке енергоспоживання, високу швидкість руху та легкість керування. До недоліків: низька прохідність на нерівних поверхнях, обмежена здатність долати перешкоди та підвищений ризик втрати рівноваги на похилих площинах;

– гусеничні платформи, які забезпечують значно кращу прохідність завдяки збільшеній площі контакту з поверхнею. Вони широко застосовуються у складних умовах, зокрема при роботі на сипких або нестабільних поверхнях. До переваг гусеничних платформ можна віднести: високу прохідність, кращу стійкість та можливість подолання складних перешкод. До недоліків: складнішу конструкцію, більші втрати енергії та зниження швидкості руху;

– крокуючі платформи імітують рух живих організмів та здатні адаптуватися до складного рельєфу. До переваг крокуючих платформ можна віднести: максимальну адаптивність до нерівностей, високу стабільність при правильному керуванні та можливість обходу складних перешкод. До недоліків: складність конструкції та керування, високе енергоспоживання та високу вартість реалізації;

– гібридні платформи, такі системи поєднують декілька типів рушіїв (наприклад, колеса та ноги), що дозволяє підвищити універсальність системи. До переваг гібридних платформ можна віднести: гнучкість у різних умовах, покращену прохідність та адаптивність. До недоліків: складність реалізації, підвищені вимоги до керування та більша вартість.

Мобільні платформи також класифікуються за ступенем автономності :

– дистанційно керовані – керуються оператором;

– напівавтономні – частково виконують функції самостійно;

– автономні – самостійно приймають рішення на основі сенсорних

даних.

З підвищенням рівня автономності зростають вимоги до системи автоматизації та алгоритмів стабілізації.

За умовами експлуатації, залежно від середовища застосування, МРП поділяються на: наземні, підземні, водні та повітряні.

У межах даної класифікаційної роботи основна увага приділяється наземним МРП, які функціонують у складних умовах рельєфу.

Для оцінки ефективності різних типів МРП доцільно провести їх порівняння за основними критеріями (табл. 1.1) [4, 6, 16].

Таблиця 1.1 – Порівняння МРП за основними критеріями

Тип платформи	Прохідність	Стійкість	Складність реалізації	Енергоспоживання
Колісна	середня	низька	низьке	низька
Гусенична	висока	середня	середнє	висока
Крокуюча	висока	висока	високе	дуже висока
Гібридна	висока	дуже висока	високе	висока

Аналіз показує, що для ПРР найбільш доцільними є гусеничні, крокуючі або гібридні платформи, оскільки вони забезпечують підвищену стійкість та прохідність.

При цьому незалежно від типу платформи ключовим фактором залишається ефективна система автоматизації утримання рівноваги, яка забезпечує стабільність руху в умовах дії зовнішніх збурень.

1.3 Проблема втрати рівноваги та її вплив на ефективність роботи платформи

Однією з ключових проблем функціонування МРП у складних умовах є забезпечення їхньої стійкості під час руху. Порушення рівноваги призводить

до відхилення платформи від заданого положення або траєкторії руху, що негативно впливає на ефективність виконання поставлених завдань.

З інженерної точки зору рівновага платформи визначається взаємним розташуванням її центру мас відносно опорної площі. Стан рівноваги зберігається доти, доки проєкція центру мас знаходиться в межах опорного контуру платформи. При виході цієї проєкції за межі опорної площі виникає момент, що спричиняє перекидання [7, 15, 16].

У реальних умовах експлуатації на МРП діє сукупність факторів, що можуть порушити рівновагу (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Схема положення центру мас
відносно опорного контуру МРП

До основних факторів втрати рівноваги можна віднести:

– нерівність та складність поверхні. Під час руху по уламках, нахилених або деформованих поверхнях виникають нерівномірні точки опори, що призводить до перекосу платформи та зміщення її центру мас;

– зміщення центру мас. Зміна положення вантажу, рух маніпуляторів або нерівномірний розподіл маси призводять до зміщення центру мас, що безпосередньо впливає на стійкість [8, 15];

– динамічні навантаження. Прискорення, гальмування, повороти та вібрації створюють додаткові інерційні сили, які можуть викликати

короткочасну або стійку втрату рівноваги [17-19];

– зовнішні збурення. До них належать механічні удари, падіння предметів, контакт із перешкодами або нестабільність опорної поверхні;

– похибки вимірювань сенсорів. Шуми та похибки у показах акселерометрів і гіроскопів можуть призводити до неправильного визначення стану платформи, що знижує ефективність системи стабілізації.

Порушення рівноваги має низку негативних наслідків для функціонування МРП:

– погіршення точності руху, що ускладнює навігацію у складному середовищі;

– зниження ефективності виконання задач, особливо при виконанні точних операцій;

– збільшення енергоспоживання, оскільки система витрачає додаткові ресурси на компенсацію відхилень;

– зростання ризику перекидання, що може призвести до повної втрати працездатності;

– зниження надійності системи, особливо при тривалому функціонуванні в складних умовах.

У критичних ситуаціях втрата рівноваги може призвести до повного виходу МРП з ладу, що є недопустимим у ПРР.

Різні типи МРП мають свої особливості забезпечення стійкості:

– колісні платформи залежать від геометрії бази та рівності поверхні;

– гусеничні платформи мають кращу стабільність за рахунок більшої площі контакту;

– крокуючі платформи забезпечують рівновагу шляхом активного керування положенням опорних точок.

Незважаючи на це, для всіх типів платформ необхідна ефективна система автоматизації, яка забезпечує контроль положення та компенсацію відхилень у режимі реального часу.

САУР виконує такі основні функції:

– збір даних із сенсорів (кут нахилу, прискорення, кутова швидкість);

– обробка та фільтрація сигналів;

– визначення відхилення від рівноважного стану;

– формування керуючих впливів;

– корекція руху платформи.

Ефективність такої системи визначається її швидкодією, точністю та здатністю адаптуватися до змінних умов експлуатації [17, 18].

Проблема утримання рівноваги МРП є багатофакторною та критично важливою для забезпечення її ефективного функціонування. Вона потребує комплексного підходу, що включає як конструктивні рішення, так і розроблення системи автоматизації, здатних компенсувати вплив зовнішніх збурень у реальному часі.

1.4 Огляд існуючих систем автоматизації стабілізації платформ

Забезпечення стійкості МРП під час руху є ключовим завданням САУР. Для цього застосовуються різні підходи до стабілізації, які базуються на використанні сенсорних систем, алгоритмів обробки даних та методів формування керуючих впливів.

Сучасні системи стабілізації, як правило, реалізуються за принципом замкненого контуру керування, де здійснюється постійний контроль стану платформи та корекція її положення в реальному часі.

Основою будь-якої системи стабілізації є сенсорні пристрої, які забезпечують вимірювання параметрів руху платформи.

Для визначення лінійного прискорення та орієнтації відносно гравітаційного поля використовуються акселерометри [26, 27]. До переваг акселерометрів можна віднести: простоту реалізації, низьку вартість та можливість визначення нахилу. До недоліків: чутливість до шумів і вібрацій та низьку точність при динамічному русі.

Для вимірювання кутової швидкості, що дозволяє визначати зміну орієнтації платформи, використовуються гіроскопи [26, 27]. До переваг гіроскопів можна віднести: висока точність у короткочасному періоді та швидка реакція на зміни. До недоліків: накопичення похибки (дрейф) та потреба у калібруванні.

Інерційні модулі IMU (Inertial Measurement Unit) поєднують акселерометр, гіроскоп та іноді магнітометр. До переваг IMU можна віднести: комплексна оцінка стану та підвищена точність при об'єднанні даних. До недоліків: складність обробки даних та необхідність фільтрації сигналів.

Для підвищення точності визначення стану платформи застосовуються методи обробки сигналів [11, 17]:

– фільтрація шумів (ковзне середнє, низькочастотні фільтри);

– комплементарні фільтри;

– фільтр Калмана (у більш складних системах).

Ці методи дозволяють поєднувати дані різних сенсорів і отримувати більш точну оцінку положення платформи.

Алгоритми керування визначають реакцію системи на відхилення від рівноваги.

ПІД-регулятори – найбільш поширений підхід у системах стабілізації [17-19]. До переваг ПІД-регуляторів можна віднести: простоту реалізації, ефективність у багатьох задачах та зрозумілість налаштування. До недоліків: потребу у точному налаштуванні коефіцієнтів та обмежену адаптивність.

Адаптивні алгоритми здатні змінювати параметри керування залежно від умов [15, 18]. До переваг адаптивних алгоритмів можна віднести: кращу роботу в змінних умовах та підвищену ефективність. До недоліків: складність реалізації та більші вимоги до обчислювальних ресурсів.

У складних системах для підвищення адаптивності використовуються інтелектуальні методи (AI, нечітка логіка) [15, 18]. До переваг інтелектуальних методів можна віднести: здатність працювати в умовах

невизначеності та висока гнучкість. До недоліків: складність впровадження та потреба у навчанні моделей.

Типова структура системи стабілізації (рис. 1.4) включає такі основні компоненти:

– сенсорний блок;

– блок обробки даних;

– контролер;

– виконавчі механізми;

– об’єкт керування (платформа).

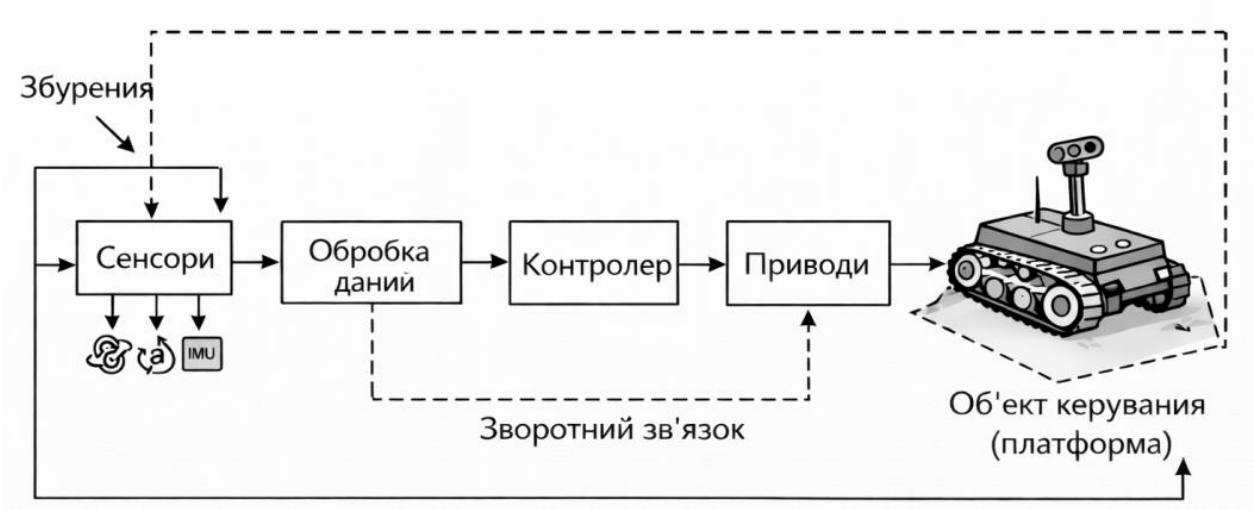


Рисунок 1.4 – Структурна схема системи стабілізації МРП

Сигнали від сенсорів надходять до контролера, де обробляються та використовуються для формування керуючих впливів на приводи.

Для оцінки ефективності різних підходів до стабілізації доцільно виконати їх порівняльний аналіз методів стабілізації (табл. 1.2) [17-19].

Аналіз переваг та обмежень існуючих підходів показує, що більшість існуючих систем стабілізації забезпечують достатній рівень стійкості лише за певних умов. Простіші системи (наприклад, на основі ПІД-регуляторів) мають обмежену адаптивність, тоді як складніші методи потребують значних обчислювальних ресурсів.

Таблиця 1.2 – Порівняння методів стабілізації

Метод	Складність	Точність	Адаптивність	Вимоги до ресурсів
ПІД	низька	середня	низька	низькі
Адаптивний	середня	висока	висока	середні
Інтелектуальні методи	висока	висока	висока	високі

У контексті МРП для ПРР особливе значення має баланс між: ефективністю стабілізації, швидкодією, складністю реалізації і енергоспоживанням.

Існуючі системи стабілізації мають як переваги, так і обмеження, що зумовлює необхідність розроблення ефективної системи автоматизації утримання рівноваги, яка поєднує достатню точність, швидкодію та простоту реалізації. Це є основою для подальшого проєктування системи, що буде розглянуто у наступному розділі.

1.5 Постановка задачи щодо розробки системи автоматизації утримання рівноваги

На основі проведеного аналізу особливостей функціонування МРП та існуючих методів стабілізації можна зробити висновок, що забезпечення стійкості під час руху в складних умовах є критично важливим завданням. Існуючі підходи мають ряд обмежень, пов’язаних зі складністю реалізації, недостатньою адаптивністю або високими вимогами до обчислювальних ресурсів.

У зв’язку з цим виникає необхідність розроблення ефективної САУР, яка забезпечує стабільне функціонування МРП в умовах дії зовнішніх збурень та невизначеності середовища [7, 17, 18].

Задача утримання рівноваги МРП полягає у забезпеченні такого режиму її руху, при якому відхилення від рівноважного стану не перевищує допустимих значень. Стан платформи характеризується такими параметрами, як кут нахилу (у двох площинах), кутова швидкість, лінійне прискорення та положення центру мас.

Метою САУР є мінімізація відхилення платформи від рівноважного положення шляхом формування керуючих впливів на виконавчі механізми.

До вхідних параметрів САУР належать: дані сенсорів (акселерометри, гіроскопи, IMU), параметри руху платформи та зовнішні збурення (непрямо, через сенсори) [15, 17].

До вихідних параметрів САУР належать: сигнали керування приводами, корекція швидкості і напрямку руху та стабілізаційні дії [15, 17].

При розробленні САУР необхідно враховувати такі обмеження:

– обмежені обчислювальні ресурси контролера;

– наявність шумів у сенсорних даних;

– затримки у передачі сигналів;

– змінні умови середовища;

– обмеження по енергоспоживанню.

Система автоматизації повинна працювати в умовах нерівної та нестабільної поверхні, динамічних навантажень, а також непередбачуваних зовнішніх впливів.

До САУР висуваються такі основні вимоги [18, 19]:

– швидкодія – здатність оперативно реагувати на збурення;

– стійкість – забезпечення стабільного режиму роботи;

– надійність – безперервність функціонування;

– точність – мінімізація відхилень;

– адаптивність – здатність працювати в змінних умовах;

– простота реалізації – можливість впровадження на доступній апаратній базі.

Задачу на розроблення САУР можна представити у вигляді замкненої системи керування, яка включає:

– об’єкт керування (МРП);

– сенсорну підсистему;

– блок обробки даних;

– керуючий пристрій (контролер);

– виконавчі механізми.

Між елементами системи існує зворотний зв’язок, що забезпечує корекцію поведінки платформи на основі поточного стану.

З урахуванням вимог до системи та обмежень доцільно використовувати підхід, який поєднує використання інерційних сенсорів (IMU), фільтрацію та обробку даних та застосування простих і ефективних алгоритмів керування (наприклад, ПІД). Такий підхід дозволяє досягти балансу між ефективністю стабілізації та складністю реалізації [17-19].

Отже, сформульовано задачу розроблення САУР МРП, визначено її основні параметри, обмеження та вимоги.

1.6 Висновки до першого розділу

У першому розділі роботи виконано комплексний аналіз особливостей застосування МРП у ПРР. Встановлено, що умови їх експлуатації характеризуються високою невизначеністю, наявністю нерівних та нестабільних поверхонь, а також дією зовнішніх збурень, що суттєво ускладнює забезпечення стабільного руху.

Проведено класифікацію МРП за типом руху, що дозволило визначити їхні конструктивні особливості, переваги та обмеження з точки зору здатності утримувати рівновагу. Встановлено, що найбільш критичними факторами, які впливають на втрату рівноваги, є зміщення центру мас, нерівності поверхні, динамічні навантаження та зовнішні механічні впливи.

Проаналізовано причини порушення рівноваги та їх вплив на ефективність функціонування МРП. Визначено, що втрата стабільності призводить до зниження точності руху, збільшення енергоспоживання, зниження надійності роботи та, у критичних випадках, до повної втрати працездатності системи.

Виконано огляд сучасних систем стабілізації, які базуються на використанні інерційних сенсорів (акселерометрів, гіроскопів та IMU-модулів) у поєднанні з алгоритмами керування. Встановлено, що існуючі підходи мають певні обмеження, зокрема чутливість до шумів, потребу в налаштуванні параметрів та обмежену адаптивність до змінних умов експлуатації.

На основі проведеного аналізу сформульовано постановку задачі розроблення САУР МРП. Визначено основні вимоги до такої системи, серед яких: швидкодія, стійкість до збурень, надійність функціонування та можливість роботи в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ УТРИМАННЯ РІВНОВАГИ

2.1 Структурна схема системи автоматизації утримання рівноваги

Розроблення структурної схеми САУР МРП є важливим етапом проєктування, який дозволяє визначити склад основних компонентів системи, їх функціональне призначення та взаємозв’язки між окремими елементами.

Структурна схема відображає логіку функціонування системи та забезпечує наочне представлення процесів:

– отримання інформації;

– обробки даних;

– формування керуючих сигналів;

– керування виконавчими механізмами;

– реалізації зворотного зв’язку.

Розроблення структурної схеми є необхідним для подальшої реалізації апаратної та програмної частини САУР.

САУР призначена для забезпечення стабільного руху МРП в умовах дії зовнішніх збурень та нерівностей поверхні. Основним завданням системи є своєчасне виявлення відхилень від рівноважного стану та формування керуючих впливів, необхідних для компенсації цих відхилень.

Структурна схема САУР (рис. 2.1) визначає склад її основних компонентів, принципи їх взаємодії та потоки інформації між окремими елементами. Побудова ефективної архітектури структурної схеми є важливою умовою забезпечення надійності, швидкодії та стійкості роботи МРП [7, 15, 17].

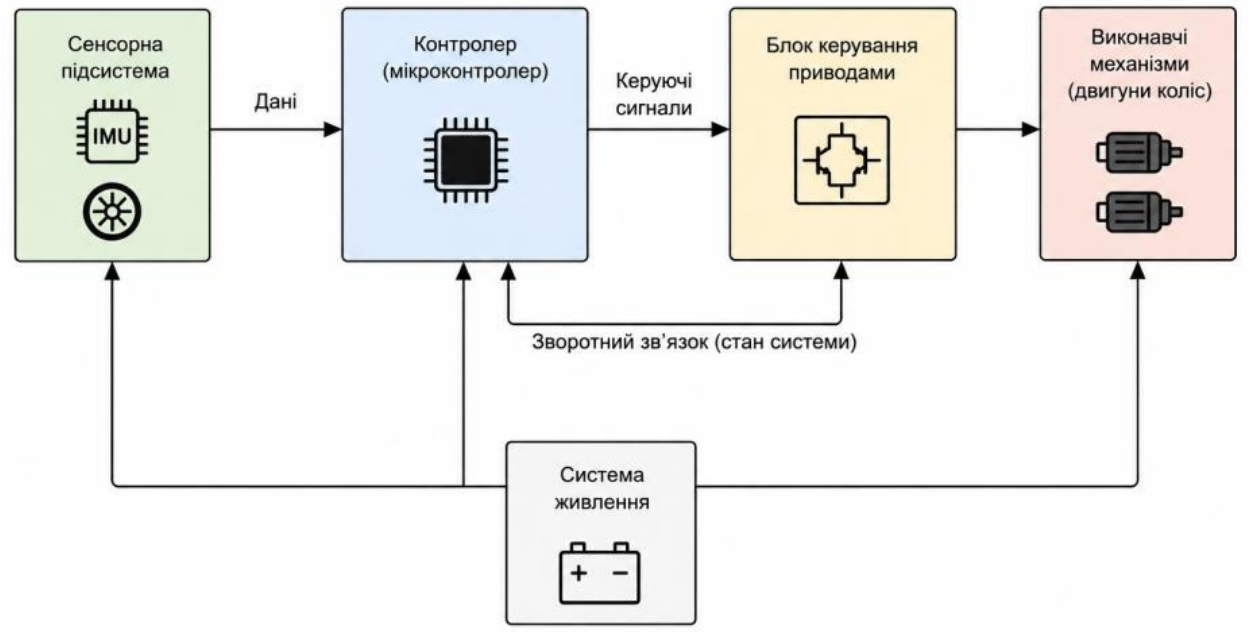


Рисунок 2.1 – Загальна структурна схема САУР МРП

До складу САУР входять такі основні компоненти:

– сенсорна підсистема – призначена для отримання інформації про поточний стан платформи та параметри її руху. Основними сенсорами системи є акселерометри, гіроскопи, IMU-модулі та датчики положення та швидкості. Сенсори здійснюють безперервний контроль кута нахилу, кутової швидкості, лінійного прискорення та зміни положення платформи. Отримані дані передаються до блоку обробки для подальшого аналізу;

– блок обробки даних – виконує фільтрацію шумів, перевірку коректності сигналів, об'єднання даних із різних сенсорів, а також визначення поточного стану платформи. В автоматизованій системі можуть використовуватися комплементарні фільтри, цифрові фільтри низьких частот та методи усереднення даних. Обробка сигналів є необхідною для підвищення точності роботи системи та зменшення впливу шумів і випадкових збурень;

– контролер – центральний елемент системи автоматизації. Він аналізує інформацію, отриману від сенсорної підсистеми, та формує сигнали керування для виконавчих механізмів. Основними функціями контролера є аналіз поточного стану платформи, визначення величини відхилення від

рівноваги, формування керуючих сигналів та координація роботи системи. Для реалізації контролера можуть використовуватися: Arduino MEGA, STM32, ESP32 та Raspberry Pi. Вибір конкретної апаратної платформи залежить від складності алгоритмів та необхідної швидкодії системи;

– виконавчі механізми – забезпечують фізичну компенсацію відхилення платформи від рівноважного стану. До них належать: електродвигуни, серводвигуни, приводи коліс або гусениць та механізми зміни положення центру мас. Керуючі сигнали від контролера надходять до приводів, які змінюють режим руху платформи для стабілізації її положення;

– система живлення – забезпечує електроенергією всі компоненти системи автоматизації. До її складу входять акумуляторні батареї, стабілізатори напруги та модулі контролю енергоспоживання. Важливою вимогою є забезпечення стабільної роботи системи при зміні навантаження та під час тривалого автономного функціонування;

– система зв’язку та моніторингу – забезпечує передачу даних до центру керування, дистанційний моніторинг, а також отримання команд від оператора. Для передачі інформації можуть використовуватися: Wi-Fi, Bluetooth, радіоканали та мобільні мережі. Наявність системи моніторингу дозволяє оператору контролювати стан платформи в режимі реального часу;

– МРП як об’єкт керування, стан якого змінюється під впливом зовнішніх збурень та керуючих дій системи. Основним завданням системи керування є забезпечення стабільного положення та стійкого руху платформи під час виконання ПРР.

Кожен із зазначених компонентів виконує окрему функцію у процесі забезпечення стабільності руху МРП.

Робота САУР здійснюється за замкненим циклом [17-19]. Послідовність функціонування системи автоматизації наступна:

– сенсори зчитують параметри руху платформи;

– дані передаються до блоку обробки;

– контролер аналізує поточний стан;

– формуються керуючі сигнали;

– виконавчі механізми компенсують відхилення;

– результат дії контролюється через зворотний зв’язок.

Такий принцип дозволяє системі оперативно реагувати на зміни умов руху МРП.

До переваг запропонованої архітектури САУР належать: модульність структури, можливість масштабування, простота інтеграції компонентів, швидкодія та адаптивність до різних умов експлуатації.

Крім того, запропонована структура забезпечує ефективну інтеграцію апаратної та програмної частини системи, а також можливість подальшого вдосконалення САУР шляхом додавання нових сенсорів або алгоритмів керування.

2.2 Вибір та обґрунтування сенсорів

Одним із ключових елементів САУР МРП є сенсорна підсистема (рис. 2.2).

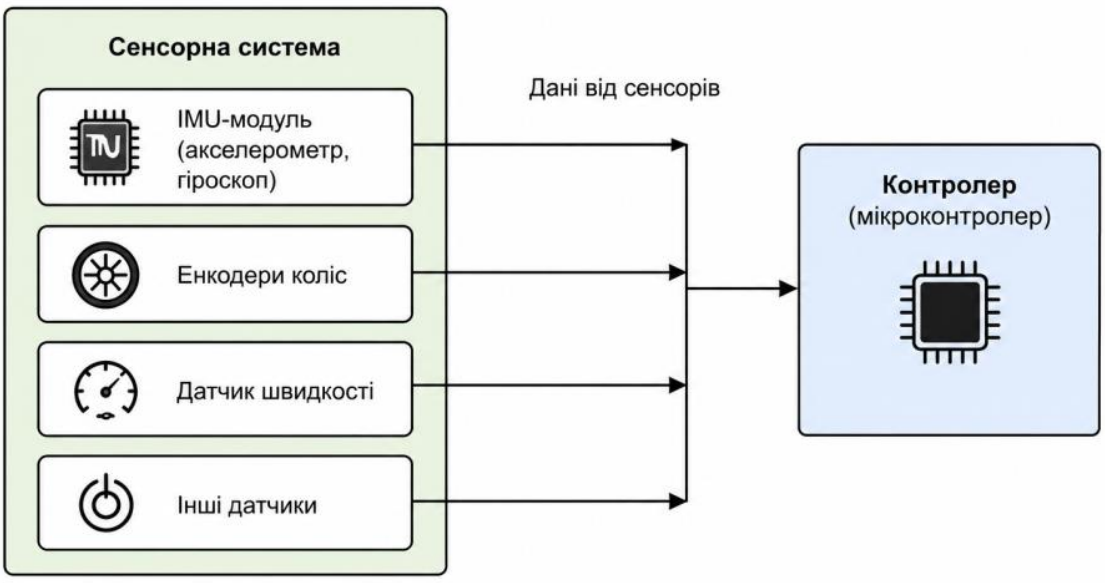


Рисунок 2.2 – Структура сенсорної підсистеми МРП

Саме сенсори забезпечують отримання інформації про поточний стан платформи, параметри її руху та вплив зовнішніх збурень. Від точності, швидкодії та надійності сенсорів безпосередньо залежить ефективність функціонування всієї системи стабілізації.

Для забезпечення стійкого руху платформи необхідно здійснювати безперервний контроль кута нахилу, кутової швидкості, лінійного прискорення, швидкості переміщення, а також положення платформи у просторі.

У сучасних системах стабілізації для цього застосовуються інерційні сенсори (акселерометри, гіроскопи тощо), які дозволяють визначати параметри руху в режимі реального часу.

Акселерометр – призначений для вимірювання лінійного прискорення вздовж однієї або декількох осей [26]. У системах утримання рівноваги акселерометри використовуються для визначення нахилу платформи, оцінки прискорення під час руху та виявлення різких змін положення. Принцип роботи акселерометра базується на вимірюванні інерційних сил, що виникають при зміні швидкості руху. До основних переваг акселерометрів належать: простота інтеграції, компактність, низька вартість та невелике енергоспоживання. До недоліків: чутливість до вібрацій, наявність шумів, зниження точності при динамічному русі. Типові моделі акселерометрів: MPU6050, ADXL345 і MMA8452Q. Найбільш поширеним рішенням є MPU6050, який поєднує акселерометр та гіроскоп в одному модулі .

Гіроскоп використовується для визначення кутової швидкості обертання платформи [26]. У системах стабілізації гіроскопи забезпечують визначення швидкості зміни кута нахилу, виявлення поворотів та контроль динаміки руху. Гіроскопи забезпечують швидку реакцію системи на зміну положення платформи. До основних переваг гіроскопів належать: висока швидкодія, точність вимірювання кутової швидкості та стабільна робота в динамічних режимах. До недоліків: накопичення похибки, дрейф показів та потреба у калібруванні. Типові моделі гіроскопів: L3G4200D, MPU6050 і

ITG3200.

IMU (Inertial Measurement Unit) є комплексними сенсорними модулями, які об’єднують акселерометр, гіроскоп та магнітометр (у деяких моделях) [27]. Такі модулі забезпечують комплексне визначення положення та руху платформи. До основних переваг IMU належать: висока точність оцінки стану, можливість комплексного аналізу руху, компактність та спрощення інтеграції системи. До недоліків: складність обробки даних, необхідність фільтрації шумів та вища вартість. Популярні IMU-модулі MPU6050, MPU9250 і BNO055. Для даної роботи доцільно обрати MPU6050 завдяки поєднанню достатньої точності, доступності та простоти інтеграції.

Для додаткового контролю руху можуть застосовуватися сенсори швидкості та положення (енкодери, датчики Холла, оптичні сенсори). Такі сенсори дозволяють визначати швидкість обертання коліс, пройдений шлях та напрямок руху. Інформація від цих сенсорів використовується для уточнення параметрів руху та підвищення точності стабілізації.

У процесі роботи сенсори генерують шуми та похибки, які можуть негативно впливати на роботу системи автоматизації. Для підвищення точності використовуються цифрові фільтри, комплементарні фільтри, методи усереднення, а також фільтрація високочастотних шумів. Фільтрація дозволяє отримати більш стабільні значення параметрів руху.

При виборі сенсорів для системи автоматизації утримання рівноваги враховуються точність вимірювання, швидкодія, стабільність роботи та сумісність із контролером. Важливим фактором є також можливість роботи в умовах вібрацій та механічних збурень [11, 16, 26].

В табл. 2.1 наведенно результати порівняльного аналізу основних сенсорів.

Для реалізації системи автоматизації утримання рівноваги доцільно використовувати комбінацію IMU-модуля, сенсорів швидкості та енкодерів. Такий підхід дозволяє підвищити точність оцінки стану, забезпечити швидке реагування та компенсувати похибки окремих сенсорів.

Таблиця 2.1 – Результати порівняння основних сенсорів

Сенсор	Призначення	Переваги	Недоліки
Акселерометр	вимірювання прискорення	простота, низька вартість	чутливість до шумів
Гіроскоп	вимірювання кутової швидкості	висока швидкодія	дрейф
IMU	комплексне визначення стану	висока точність	складність обробки
Енкодер	визначення швидкості руху	точність вимірювання	потребує механічного з’єднання

Для реалізації мети кваліфікаційної роботи ми використовуємо IMU-модуль MPU6050 у поєднанні з датчиками обертання коліс, оскільки це забезпечує достатню функціональність при невисокій складності реалізації.

2.3 Вибір апаратної платформи керування

Одним із найважливіших етапів розроблення САУР МРП є вибір структури апаратної платформи керування. Саме контролер забезпечує виконання алгоритмів обробки даних, формування керуючих сигналів та координацію роботи всіх елементів системи.

Від правильності вибору апаратної платформи залежать швидкодія системи, точність стабілізації та надійність функціонування.

У сучасних РС у якості керуючого пристрою використовуються мікроконтролери, одноплатні комп’ютери та спеціалізовані керуючі модулі.

Для систем утримання рівноваги МРП найчастіше застосовуються Arduino, STM32, ESP32 та Raspberry Pi.

Платформа Arduino є однією з найбільш поширених платформ для створення систем автоматизації та робототехнічних пристроїв. Основними

перевагами платформи є простота програмування, велика кількість бібліотек, доступність компонентів та низька вартість. До недоліків Arduino можно віднести: обмежену обчислювальну потужність, невеликий обсяг пам’яті та обмежені можливості обробки складних алгоритмів. Arduino підтримує роботу з IMU-модулями, керування двигунами, обробку сигналів сенсорів та передачу даних. Типові моделі платформи: Arduino Uno, Arduino Mega і Arduino Nano. Для простих систем стабілізації платформа Arduino є достатньо ефективним рішенням.

STM32 є сімейством високопродуктивних мікроконтролерів на базі ARM Cortex [25-25]. Вони широко використовуються у робототехніці, системах автоматизації, безпілотних системах та промислових контролерах. До переваг STM32 належать: висока швидкодія, підтримка великої кількості периферії, точні таймери, ефективна робота в режимі реального часу та низьке енергоспоживання. До недоліків: складне програмування, потреба у спеціалізованих середовищах розробки та вищі вимоги до налаштування. Популярні моделі: STM32F103, STM32F407 та STM32 Nucleo. STM32 є оптимальним вибором для систем стабілізації, які потребують високої швидкодії та точності.

ESP32 є сучасним мікроконтролером із підтримкою бездротового зв’язку.

Платформа забезпечує підтримку: Wi-Fi, Bluetooth, багатоядерну обробку та роботи в режимі реального часу. До переваг ESP32 належать: інтегрований бездротовий зв’язок, висока продуктивність, компактність та невисока вартість. До недоліків: складніша робота з реальним часом порівняно зі STM32 та чутливість до електромагнітних завад. Сфери застосування ESP32 це IoT-системи, мобільні роботи, системи дистанційного моніторингу тощо. ESP32 є ефективним рішенням для систем, у яких необхідна передача даних до центру керування.

Одноплатні комп’ютери Raspberry Pi є повноцінним мінікомп’ютером, що працює під керуванням ОС Linux. Raspberry Pi дають змогу реалізації

складних алгоритмів, обробки великих обсягів даних, використання комп’ютерного зору, а також роботи з нейронними мережами. До переваг Raspberry Pi належать: висока обчислювальна потужність, підтримка багатьох мов програмування і можливість роботи з камерою та мережею. До недоліків: високе енергоспоживання, відсутність жорсткого режиму реального часу та більша складність системи. Типові моделі: Raspberry Pi 4 та Raspberry Pi Zero 2W. Для задач стабілізації руху Raspberry Pi доцільно використовувати у поєднанні з мікроконтролером.

При виборі апаратної платформи системи автоматизації утримання рівноваги будемо враховувати такі параметри, як швидкодія, підтримка роботи в реальному часі, кількість інтерфейсів, сумісність із сенсорами та складність програмування. Особливо важливими для системи є мала затримка обробки даних, стабільність роботи та швидке формування керуючих сигналів.

В табл. 2.2 наведенно результати порівняльного аналізу сучасних апаратних платформ.

Таблиця 2.2 – Результати порівняння апаратних платформ

Платформа	Продуктивність	Енергоспоживання	Складність
Arduino	низька	низьке	низька
STM32	висока	низьке	середня
ESP32	середня	середнє	середня
Raspberry Pi	дуже висока	високе	висока

Для реалізації апаратної платформи, з урахуванням вимог до САУР, використовуємо STM32 як основний контролер системи стабілізації, а ESP32 – як додатковий модуль зв’язку.

На рис. 2.3 наведено реалізацію структури апаратної платформи МРП.

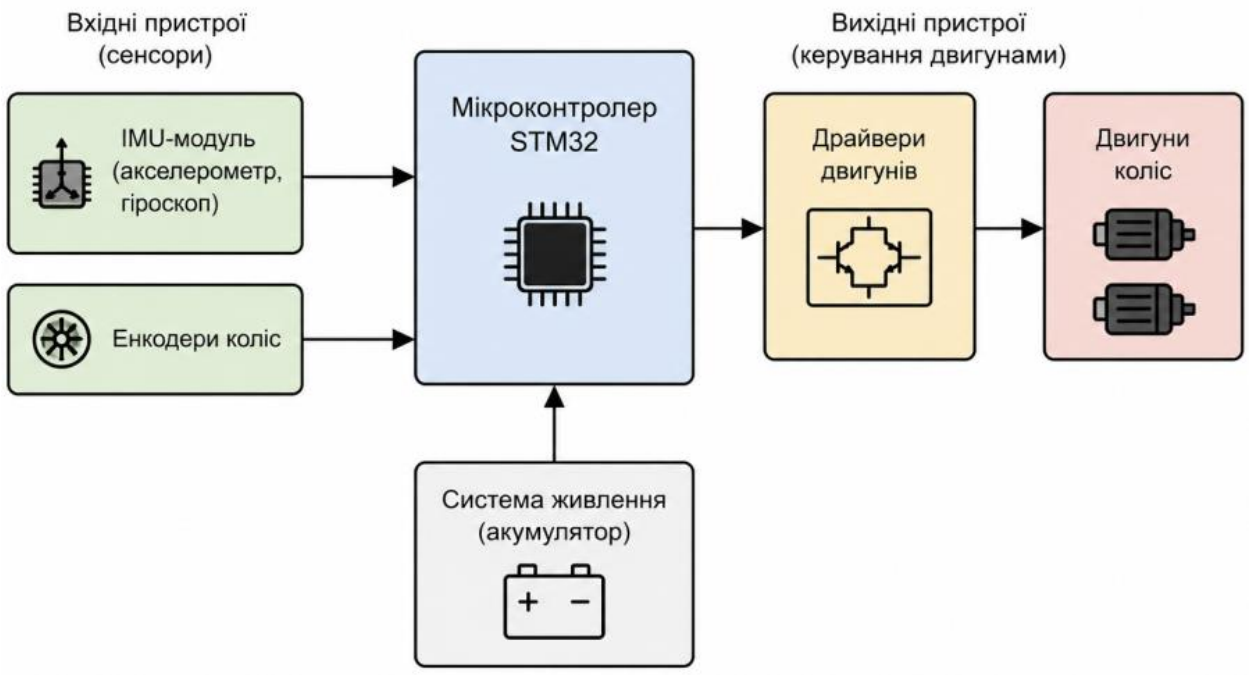


Рисунок 2.3 – Структура апаратної платформи МРП

Особливостями інтеграції апаратної платформи є то, що контролер взаємодіє з IMU-модулями, енкодерами, драйверами двигунів, системою живлення та модулем зв'язку. Передача даних здійснюється через інтерфейси: I^2C, SPI, UART та PWM.

Правильна організація взаємодії компонентів забезпечує стабільність роботи системи автоматизації утримання рівноваги.

2.4 Розроблення алгоритму утримання рівноваги

Одним із ключових елементів САУР МРП є алгоритм утримання рівноваги. Саме алгоритм визначає принцип роботи системи, послідовність обробки даних та формування керуючих впливів, необхідних для стабілізації положення платформи під час руху.

Основною метою алгоритму утримання рівноваги (рис. 2.4) є забезпечення стабільного положення платформи шляхом своєчасного реагування на зовнішні збурення та компенсації відхилень від рівноважного стану.

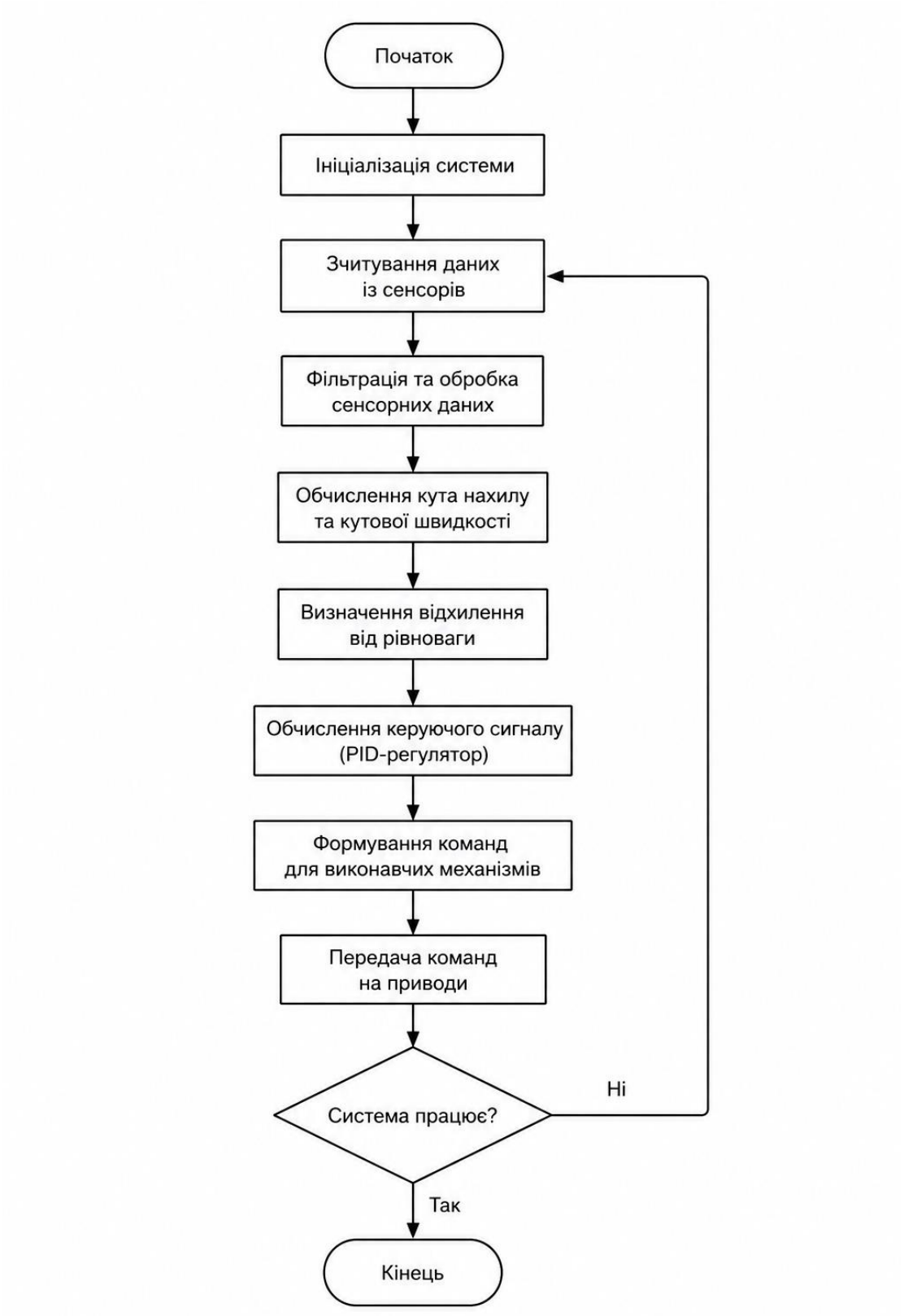


Рисунок 2.4 – Блок-схема алгоритму утримання рівноваги

Алгоритм функціонує в режимі реального часу та виконує зчитування даних із сенсорів, аналіз поточного стану, визначення відхилення від

рівноваги, формування керуючих сигналів та передачу команд на виконавчі механізми [7, 18].

Робота алгоритму базується на принципі замкненого контуру керування із використанням зворотного зв’язку.

У процесі роботи САУР:

– отримує інформацію від сенсорів;

– визначає поточний стан платформи;

– порівнює поточний стан із заданим;

– обчислює величину відхилення;

– формує коригувальні сигнали;

– передає команди на приводи;

– повторює цикл у режимі реального часу.

Такий підхід забезпечує безперервний контроль рівноваги та можливість оперативної компенсації збурень.

На першому етапі алгоритм виконує зчитування інформації з акселерометрів, гіроскопів, IMU-модуля; та енкодерів коліс. Основними параметрами, що аналізуються, є кут нахилу платформи, кутова швидкість, прискорення та швидкість руху. Оскільки сенсорні сигнали можуть містити шуми та випадкові похибки, алгоритм виконує попередню обробку даних.

Для підвищення точності роботи системи використовується фільтрація та обробка сигналів. Алгоритм виконує усереднення значень, компенсацію шумів, об’єднання даних із кількох сенсорів та перевірку коректності показів. Для спрощення реалізації у роботі використовуємо комплементарний фільтр та цифровий фільтр низьких частот. Фільтрація дозволяє отримати стабільні значення параметрів руху та зменшити вплив вібрацій.

Після обробки даних алгоритм визначає величину відхилення платформи від рівноважного стану. Відхилення може виникати через нахил поверхні, різке прискорення, зовнішній удар та зміщення центру мас. Для оцінки стану платформи використовуються допустимі кути нахилу, швидкість зміни положення та критичні значення прискорення. При

перевищенні допустимих меж система переходить до етапу компенсації.

На основі величини відхилення контролер формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів. Основними способами стабілізації є зміна швидкості обертання коліс, корекція напряму руху, компенсація нахилу та перерозподіл навантаження. Для реалізації керування використовується ПІД-регулювання, який забезпечує швидку реакцію, плавність керування та стабільність системи [17-19].

Принцип роботи ПІД-регулятора полягає у том, що регулятор формує керуючий сигнал на основі поточної похибки, накопиченої похибки та швидкості зміни похибки:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \qquad (2.1)$$

де K_p – пропорційний коефіцієнт;

K_i – інтегральний коефіцієнт;

K_d – диференціальний коефіцієнт;

$e(t)$ – похибка системи.

Використання ПІД-регулятора дозволяє забезпечити стабільну роботу САУР навіть при наявності зовнішніх збурень.

Алгоритм працює циклічно з невеликим часовим інтервалом між ітераціями. Частота виконання циклу повинна забезпечувати достатню швидкодію САУР.

При виникненні зовнішніх збурень алгоритм фіксує зміну положення, визначає величину відхилення, розраховує коригувальний вплив та стабілізує положення МРП [17, 19].

Швидкість реагування системи є одним із головних факторів ефективності стабілізації.

Запропонований алгоритм має такі переваги:

– простота реалізації;

– можливість роботи в реальному часі;

– невисокі вимоги до обчислювальних ресурсів;

– швидке реагування на збурення;

– можливість інтеграції з різними типами платформ.

Алгоритм реалізований на мікроконтролері STM32 без потреби у складному математичному моделюванні.

При практичній реалізації алгоритму необхідно враховувати затримки обробки сигналів, похибки сенсорів, нестабільність живлення, а також механічні вібрації.

Для підвищення стабільності системи доцільно використовувати фільтрацію, виконувати калібрування сенсорів та оптимізувати частоту опитування.

2.5 Структура програмного забезпечення системи автоматизації утримання рівноваги

ПЗ є одним із ключових компонентів САУР МРП. Саме програмна частина забезпечує взаємодію між сенсорною підсистемою, контролером та виконавчими механізмами, а також реалізує алгоритми стабілізації руху.

Основним призначенням ПЗ є:

– зчитування даних із сенсорів;

– обробка та фільтрація сигналів;

– визначення стану платформи;

– формування керуючих впливів;

– передача команд на приводи;

– моніторинг параметрів роботи системи.

ПЗ працює в режимі реального часу та забезпечує безперервне виконання циклу стабілізації.

На рис. 2.5 наведено схему реалізованого ПЗ САУР.

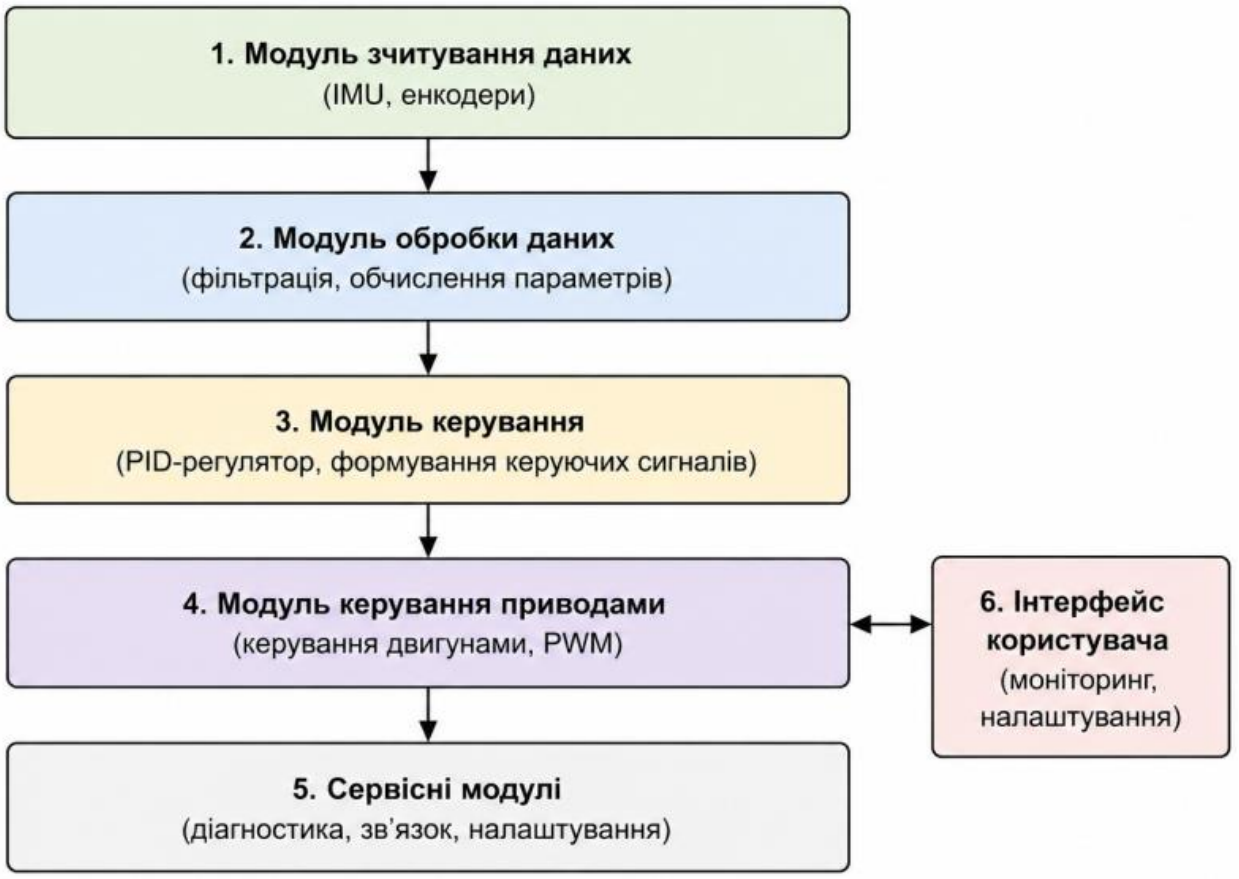


Рисунок 2.5 – Схема ПЗ САУР МРП

ПЗ системи має модульну структуру, що забезпечує зручність розробки, можливість масштабування, спрощення тестування та незалежність окремих компонентів [21, 23, 28]. До складу ПЗ входять модулі: зчитування даних, обробки інформації, керування, роботи з приводами, зв’язку та моніторингу, а також головний керуючий модуль.

Модуль зчитування даних із сенсорів забезпечує отримання інформації від IMU-модуля, акселерометрів, гіроскопів, енкодерів та датчиків швидкості. Основними функціями модуля є ініціалізація сенсорів, періодичне опитування, перевірка коректності даних та передача інформації до блоку обробки. Передача даних здійснюється через інтерфейси I^2C, SPI і UART. Модуль працює з високою частотою опитування для забезпечення швидкої реакції системи.

Модуль обробки та фільтрації даних отримує від сенсорів сигнали які можуть містити шуми, випадкові коливання та похибки вимірювання. Тому

ПЗ виконує фільтрацію сигналів, усереднення значень, компенсацію похибок та обчислення параметрів руху. Основними задачами модуля є визначення кута нахилу, обчислення кутової швидкості, оцінка прискорення та формування стабільних значень параметрів. Для цього використовуються комплементарні фільтри, цифрові фільтри низьких частот та методи усереднення.

Модуль керування є центральною частиною ПЗ. Його основними функціями є аналіз поточного стану платформи, визначення відхилення від рівноваги, розрахунок керуючого сигналу та реалізація алгоритму ПІД-регулювання. На основі оброблених даних модуль формує сигнали для зміни швидкості руху, компенсації нахилу та стабілізації положення платформи.

Модуль керування приводами забезпечує взаємодію контролера з виконавчими механізмами. До його функцій належать: формування PWM-сигналів, керування напрямком руху, регулювання швидкості двигунів та обмеження перевантаження. Модуль забезпечує плавність руху, швидке реагування та стабільність роботи приводів.

Модуль зв’язку та моніторингу використовується для забезпечення контролю роботи системи. Він виконує передачу телеметрії, обмін даними з оператором, виведення параметрів системи та дистанційний моніторинг. Передача даних може здійснюватися через Wi-Fi, Bluetooth та UART. Основними параметрами моніторингу є кут нахилу, швидкість руху, стан сенсорів та рівень заряду батареї.

Головний керуючий модуль координує роботу всіх компонентів ПЗ. До його функції входить запуск системи, ініціалізація модулів, синхронізація процесів, організація циклу роботи та обробка аварійних ситуацій. Головний цикл програми виконується безперервно та забезпечує роботу САУР в режимі реального часу.

В табл. 2.3 наведено призначення основних файлів ПЗ САУР.

Таблиця 2.3 – Призначення основних файлів ПЗ САУР

Файл	Призначення
main.py	головний цикл програми
sensors.py	робота із сенсорами
imu.py	обробка даних IMU
filter.py	фільтрація сигналів
pid_controller.py	ПІД-регулятор
motors.py	керування двигунами
communication.py	передача даних
config.py	налаштування системи

САУР потребує швидкого реагування на зміну положення МРП. Для роботи в режимі реального часу ПЗ повинно мінімізувати затримки, швидко обробляти дані, забезпечувати стабільний цикл роботи, а також підтримувати високу частоту оновлення [21, 22]. Надмірні затримки можуть призвести до нестабільності, коливань платформи та втрати рівноваги.

До переваг модульної структури можна віднести простоту модернізації, можливість додавання нових функцій, спрощення налагодження, а також повторне використання компонентів.

Крім того, така структура ПЗ дозволяє легко адаптувати САУР до різних типів МРП.

2.6 Висновки до другого розділу

У другому розділі роботи виконано розроблення основних компонентів САУР МРП для ПРР.

Розроблено структурну схему САУР МРП, яка відображає взаємодію між сенсорною підсистемою, блоками обробки даних, контролером та виконавчими механізмами. Реалізований підхід забезпечує можливість стабільного функціонування МРП в умовах дії зовнішніх збурень та

нерівностей поверхні.

Виконано вибір та обґрунтування сенсорної системи. Проаналізовано особливості застосування акселерометрів, гіроскопів, IMU-модулів та енкодерів у задачах стабілізації руху МРП. Обґрунтовано доцільність використання IMU-модуля MPU6050 у поєднанні з датчиками швидкості для забезпечення контролю параметрів руху в режимі реального часу.

Проведено аналіз сучасних апаратних платформ керування та визначено їх переваги й недоліки. Встановлено, що мікроконтролери STM32 забезпечують оптимальне поєднання швидкодії, енергоефективності та підтримки роботи в реальному часі, що робить їх доцільними для реалізації САУР МРП.

Розроблено алгоритм утримання рівноваги МРП, який базується на використанні зворотного зв’язку та принципу ПІД-регулювання. Алгоритм забезпечує зчитування та обробку сенсорних даних, визначення відхилення від рівноважного стану та формування керуючих сигналів для компенсації зовнішніх збурень.

Розроблено структуру ПЗ САУР МРП, визначено основні програмні модулі та принципи їх взаємодії. Запропонована модульна структура забезпечує простоту модернізації, масштабування та подальшого вдосконалення САУР МРП.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ УТРИМАННЯ РІВНОВАГИ

3.1 Опис реалізації системи автоматизації утримання рівноваги

Реалізація САУР МРП для ПРР передбачає інтеграцію апаратних і програмних компонентів у єдину систему керування, здатну забезпечувати стабільний рух платформи в умовах дії зовнішніх збурень та нерівностей поверхні.

Під час реалізації САУР використовувався модульний підхід, який дозволяє спростити процес розроблення, тестування та подальшої модернізації окремих компонентів системи. Основними складовими САУР є сенсорна підсистема, мікроконтролерний блок керування, модуль керування приводами, система зв'язку та ПЗ, що реалізує алгоритм стабілізації [4, 14].

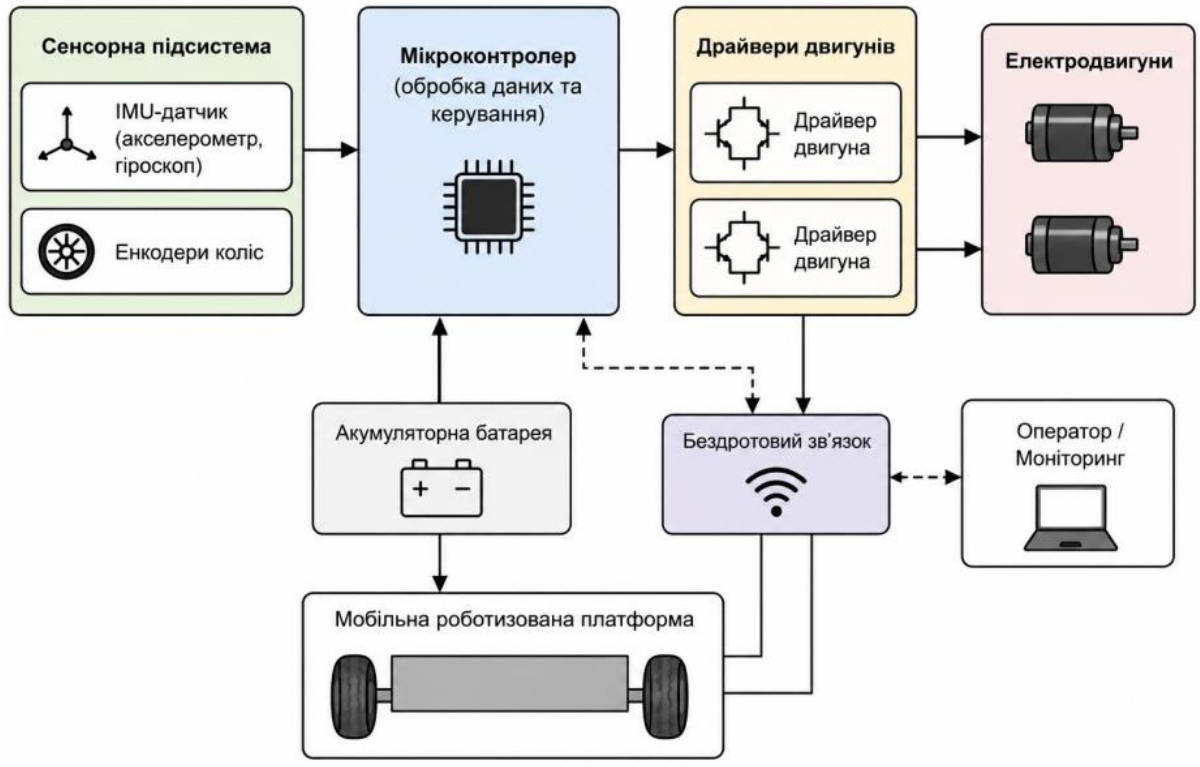


Рисунок 3.1 – Реалізація САУР МРП для ПРР

Як показано на рис. 3.1, центральним елементом САУР є мікроконтролер STM32, який виконує функції збору та обробки даних, реалізації алгоритму керування та формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів. Використання мікроконтролерів сімейства STM32 обумовлене їх високою продуктивністю, підтримкою роботи в режимі реального часу та широким набором периферійних інтерфейсів [23, 24].

Для визначення поточного стану МРП використовується інерціальний вимірювальний модуль MPU6050, який поєднує тривісний акселерометр і тривісний гіроскоп [26]. Застосування IMU-модуля дозволяє безперервно отримувати інформацію про кут нахилу, кутову швидкість та прискорення платформи, що є необхідним для реалізації алгоритму стабілізації [5, 16].

Передача інформації між сенсорним модулем та контролером здійснюється за допомогою інтерфейсу I^2C, який забезпечує високу швидкість обміну даними та простоту підключення периферійних пристроїв [14]. Для керування електроприводами використовуються драйвери двигунів, що забезпечують узгодження рівнів сигналів мікроконтролера з параметрами виконавчих механізмів.

У таблиці 3.1 наведено основні апаратні компоненти реалізованої САУР РМП.

Таблиця 3.1 – Основні апаратні компоненти реалізованої системи

№	Компонент	Основні технічні характеристики	Призначення в системі
1	2	3	4
1	Мікроконтролер STM32F103C8T6	ARM Cortex-M3, тактова частота 72 МГц, Flash 64 КБ, RAM 20 КБ, інтерфейси I^2C, SPI, UART, PWM	центральний блок керування, обробка даних із сенсорів, реалізація алгоритму керування та формування керуючих сигналів

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
2	Інерціальний вимірювальний модуль MPU6050	тривісний акселерометр та гіроскоп, інтерфейс I^2C, діапазон вимірювання ±2...±16 g, ±250...±2000 °/c	визначення кута нахилу, кутової швидкості та прискорення МРП
3	Енкодери коліс	оптичний або магнітний, цифровий вихід, напруга живлення 3,3 – 5 В	визначення швидкості та напряму обертання коліс, оцінка параметрів руху
4	Драйвер двигунів L298N	напруга живлення 5 – 35 В, струм до 2 А на канал, підтримка PWM	керування швидкістю та напрямком обертання електродвигунів
5	Електродвигуни постійного струму	напруга живлення 6 – 12 В, швидкість обертання 150 – 300 об/хв	забезпечення руху мобільної роботизованої платформи
6	Модуль бездротового зв'язку HC-05	Bluetooth 2.0, дальність зв'язку до 10 м, інтерфейс UART	передача телеметричних даних та прийом команд від оператора
7	Акумуляторна батарея Li-Po	напруга 11,1 В, ємність 2200 – 5000 мА·год	автономне живлення всіх компонентів системи
8	Понижувальний перетворювач DC-DC	вхідна напруга 6 – 24 В, вихідна напруга 5 В або 3,3 В	стабілізація напруги живлення для мікроконтролера та сенсорів

ПЗ САУР реалізоване у вигляді набору взаємопов'язаних модулів (див. рис. 2.5). Такий підхід забезпечує незалежність окремих функціональних блоків, спрощує супроводження програмного коду та дозволяє розширювати функціональні можливості САУР без суттєвої зміни її

структури [11, 21].

Зчитування інформації із сенсорів здійснюється циклічно з фіксованим часовим інтервалом. Отримані дані надходять до модуля обробки, де виконуються їх фільтрація та компенсація випадкових шумів. Для підвищення точності оцінювання положення МРП використовується комплементарний фільтр, що поєднує переваги акселерометра та гіроскопа [16, 17].

Після визначення поточного кута нахилу система обчислює відхилення від заданого положення рівноваги. На основі отриманої похибки ПІД-регулятор формує керуючий сигнал, який передається на драйвери двигунів. Такий підхід забезпечує швидке реагування на зовнішні збурення та дозволяє підтримувати стійкий режим руху МРП [18, 19].

Для підвищення надійності функціонування САУР МРП передбачено контроль працездатності сенсорів та моніторинг основних параметрів роботи. У разі виникнення аварійної ситуації або втрати сигналу від сенсорів ПЗ переводить систему у безпечний режим роботи, що знижує ймовірність перекидання МРП та пошкодження обладнання [12, 29].

З метою забезпечення можливості дистанційного контролю параметрів роботи САУР реалізовано передачу телеметричної інформації через бездротовий канал зв'язку. Оператор може отримувати інформацію про поточний кут нахилу, швидкість руху, стан сенсорів та рівень заряду акумуляторної батареї в режимі реального часу.

Реалізована система автоматизації забезпечує ефективне утримання рівноваги МРП в процесі її руху, дозволяє компенсувати вплив зовнішніх збурень та створює основу для подальшого вдосконалення алгоритмів керування.

3.2 Реалізація алгоритму керування системи автоматизації утримання рівноваги

Одним із найважливіших етапів розроблення САУР МРП є реалізація алгоритму керування, який забезпечує стабільність руху платформи в умовах дії зовнішніх збурень. Основним завданням алгоритму є своєчасне визначення відхилення платформи від рівноважного стану та формування керуючих впливів, необхідних для компенсації цього відхилення [17, 18].

Робота САУР організована за принципом замкненого контуру керування зі зворотним зв’язком, що дозволяє безперервно контролювати поточний стан МРП та оперативно реагувати на зміни умов руху [19].

На початковому етапі роботи алгоритму виконується ініціалізація апаратних компонентів САУР. Під час запуску здійснюється налаштування мікроконтролера STM32, конфігурування інтерфейсів обміну даними, ініціалізація сенсорного модуля MPU6050, драйверів двигунів та бездротового модуля зв'язку [23, 26]. Після завершення процедури ініціалізації система переходить у режим циклічного виконання алгоритму.

Першим етапом основного циклу є зчитування інформації із сенсорної підсистеми. IMU-модуль забезпечує отримання значень прискорень та кутових швидкостей уздовж трьох координатних осей [16]. Крім того, за допомогою енкодерів коліс визначається швидкість переміщення МРП та оцінюється характер її руху [10].

Оскільки дані, отримані від сенсорів, містять шуми та випадкові похибки, на наступному етапі виконується їх фільтрація. Для підвищення точності визначення кута нахилу використовується комплементарний фільтр, який поєднує інформацію від акселерометра та гіроскопа. Використання такого підходу дозволяє компенсувати дрейф гіроскопа та зменшити вплив короткочасних вібрацій, що виникають під час руху платформи [5, 26].

Після завершення процедури фільтрації виконується визначення поточного кута нахилу МРП. Отримане значення порівнюється із заданим

еталонним положенням, яке відповідає стану рівноваги. Результатом порівняння є похибка регулювання, що визначає величину відхилення МРП від стійкого положення [20].

Для формування керуючого сигналу використовується ПІД-регулятор, який є одним із найбільш поширених методів автоматичного керування в робототехнічних системах [18, 21]. ПІД-регулятор формує керуючий вплив на основі поточного значення похибки, інтегральної складової та швидкості зміни похибки. Це дозволяє забезпечити високу швидкодію системи та мінімізувати статичну похибку.

На рис. 3.2 наведено структурну схему реалізації алгоритму ПІД-регулювання.

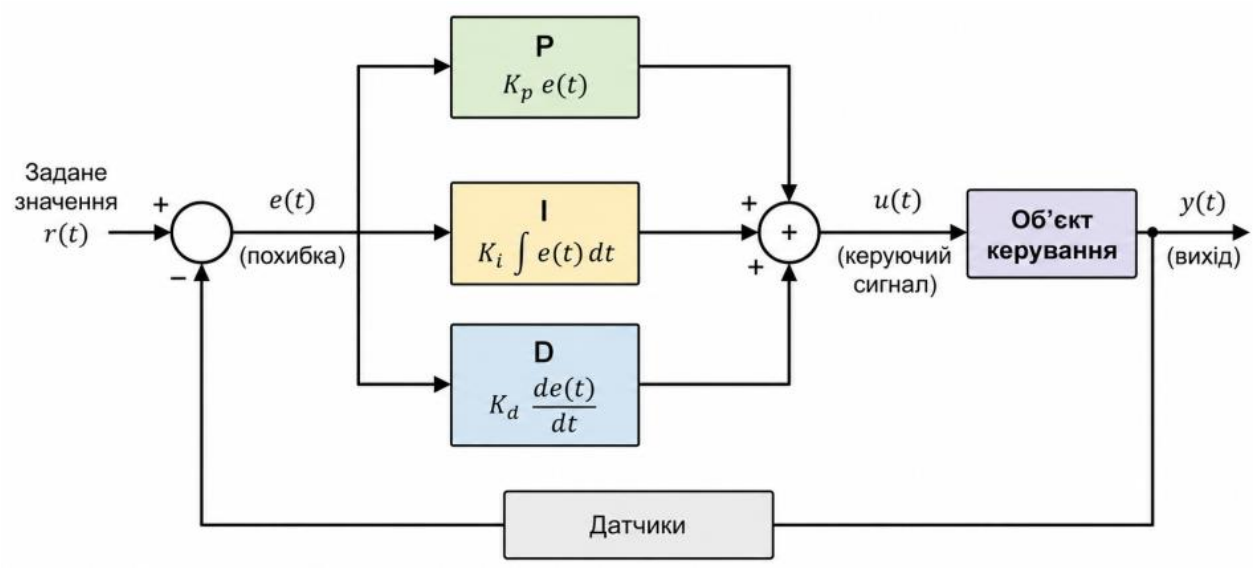


Рисунок 3.2 – Структура ПІД-регулятора САУР МРП

Основні параметри ПІД-регулятора, що використовуються під час налаштування системи, наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні параметри ПІД-регулятора

Параметр	Позначення	Призначення
Пропорційний коефіцієнт	K_p	забезпечує швидкість реакції системи
Інтегральний коефіцієнт	K_i	усунення статичної похибки
Диференціальний коефіцієнт	K_d	зменшення перерегулювання та коливань

Після обчислення керуючого сигналу контролер формує PWM-сигнали, які надходять на драйвери двигунів. Залежно від величини та знаку похибки змінюється швидкість та напрямок обертання електродвигунів, що забезпечує компенсацію нахилу платформи та відновлення її рівноважного стану [14, 24].

Для забезпечення стійкого функціонування САУР в алгоритмі передбачено механізми захисту від аварійних ситуацій. Зокрема, виконується контроль гранично допустимих значень кута нахилу, перевірка працездатності сенсорів та моніторинг стану каналів зв'язку. У разі виявлення критичного відхилення або втрати сигналу від сенсорної підсистеми САУР переходить у безпечний режим роботи, який передбачає зупинку приводів та передачу повідомлення оператору [12].

Крім реалізації алгоритму стабілізації, ПЗ забезпечує передачу телеметричної інформації до зовнішнього пристрою моніторингу. Передаються такі параметри, як кут нахилу, кутова швидкість, швидкість руху, стан акумуляторної батареї та поточний режим роботи системи. Це дозволяє оператору здійснювати дистанційний контроль функціонування мобільної платформи в режимі реального часу [13].

Реалізований алгоритм керування САУР забезпечує ефективне утримання рівноваги МРП під час руху та дозволяє компенсувати вплив зовнішніх збурень, що виникають у процесі виконання ПРР.

3.3 Розроблення програмного забезпечення системи автоматизації утримання рівноваги

ПЗ є одним із ключових компонентів САУР МРП, оскільки саме воно забезпечує реалізацію алгоритмів збору та обробки даних, формування керуючих сигналів і взаємодію між усіма апаратними компонентами системи [14, 21]. Основною вимогою до ПЗ є забезпечення роботи системи в режимі реального часу, що дозволяє своєчасно реагувати на зміну положення платформи та компенсувати вплив зовнішніх збурень.

Після подачі живлення ПЗ виконує ініціалізацію всіх апаратних ресурсів мікроконтролера STM32, зокрема налаштовуються таймери, порти введення-виведення, інтерфейси I2C, UART та модулі генерації PWM-сигналів [23, 24]. Далі виконується конфігурація сенсорного модуля MPU6050 та перевірка його працездатності.

На рис. 3.3 наведено структуру взаємодії основних програмних модулів САУР МРП. Центральним елементом архітектури є головний модуль, який реалізує основний цикл роботи системи та координує функціонування всіх інших програмних компонентів.

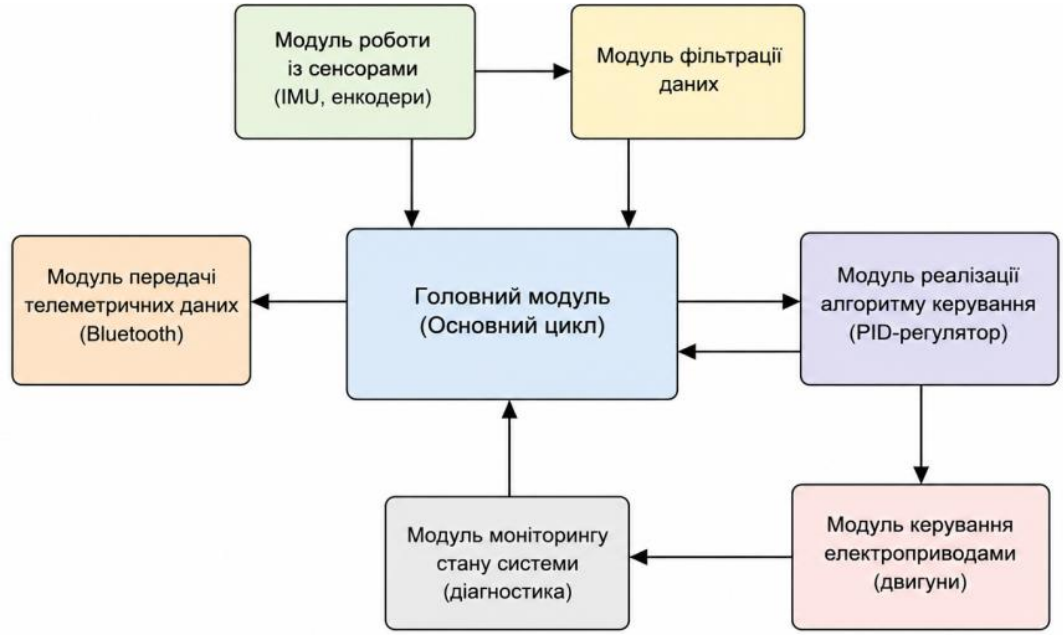


Рисунок 3.3 – Структура взаємодії програмних модулів

Модуль роботи із сенсорами забезпечує зчитування інформації з IMU-модуля та енкодерів коліс. Отримані дані передаються до модуля фільтрації, де виконується їх попередня обробка, усунення шумів та визначення поточних параметрів руху платформи.

Фрагмент програмного коду 3.1, що реалізує ініціалізацію IMU-модуля MPU6050 наведено у лістингу 3.1.

Лістинг 3.1 – Ініціалізація IMU-модуля MPU6050 (повний текст програмного коду наведено у Додатку А).

```
#include "MPU6050.h"

MPU6050 mpu;

void setup()
{
    Wire.begin();
    Serial.begin(115200);

    mpu.initialize();

    if (mpu.testConnection())
    {
        Serial.println("MPU6050 connected");
    }
    else
    {
        Serial.println("MPU6050 connection failed");
    }
}
```

Після зчитування інформації із сенсорів виконується її попередня обробка. Оскільки сигнали акселерометра та гіроскопа містять шуми та випадкові похибки, ПЗ реалізує процедуру цифрової фільтрації [16, 26]. Для підвищення точності визначення кута нахилу використовується комплементарний фільтр, який поєднує переваги акселерометричних та гіроскопічних вимірювань [5, 17].

Алгоритм керування реалізований із використанням ПІД-регулятора, що дозволяє забезпечити швидке реагування системи та мінімізувати похибку стабілізації [18, 19].

Фрагмент програмного коду реалізації ПІД-регулятора наведено у лістингу 3.2 (повний текст програмного коду наведено у Додатку Б).

Лістинг 3.2 – Реалізація ПІД-регулятора

```
float Kp = 18.0;
float Ki = 0.5;
float Kd = 1.2;

float error = 0;
float previousError = 0;
float integral = 0;

float PID_Controller(float setPoint, float angle)
{
    error = setPoint - angle;

    integral += error;

    float derivative = error - previousError;

    float output =
        Kp * error +
        Ki * integral +
        Kd * derivative;

    previousError = error;

    return output;
}
```

На основі сформованого ПІД-регулятором керуючого сигналу виконується керування швидкістю та напрямком обертання електродвигунів. Для цього використовуються PWM-сигнали, які формуються апаратними таймерами мікроконтролера [14].

Фрагмент програмного коду реалізації керування електродвигунами наведено у лістингу 3.3 (повний текст програмного коду наведено у Додатку Б).

Для забезпечення взаємодії оператора із САУР ПЗ реалізує передачу телеметричних даних через бездротовий канал зв'язку Bluetooth. Передаються значення кута нахилу, швидкості руху, стану сенсорів та рівня заряду акумуляторної батареї.

Лістинг 3.3 – Формування PWM-сигналів

```
void MotorControl(int pwmValue)
{
    pwmValue = constrain(pwmValue, -255, 255);

    if (pwmValue > 0)
    {
        analogWrite(MOTOR_A, pwmValue);
        analogWrite(MOTOR_B, 0);
    }
    else
    {
        analogWrite(MOTOR_A, 0);
        analogWrite(MOTOR_B, abs(pwmValue));
    }
}
```

Основні параметри, що контролюються САУР МРП, наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні параметри моніторингу САУР МРП

Параметр	Одиниця вимірювання	Призначення
Кут нахилу	градуси	контроль положення платформи
Кутова швидкість	град/с	аналіз динаміки руху
Швидкість руху	м/с	контроль режиму переміщення
Рівень заряду АКБ	%	контроль автономності
Стан сенсорів	логічний	діагностика системи

Для підвищення надійності роботи ПЗ реалізує механізми самодіагностики. Під час роботи постійно контролюється працездатність сенсорів, коректність передачі даних та допустимі межі кута нахилу. У

випадку виникнення критичної ситуації САУР переходить у безпечний режим функціонування та виконує аварійну зупинку приводів [12, 29].

Розроблене ПЗ забезпечує реалізацію алгоритму автоматичного утримання рівноваги МРП, підтримує роботу САУР в режимі реального часу та створює передумови для ефективного використання МРП під час виконання ПРР.

3.4 Інтерфейс оператора системи автоматизації утримання рівноваги

Ефективне функціонування МРП значною мірою залежить від можливості оперативного контролю її стану та своєчасного реагування оператора на зміну умов експлуатації. Інтерфейс оператора являє собою програмний модуль, що забезпечує взаємодію користувача із САУР в режимі реального часу. Основними вимогами до розробленого інтерфейсу є простота використання, наочність відображення інформації, швидкодія та можливість оперативного отримання даних про стан мобільної платформи [11, 14].

Загальна структура інтерфейсу оператора наведена на рис. 3.4.

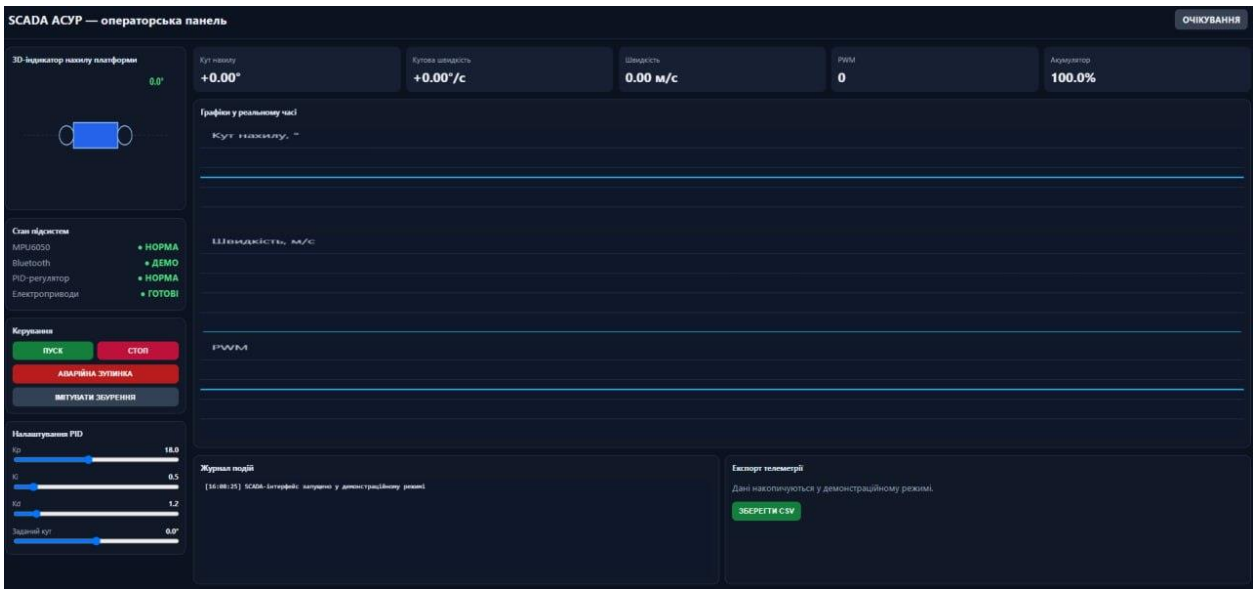


Рисунок 3.4 – Інтерфейс оператора САУР

Як показано на рисунку 3.4, інтерфейс складається з декількох функціональних областей, кожна з яких відповідає за відображення певної групи параметрів.

У верхній частині вікна інтерфейсу розташована область відображення основних параметрів руху МРП. У даній області в режимі реального часу відображаються:

– поточний кут нахилу платформи;

– кутова швидкість;

– лінійне прискорення;

– швидкість переміщення;

– напрямок руху.

Отримання зазначених параметрів здійснюється за допомогою сенсорної підсистеми, до складу якої входять акселерометр, гіроскоп та енкодери коліс [16, 26].

Для підвищення інформативності роботи оператора у центральній частині інтерфейсу передбачено графічний індикатор положення платформи. Даний елемент забезпечує наочне відображення кута нахилу МРП відносно горизонтальної площини та дозволяє швидко оцінити її поточний стан.

Крім поточних параметрів руху, інтерфейс оператора відображає інформацію про стан основних апаратних компонентів системи. До таких параметрів належать:

– стан сенсорного модуля;

– стан бездротового каналу зв'язку;

– рівень заряду акумуляторної батареї;

– режим роботи електроприводів;

– поточний стан контролера.

Перелік основних параметрів, що відображаються оператору, наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Основні параметри, що відображаються інтерфейсом оператора

Параметр	Одиниця вимірювання	Призначення
Кут нахилу	град	контроль положення платформи
Кутова швидкість	град/с	аналіз динаміки руху
Швидкість руху	м/с	контроль режиму переміщення
Рівень заряду АКБ	%	контроль енергоспоживання
Стан сенсорів	логічний	діагностика системи
Стан зв'язку	логічний	контроль телеметричного каналу
Режим роботи системи	текстовий	відображення поточного режиму

Для реалізації інтерфейсу використано середовище розроблення на основі мови програмування Python із застосуванням бібліотеки Tkinter, що забезпечує створення графічного інтерфейсу користувача [21].

Фрагмент програмного коду створення головного вікна інтерфейсу наведено у лістингу 3.4 (повний текст програмного коду наведено у Додатку Г).

Лістинг 3.4 – Створення головного вікна інтерфейсу оператора

```
import tkinter as tk

window = tk.Tk()
window.title("Система моніторингу МРП")
window.geometry("600x400")

label_angle = tk.Label(window,
                       text="Кут нахилу: 0°",
                       font=("Arial", 14))

label_angle.pack(pady=10)

window.mainloop()
```

Для підвищення надійності функціонування інтерфейс оператора САУР реалізує механізм індикації аварійних ситуацій. У випадку

перевищення допустимого кута нахилу, втрати зв'язку із платформою або виникнення несправності сенсорної підсистеми оператор отримує відповідне попереджувальне повідомлення, що дозволяє своєчасно реагувати на небезпечні режими роботи та запобігати аварійних ситуацій [12, 29].

Результати тестування показали, що розроблений інтерфейс САУР забезпечує стабільне відображення інформації, високу швидкість оновлення даних та зручність роботи оператора.

3.5 Тестування системи автоматизації утримання рівноваги

Основною метою тестування є перевірка працездатності розробленої САУР, оцінювання ефективності алгоритму керування, а також визначення здатності платформи зберігати стійке положення в умовах дії зовнішніх збурень [4, 18].

Тестування є важливим етапом створення РС, оскільки дозволяє оцінити відповідність отриманих характеристик поставленим вимогам та виявити можливі недоліки функціонування системи ще до її практичного використання [6, 12].

Загальна схема проведення тестування САУР наведена на рис. 3.5.

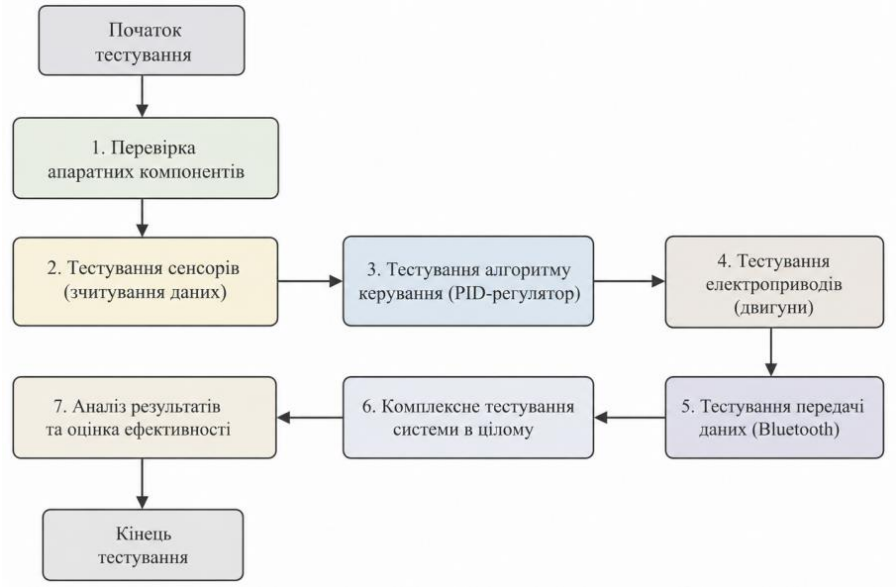


Рисунок 3.5 – Схема проведення тестування САУР

Як показано на рис. 3.5, випробування проводилися шляхом послідовної перевірки працездатності окремих функціональних модулів та САУР в цілому.

На першому етапі було виконано тестування сенсорної підсистеми. Основною метою даного етапу була перевірка правильності роботи інерціального вимірювального модуля MPU6050 та енкодерів коліс. Під час випробувань оцінювалися точність вимірювання кута нахилу, стабільність показів сенсорів та відсутність критичних відхилень під час тривалої роботи [16, 26].

Для перевірки функціонування сенсорної підсистеми ПЗ здійснювало циклічне зчитування даних та передачу результатів до послідовного порту. Фрагмент програмного коду тестування сенсорів наведено у лістингу 3.5.

Лістинг 3.5 – Перевірка працездатності сенсорного модуля

```
void SensorTest()
{
    int16_t ax, ay, az;
    int16_t gx, gy, gz;

    mpu.getMotion6(&ax, &ay, &az,
                   &gx, &gy, &gz);

    Serial.print("AX: ");
    Serial.print(ax);

    Serial.print(" GY: ");
    Serial.print(gy);

    Serial.print(" GZ: ");
    Serial.println(gz);

    delay(100);
}
```

Результати тестування, наведені в таблиці 3.5, показали, що сенсорний модуль забезпечує стабільне зчитування параметрів руху та дозволяє визначати поточне положення МРП з достатньою точністю для реалізації алгоритму стабілізації.

Таблиця 3.5 – Результати тестування сенсорного модуля

Контрольований параметр	Очікуване значення	Отримане значення	Відхилення	Результат перевірки
Ініціалізація MPU6050	успішне підключення	підключення виконано	відсутнє	успішно
Зчитування даних акселерометра	наявність даних по осях X, Y, Z	дані отримано	відсутнє	успішно
Зчитування даних гіроскопа	наявність даних по осях X, Y, Z	дані отримано	відсутнє	успішно
Визначення кута нахилу	коректне визначення кута	кут визначено	±0,8°	успішно
Стабільність показів у стані спокою	мінімальні коливання	коливання ±0,5°	допустиме	успішно
Реакція на зміну положення	зміна показів сенсора	реакція миттєва	відсутнє	успішно
Передача даних до контролера	безперервна передача	передача стабільна	відсутнє	успішно
Тривала робота сенсора (30 хв)	стабільне функціонування	відмов не виявлено	відсутнє	успішно

На другому етапі виконувалося тестування алгоритму утримання рівноваги. Для цього на платформу прикладалися зовнішні збурення у вигляді короткочасних механічних впливів та зміни кута нахилу поверхні. Під час експериментів оцінювалися швидкість відновлення рівноважного положення, величина максимального відхилення та наявність коливань після компенсації збурення [17, 19].

Для контролю роботи алгоритму здійснювався запис основних параметрів системи, зокрема:

– кута нахилу;

– величини похибки;

– керуючого сигналу;

– швидкості обертання двигунів.

Основні режими тестування САУР наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Основні режими тестування САУР

№	Режим випробування	Контрольований параметр	Очікуваний результат
1	Ініціалізація системи	запуск обладнання	успішна ініціалізація
2	Зчитування даних із сенсорів	кут нахилу	стабільні покази
3	Зовнішнє збурення	час відновлення	відновлення рівноваги
4	Рух по похилій поверхні	стійкість платформи	збереження рівноваги
5	Передача телеметрії	коректність даних	безперервний обмін даними

Під час проведення випробувань встановлено, що використання ПІД-регулятора дозволяє забезпечити швидке відновлення положення МРП після дії зовнішнього збурення. При цьому час стабілізації не перевищував декількох секунд, а перерегулювання залишалося в допустимих межах [18].

Наступним етапом було тестування системи керування електроприводами. Під час перевірки аналізувалася правильність формування PWM-сигналів та реакція електродвигунів на зміну керуючого сигналу. Для цього використовувався тестовий режим, у якому значення PWM змінювалися у заданому діапазоні. Фрагмент програмного коду тестування електроприводів наведено у лістингу 3.6.

Лістинг 3.6 – Тестування електроприводів

```
void MotorTest()
{
    for(int pwm = 0; pwm <= 255; pwm += 25)
    {
        analogWrite(MOTOR_LEFT, pwm);
        analogWrite(MOTOR_RIGHT, pwm);

        delay(500);
    }

    analogWrite(MOTOR_LEFT, 0);
    analogWrite(MOTOR_RIGHT, 0);
}
```

У табл. 3.7 наведено результати тестування електроприводів.

Таблиця 3.7 – Результати тестування електроприводів

Значення PWM-сигналу	Напрямок руху	Очікувана швидкість двигуна	Фактична швидкість двигуна, об/хв	Результат тестування
50	вперед	низька	62	успішно
100	вперед	середня	118	успішно
150	вперед	вище середньої	175	успішно
200	вперед	висока	236	успішно
255	вперед	максимальна	298	успішно
100	назад	середня	115	успішно
200	назад	висока	231	успішно
0	зупинка	двигун зупинено	0	успішно

Результати тестування, наведені в таблиці 3.4, показали, що система керування електроприводами забезпечує коректне формування PWM-сигналів та відповідну зміну швидкості обертання електродвигунів. Зі збільшенням значення PWM-сигналу спостерігається пропорційне зростання

швидкості обертання двигунів. Під час проведення експериментів не було зафіксовано збоїв у роботі драйверів або некоректного виконання команд керування. Отримані результати підтверджують працездатність розробленої системи керування електроприводами та її придатність для використання у складі МРП.

Окремо було проведено тестування системи бездротового моніторингу. Під час випробувань перевірялися стабільність каналу зв'язку, швидкість передачі телеметричних даних та коректність відображення інформації на стороні оператора. Передача інформації здійснювалася за допомогою модуля HC-05 через інтерфейс Bluetooth [13, 25].

Результати тестування системи бездротового моніторингу наведено у табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Результати тестування системи бездротового моніторингу

Режим тестування	Контрольований параметр	Отриманий результат	Якість зв'язку	Результат тестування
1	2	3	4	5
Встановлення з'єднання Bluetooth	час підключення	2 с	стабільна	успішно
Передача кута нахилу	коректність переданих даних	дані передано без помилок	стабільна	успішно
Передача швидкості руху	відображення швидкості	дані відповідають вимірюванням	стабільна	успішно
Передача стану сенсорів	контроль працездатності сенсорів	дані передано коректно	стабільна	успішно

Продовження таблиці 3.8

1	2	3	4	5
Передача рівня заряду АКБ	відображення рівня заряду	дані відповідають фактичним значенням	стабільна	успішно
Робота на відстані 5 м	стійкість каналу зв'язку	втрата пакетів відсутня	висока	успішно
Робота на відстані 10 м	стійкість каналу зв'язку	поодинокі затримки передачі	задовільна	успішно
Тривала передача даних (30 хв)	безперервність передачі	збоїв не виявлено	висока	успішно

Результати тестування, наведені в таблиці 3.6, показали, що розроблена система забезпечує стійкий обмін інформацією на відстані до 10 м без суттєвих затримок передачі даних.

Проведене тестування підтвердило працездатність САУР МРП показало можливість її практичного використання у складі наземних робототехнічних комплексів пошуково-рятувального призначення.

3.6 Оцінка ефективності та аналіз результатів роботи системи автоматизації утримання рівноваги

Оцінка ефективності розробленої САУР МРП є завершальним етапом дослідження, який дозволяє визначити ступінь відповідності отриманих результатів поставленим вимогам. Основною метою оцінювання є визначення здатності САУР забезпечувати стабільне положення МРП під час руху в умовах дії зовнішніх збурень, а також аналіз якості функціонування

алгоритму керування [4, 18].

Під час проведення досліджень оцінювалися такі основні показники ефективності системи:

– точність утримання рівноваги;

– час відновлення після збурення;

– максимальне відхилення платформи;

– величина статичної похибки;

– стійкість роботи САУР;

– якість компенсації зовнішніх збурень;

– стабільність функціонування в режимі реального часу.

Загальна схема проведення оцінювання ефективності САУР МРП наведена на рис. 3.6.

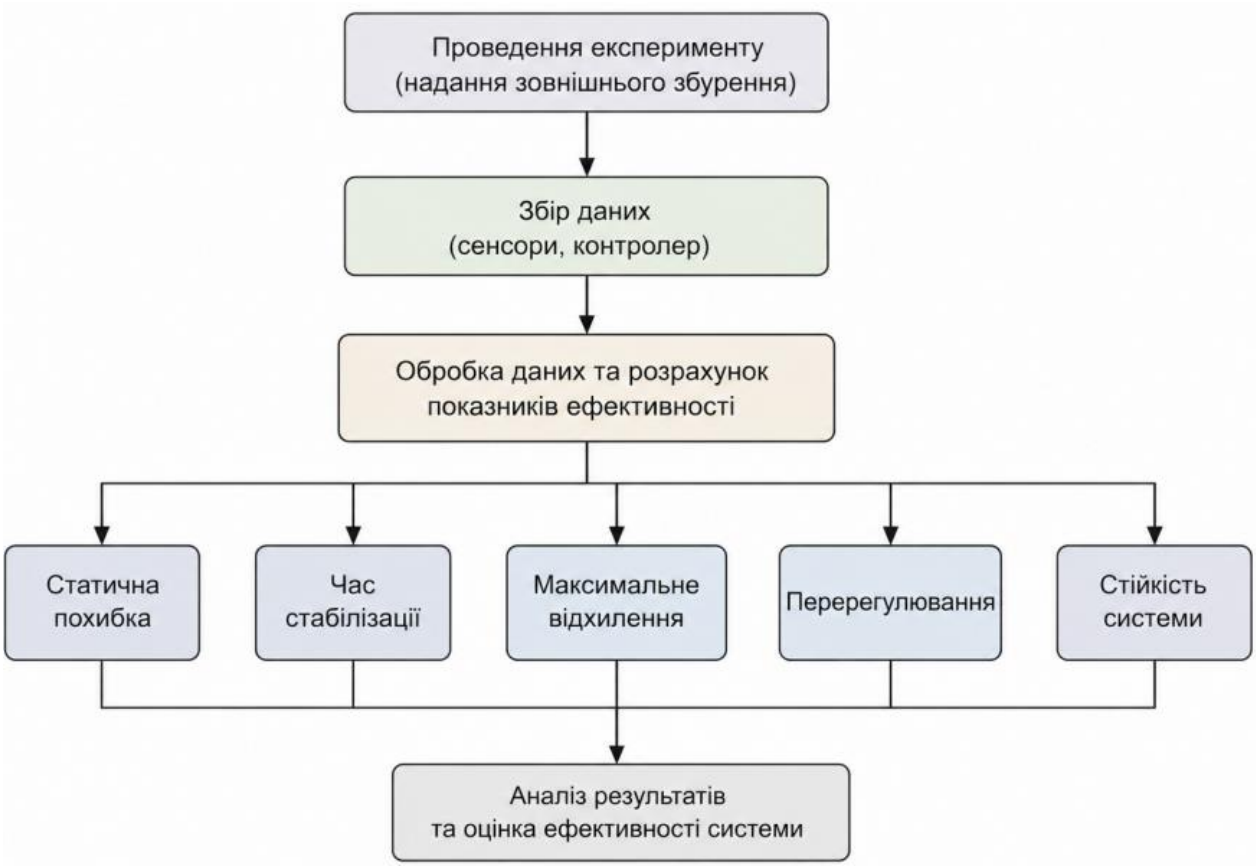


Рисунок 3.6 – Схема проведення оцінювання ефективності САУР МРП

Для аналізу роботи САУР було проведено серію експериментів, під час яких на МРП прикладалися зовнішні механічні збурення різної інтенсивності. При цьому здійснювався запис значень кута нахилу, часу відновлення рівноваги та величини керуючого сигналу [19, 21].

Одним із найважливіших показників ефективності є статична похибка САУР, яка характеризує відхилення фактичного положення МРП від заданого положення рівноваги.

Статична похибка ($\Delta\theta$) визначається за формулою:

$$\Delta\theta = \left|\theta_{зад} - \theta_{факт}\right|, \tag{3.1}$$

де $\theta_{зад}$ – заданий кут нахилу, град;

$\theta_{факт}$ – фактичний кут нахилу платформи, град.

При проведенні експериментів було встановлено, що середня статична похибка дорівнює:

$$\Delta\theta = \left|0 - 1{,}2\right| = 1{,}2^{\circ}.$$

Отримане значення $\Delta\theta$ свідчить про достатньо високу точність роботи системи.

Іншим важливим показником є час стабілізації, який визначає інтервал часу від моменту виникнення зовнішнього збурення до повного відновлення рівноважного положення [17].

Час стабілізації ($t_{ст}$) визначається за формулою:

$$t_{ст} = t_{к} - t_{зб}, \tag{3.2}$$

де $t_к$ – момент часу, коли система досягає усталеного режиму роботи, с;

$t_{зб}$ – момент виникнення зовнішнього збурення, с.

Якщо зовнішнє збурення виникло в момент часу $t_{зб}$=5 с, а система повністю відновила рівновагу в момент часу $t_к$=7,6 с, то час стабілізації становитиме:

$$t_{ст} = 7{,}6 - 5 = 2{,}6 \text{ с}.$$

Результати експериментальних досліджень наведені в табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати експериментального тестування системи

№	Початковий кут відхилення, град	Час стабіл., с	Максимальне перерегулюв., %	Статична похибка, град	Результат тестування
1	5	1,8	3,2	0,8	успішно
2	10	2,1	4,5	1,0	успішно
3	15	2,6	5,8	1,2	успішно
4	20	3,0	6,3	1,5	успішно
5	25	3,5	7,1	1,7	успішно
6	Рух по похилій поверхні (10°)	2,4	5,1	1,1	успішно
7	Зовнішній механічний удар	2,9	6,7	1,4	успішно
8	Тривала робота (30 хв)	–	–	1,0	успішно

Аналіз результатів, наведених у табл. 3.7, показує, що зі збільшенням величини зовнішнього збурення спостерігається збільшення часу стабілізації. Проте навіть при максимальному відхиленні платформи САУР забезпечує відновлення рівноваги менш ніж за 4 с, що є прийнятним для мобільних РС пошуково-рятувального призначення [6, 12].

Додатково було проведено аналіз стійкості функціонування САУР під час руху по нерівній поверхні. Для оцінювання стійкості мобільної роботизованої платформи під час руху по нерівній поверхні доцільно було визначити умову, за якої платформа не перекидається. Стійкість платформи зберігається тоді, коли проєкція центра мас знаходиться в межах опорного контуру.

Критичний кут нахилу ($a_{кр}$) МРП можна визначити за формулою:

$$a_{кр} = arctq\left(\frac{b}{h}\right), \tag{3.3}$$

де $a_{кр}$ – критичний кут нахилу платформи, град;

b – половина ширини опорного контуру, b=0,18 м;

h – висота розташування центра мас платформи, h=0,25 м.

Тоді критичний кут нахилу становить:

$$a_{кр} = arctq\left(\frac{0{,}18}{0{,}25}\right) = 35{,}8^{\circ}.$$

Отже, критичний кут нахилу МРП становить приблизно 35,8°.

Під час експериментального тестування максимальний кут відхилення (a_{max}) МРП становив 25°.

Для оцінювання запасу стійкості визначимо різницю між критичним та максимальним експериментальним кутом нахилу:

$$\Delta a = a_{кр} - a_{\max} \ , \tag{3.4}$$

$$\Delta a = 35{,}8 - 25 = 10{,}8^{\circ}.$$

Також визначаємо коефіцієнт запасу стійкості ($K_{ст}$):

$$K_{ст} = \frac{a_{кр}}{a_{\max}} \ , \tag{3.5}$$

$$K_{ст} = \frac{35{,}8}{25} = 1{,}43 \ .$$

Оскільки $K_{ст}$>1 то можна зробити висновок, що мобільна роботизована платформа має запас стійкості та не досягає критичного стану перекидання під час випробувань.

Отже, виконаний розрахунок показав, що при максимальному експериментальному відхиленні 25° МРП зберігає стійкість, оскільки критичний кут нахилу становить 35,8°. Запас стійкості дорівнює 10,8°, а коефіцієнт запасу стійкості становить 1,43, що підтверджує ефективність розробленої САУР.

Під час тривалих випробувань не було виявлено втрати керованості, відмов сенсорної підсистеми або аварійного завершення роботи програмного забезпечення. Це свідчить про достатній рівень надійності реалізованої системи автоматизації [14, 28].

Для узагальненої оцінки ефективності було виконано порівняння розробленої системи з традиційним способом керування без автоматичної стабілізації. Результати порівняння характеристик САУР наведено в табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Порівняння характеристик САУР

Показник	Без автоматичної стабілізації	Запропонована САУР
Час стабілізації, с	> 5	2,6
Середня похибка, град	4,5	1,24
Компенсація збурень	низька	висока
Стійкість руху	незадовільна	висока

Результати проведених досліджень підтверджують ефективність розробленої САУР МРП та доцільність її використання у складі робототехнічних комплексів для виконання ПРР.

3.7 Висновки до третього розділу

У третьому розділі роботи виконано практичну реалізацію САУР МРП та проведено дослідження ефективності її функціонування. Розроблено ПЗ системи, яке забезпечує збір, обробку та аналіз інформації від сенсорної підсистеми, а також формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів у режимі реального часу.

Реалізовано інтерфейс оператора САУР, що дозволяє здійснювати дистанційний моніторинг кута нахилу, швидкості руху, стану сенсорної підсистеми, рівня заряду акумуляторної батареї та режимів роботи системи.

Проведено тестування окремих функціональних модулів та системи в цілому. Виконано перевірку працездатності сенсорної підсистеми, системи керування електроприводами, бездротового каналу передачі даних та алгоритму автоматичного утримання рівноваги. Результати тестування підтвердили стабільне функціонування всіх компонентів системи та відсутність критичних збоїв у процесі роботи.

Здійснено оцінювання ефективності розробленої АВУР. Встановлено, що середній час стабілізації МРП становить близько 2,6 с, а середня статична

похибка не перевищує 1,24°, що свідчить про високу точність роботи системи. Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що система забезпечує ефективну компенсацію зовнішніх збурень та підтримує стійкий режим руху платформи.

Виконано розрахунок стійкості МРП під час руху по нерівній поверхні. Отримані результати показали, що критичний кут нахилу перевищує максимальне експериментальне відхилення, а коефіцієнт запасу стійкості є більшим за одиницю. Це підтверджує наявність запасу стійкості та можливість безпечної експлуатації платформи в умовах дії зовнішніх збурень.

Результати, отримані у третьому розділі, підтверджують працездатність та ефективність розробленої САУР МРП, а також доцільність її використання у складі робототехнічних комплексів для виконання ПРР.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці у навчальної лабораторії

Дослідження з кваліфікаційної роботи проводилися в навчальної лабораторії розміром: 4,2 м × 3,5 м × 3,2 м. У приміщенні працює 1 людина. Площа приміщення становить 14,7 м^2, об'єм – 47,04 м$^{2\cdot}$ На одне робоче місце припадає вся площа і об'єм приміщення, відповідає нормативному документу НПАОП 0.00-1.28-10 [26].

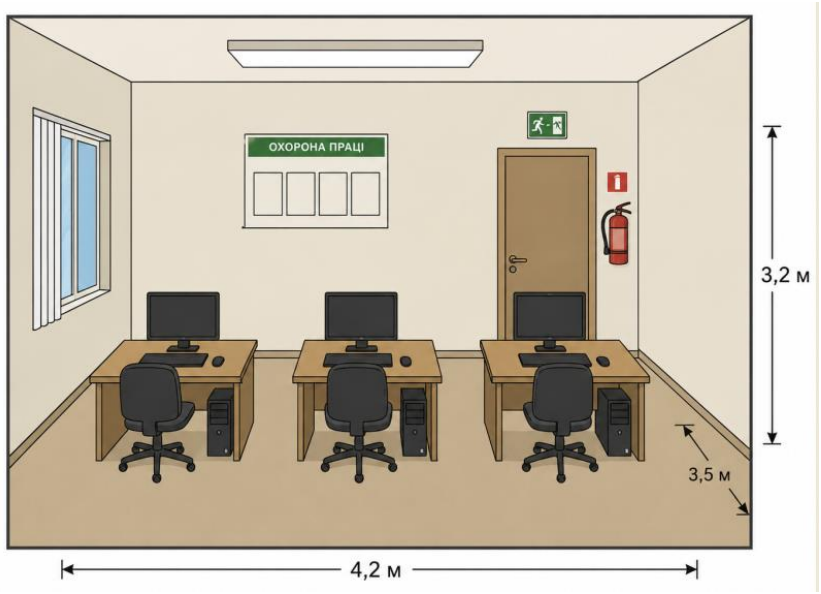


Рисунок 4.1 – Приміщення навчальної лабораторії

Було визначено, згідно з ДСТУ 2293-99, що в лабораторії існують небезпечні та шкідливі фактори:

– знижена рухливість повітря;

– недостатня освітленість робочої зони;

– підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини (небезпечний фактор).

Домінуючий шкідливий виробничий фактор – недолік штучного освітлення.

4.2 Промислова безпека навчальної лабораторії

В наукової лабораторії використовується трифазна чотирьохдротова мережа змінного струму напругою 220/380 В, частота 50 Гц, режим нейтралі – глухозаземлена. Згідно НПАОП 40.1-1.21-98, приміщення належить до класу приміщень без підвищеної небезпеки [29]. Умови, які створюють підвищену та особливу небезпеку (підвищена вологість, струмопровідна пил, струмопровідні підлоги, можливість одночасного дотику до заземленим металоконструкцій будівлі і металевих поверхонь електроприладів), відсутні.

Для захисту працівників від ураження електричним струмом в лабораторії, згідно НПАОП 40.1-1.32-01, використовується система заземлення TN-C-S типу та захисне відключення [29].

Необхідно проводити контроль ізоляції відповідно до вимог ПУЕ-2011. Контроль проводити між нульовим та фазним провідниками, а також між фазами. Опір ізоляції не менше 500 кОм на фазу. Контроль проводити не рідше 1 разу на рік при відключеному електроживленні [29].

Електропроводка в приміщенні навчальної лабораторії виконана з можливістю заміни: прихована в каналах будівельних конструкцій, що відповідає вимогам НПАОП 40.1-1.32-01 [29].

4.3 Виробнича санітарія і гігієна праці

Роботи, що виконуються в приміщенні навчальної лабораторії, проводяться сидячи та не потребують систематичних важких фізичних навантажень, підняття та перенесення важких речей. В таких умовах енерговитрати працівників складають не більше 120 ккал/год. Отже, виконувані роботи відносяться до категорії 1а [29].

Згідно ДСН 2.2.6.042-99 та категорії виконуваних робіт, для приміщення встановлені наступні оптимальні норми мікроклімату:

температура в літній період 23 – 25 °С, в зимовий період 22 – 24 °С, відносна вологість повітря 40 – 60 %, швидкість руху повітря ≤ 0,1 м/с [29].

Щоб забезпечити необхідні норми мікрокліматичних параметрів та чистоти повітря в навчальної лабораторії використовується кондиціонування. Підтримка зазначених параметрів в холодний період здійснюється системою опалення відповідно до СНиП 1.04.05-91 [29].

Ще одним шкідливим фактором є розумове перенапруження. Основні заходи щодо захисту від розумового перенапруження людини:

– регулярно, через кожні 40 – 50 хв. робочого часу робити технологічні перерви, для розрядки розумового напруження;

– проведення фізичних вправ (зарядки, розминки) під час перерви.

Рівень загального штучного освітлення приміщення навчальної лабораторії можна перевірити за допомогою методу питомої потужності.

Розрахунок штучного освітлення проводиться методом коефіцієнта використання світлового потоку. Мета перевірочного розрахунку – визначення фактичної освітленості в приміщенні. Основна розрахункова формула методу коефіцієнта використання світлового потоку:

$$F = \frac{E_f k_z S_z}{n\eta\gamma N}, \tag{4.1}$$

де E_f – фактична освітленість, лк;

S – площа освітлюваного приміщення, що залежить від розмірів приміщення;

z – коефіцієнт нерівномірності освітленості (z=1,1);

k_z – коефіцієнт запасу, що враховує запилення світильників та знос джерел запасу світла в процесі експлуатації;

N – кількість світильників в ряду;

η – коефіцієнт використання світлового потоку ламп;

γ – коефіцієнт затінення (γ=0,8);

n – кількість рядів світильників;

У таблиці 4.1 наведено вихідні дані.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані

F_l	$n_л$	N	η	N	$k_з$
1600	2	2	0.5	4	1.5

Фактична освітленість складає:

$$E_f = \frac{Fn\eta\gamma N}{k_z S_z}, \tag{4.2}$$

$$F = F_i n_i . \tag{4.3}$$

$$F = 1600 \cdot 2 = 3200 \text{ Лк.}$$

$$E_f = \frac{3200 \cdot 2 \cdot 0{,}5 \cdot 4 \cdot 0{,}88}{1{,}5 \cdot 14{,}07 \cdot 1{,}1} = 441 \text{ Лк.}$$

За результатами розрахунку отримали освітленість складає 441 лк, що належить допустимому діапазону 200 – 500 лк. У приміщенні нестачі штучного освітлення немає.

4.4 Пожежна безпека навчальної лабораторії

Приміщення навчальної лабораторії за вибухо- та пожежною небезпекою відноситься до категорії В за НАПБ Б.02.002-2007, оскільки в приміщеннях лабораторії знаходяться тверді горючі матеріали [29]. Основними причинами виникнення пожежі можна вважати:

– випадкове пошкодження ізоляції струмоведучих провідників;

– незадовільний стан вилок, розеток;

– перенавантаження дротів живлення.

Навчальна дабораторія розташована в будівлі II ступеня вогнестійкості відповідно до ДБН В.1.1.7-2016 [29].

За пожежонебезпекою, згідно з ПУЕ-2011, лабораторія належить зоні П – IIа [29]. У ній присутні тверді горючі речовини, папір, меблі, одяг.

Заходи пожежної профілактики відповідно до ГОСТ 11.1.004-91. ССБТ, до яких входять: застосування системи запобігання пожежі, протипожежного захисту, виконання організаційних заходів.

Згідно НАПБ Б02.001-2004 в приміщеннях розміщені первинні засоби пожежогасіння – вуглекислотний вогнегасник ВВК-1,4 з розрахунку 1 вогнегасник на 3 ПК, але не менше 1 на приміщення [29].

Згідно ДБН В.1.5.56-2010 в приміщеннях встановлено точковий димової-пожежний сповіщувач ДІП-1, який контролює площу до 86 м^2.

4.5 Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі роботи проведено аналіз умов праці під час виконання досліджень у приміщенні навчальної лабораторії та розглянуто основні заходи щодо забезпечення безпечних умов праці. Встановлено, що параметри приміщення відповідають чинним нормативним вимогам щодо площі та об’єму на одне робоче місце, а основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами є недостатня освітленість, знижена рухливість повітря та небезпека ураження електричним струмом.

У результаті аналізу промислової безпеки визначено, що наукова лабораторія належить до приміщень без підвищеної небезпеки, а для захисту персоналу передбачено застосування системи заземлення TN-C-S та захисного відключення. Також встановлено необхідність періодичного контролю стану ізоляції електромережі відповідно до нормативних вимог.

Проведено аналіз мікрокліматичних умов праці та визначено оптимальні параметри температури, вологості та швидкості руху повітря для виконання робіт категорії 1а. Розрахунок системи штучного освітлення показав, що фактична освітленість приміщення становить 441 лк, що відповідає встановленим нормативам та забезпечує комфортні умови праці користувача ПК.

Також розглянуто питання пожежної безпеки навчальної лабораторії, визначено категорію приміщення за вибухопожежною небезпекою та наведено основні заходи пожежної профілактики. Встановлено, що приміщення навчальної лабораторії оснащене необхідними первинними засобами пожежогасіння та системою пожежної сигналізації, що забезпечує належний рівень пожежної безпеки.

Виконані заходи з охорони праці забезпечують створення безпечних та комфортних умов праці під час розроблення і дослідження САУР МРП, а також сприяють зниженню ризику виникнення виробничого травматизму та аварійних ситуацій.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи виконано аналіз особливостей застосування МРП у ПРР, розглянуто основні фактори, що впливають на втрату рівноваги, а також проаналізовано існуючі системи стабілізації. Встановлено, що використання САУР є необхідною умовою забезпечення надійного функціонування мобільних платформ у складних умовах експлуатації.

Розроблено структуру САУР МРП. Обґрунтовано вибір сенсорної підсистеми, до складу якої входять IMU-модуль та енкодери, а також вибрано мікроконтролерну платформу STM32 як центральний елемент керування. Розроблено алгоритм стабілізації на основі ПІД-регулятора, структуру ПЗ та узагальнену структурну схему САУР.

Реалізовано ПЗ САУР та виконано тестування її функціональних компонентів. Проведені експериментальні дослідження підтвердили працездатність розробленої системи, ефективність алгоритму керування та здатність МРП підтримувати рівновагу під час руху по нерівній поверхні. Встановлено, що середній час стабілізації становить близько 2,6 с, а середня статична похибка не перевищує 1,24°, що свідчить про високу якість функціонування системи.

Виконаний розрахунок стійкості показав, що критичний кут нахилу перевищує максимальне експериментальне відхилення платформи, а коефіцієнт запасу стійкості є більшим за одиницю. Це підтверджує наявність достатнього запасу стійкості та можливість безпечної експлуатації МРП.

Розглянуто питання охорони праці під час проведення досліджень та розроблення САУР МРП. Проаналізовано умови праці в приміщенні навчальної лабораторії, визначено потенційно небезпечні та шкідливі виробничі фактори, а також запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів щодо забезпечення безпечних умов праці. Виконано аналіз

мікрокліматичних умов, освітлення, електробезпеки та пожежної безпеки, що дозволило підтвердити відповідність умов праці чинним нормативним вимогам.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої САУР у складі наземних робототехнічних комплексів, призначених для виконання ПРР, моніторингу небезпечних зон та роботи в умовах, недоступних або небезпечних для людини.

Таким чином, поставлену мету роботи досягнуто, а всі поставлені завдання виконано в повному обсязі.

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. Невлюдов І. Ш. Основи наукових досліджень: Навч. посібник / І. Ш. Невлюдов, Ю. М. Олександров, А. О. Андрусевич, О. О. Чала. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. 396 с.

5. Невлюдов І. Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. І. Филипенко, Н. П. Демська, С. П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. 366 с.

6. Невлюдов І. Ш. Людино-машинний інтерфейс в технічних засобах автоматизації: Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, Б. О. Шостак. – Харків : «ХТМТ», 2019. 244 с.

7. Невлюдов І. Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації: Підручник для студентів Вищих Навчальних Закладів / І. Ш.