

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,
робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розроблення системи автоматизації моніторингу технічного стану
мобільної роботизованої платформи для надзвичайних ситуацій
на вибухонебезпечних об'єктах
(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,

групи АКТСІ-22-1

Назів АЛЕСКЕРОВ

(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

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ

(власне ім'я, прізвище)

2026 р.

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

«02» липня 2026 р.

Назім АЛЕСКЕРОВ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації,
робототехніки 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 Алескерову Назіму Назимовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматизації моніторингу технічного
стану роботизованої мобільної платформи для надзвичайних ситуацій на
вибухонебезпечних об'єктах

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 моніторингу
мобільної роботизованої платформи; 3.2 Технічні характеристики мобільної
роботизованої платформи; 3.3 Характеристики мікроконтролера STM32;
3.4 Технічні характеристики датчиків; 3.5 Нормативно-технічна документація
з автоматизації керування.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі 4.1

Аналіз об'єкта та існуючих рішень систем автоматизації моніторингу;

4.2 Структурна схема системи автоматизації моніторингу;

4.3 Апаратна частина системи автоматизації моніторингу;

4.4 Програмна частина системи автоматизації моніторингу;;

4.5 Інтерфейс оператора системи автоматизації моніторингу;

4.6 Експериментальні дослідження системи автоматизації моніторингу;

4.7 Заходи з охорони праці;

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

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області та постановка задачі	27.04.26 – 08.05.26	виконано
2	Розроблення апаратної частини системи автоматизації моніторингу	09.05.26 – 25.05.26	виконано
3	Розроблення програмного забезпечення системи автоматизації моніторингу	26.05.26 – 16.06.26	виконано
4	Експериментальні дослідження системи автоматизації моніторингу	17.06.26 – 30.06.26	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	01.07.26 – 04.07.26	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-системою StrikePlagiarism	05.07.26 – 08.07.26	виконано
7	Подання роботи на рецензію	09.07.26 – 12.07.26	виконано
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	13.05.26 – 16.07.26	виконано
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	17.07.26	виконано

Дата видачі завдання “ 27 ” квітня 2026 р.

Здобувач

(підпис)

Назім АЛЕСКЕРОВ

(власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

доцент Рауф АЛЛАХВЕРАНОВ

(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 98 с., 12 табл., 21 рис., 4 дод., 29 джерел.

МОБІЛЬНА РОБОТИЗОВАНА ПЛАТФОРМА, СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ МОНІТОРИНГУ, ТЕХНІЧНИЙ СТАН, НАДІЙНІСТЬ, ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНІ ОБ'ЄКТИ, НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ.

Мета роботи – підвищення надійності та безпеки функціонування мобільної роботизованої платформи для надзвичайних ситуацій.

Об'єкт розробки – процес функціонування мобільної роботизованої платформи для надзвичайних ситуацій в умовах вибухонебезпечного середовища.

Предмет розробки – методи та засоби підвищення надійності функціонування мобільної роботизованої платформи для надзвичайних ситуацій.

У кваліфікаційній роботі запропоновано структуру системи, обґрунтовано вибір апаратних засобів та розроблено алгоритм функціонування з можливістю раннього виявлення відхилень. Реалізовано програмне забезпечення для збору, обробки та візуалізації даних. Проведено тестування системи та оцінено її ефективність. Отримані результати спрямовані на підвищення надійності та безпеки мобільних роботизованих систем.

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

ABSTRACT

Explanatory note: 98 pp., 12 tab., 21 figs., 4 appendices, 29 sources.

MOBILE ROBOTIC PLATFORM, AUTOMATED MONITORING SYSTEM, TECHNICAL CONDITION, RELIABILITY, EXPLOSION-HAZARDOUS FACILITIES, EMERGENCY SITUATIONS.

The goal of this work is to improve the reliability and safety of a mobile robotic platform designed for emergency response.

The scope of the project is the operational process of a mobile robotic platform for emergency response in explosive environments.

The focus of the project is on methods and means of improving the operational reliability of a mobile robotic platform for emergency response.

This thesis proposes a system architecture, justifies the selection of hardware, and develops an operational algorithm capable of early detection of anomalies. Software for data collection, processing, and visualization has been implemented. The system was tested, and its effectiveness was evaluated. The results obtained are aimed at improving the reliability and safety of mobile robotic systems.

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

ЗМІСТ

Перелік скорочень	7
Вступ	8
1 Аналіз предметної області та постановка задачі	11
1.1 Особливості застосування мобільних роботизованих платформ у надзвичайних ситуаціях	11
1.2 Умови експлуатації мобільних роботизованих платформ на вибухонебезпечних об'єктах	14
1.3 Основні параметри технічного стану мобільної роботизованої платформи	17
1.4 Аналіз існуючих систем автоматизації моніторингу	20
1.5 Постановка задачі на розроблення системи моніторингу	26
1.6 Висновки до першого розділу	28
2 Розроблення апаратної частини системи автоматизації моніторингу	30
2.1 Загальна архітектура системи автоматизації моніторингу	30
2.2 Вибір та обґрунтування датчиків системи автоматизації моніторингу	33
2.3 Розроблення структури апаратної частини системи автоматизації моніторингу	36
2.4 Організація збору та передачі даних у автоматизованій системі моніторингу	41
2.5 Розроблення алгоритму функціонування системи автоматизації моніторингу	44
2.6 Висновки до другого розділу	48
3 Розроблення програмного забезпечення системи автоматизації моніторингу	49
3.1 Загальна структура програмного забезпечення	49
3.2 Розроблення алгоритмів обробки даних	54

3.3 Реалізація програмного забезпечення системи автоматизації моніторингу	60
3.4 Інтерфейс оператора системи автоматизації моніторингу	64
3.5 Тестування програмного забезпечення системи автоматизації моніторингу	69
3.5 Висновки до третього розділу	74
4 Експериментальні дослідження системи автоматизації моніторингу	76
4.1 Організація експериментальних досліджень автоматизованої системи моніторингу	76
4.2 Оцінка ефективності системи автоматизації моніторингу	81
4.3 Оцінювання динамічних характеристик системи автоматизації моніторингу	86
4.4 Заходи з безпечних умов праці у науковій лабораторії	90
4.5 Висновки до четвертого розділу	92
Висновки	94
Перелік джерел посилання	96
Додаток А Програмний код мікроконтролера STM32F407.....	99
Додаток Б Програмний код модулів опитування датчиків	105
Додаток В Програмний код бездротової передачі інформації	108
Додаток Г Програмний код інтерфейсу оператора автоматизованої системи моніторингу	111
Додаток Д Демонстраційний матеріал	115

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ВО – вибухонебезпечні об'єкти;

МРП – мобільна роботизована платформа;

НС – надзвичайні ситуації;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПК – персональний комп'ютер;

РС – роботизована система;

САМТС – система автоматизації моніторингу технічного стану.

ВСТУП

Розвиток промисловості, енергетики та інфраструктурних систем супроводжується зростанням кількості технологічно складних і потенційно небезпечних об'єктів. До таких об'єктів належать підприємства нафтогазової, хімічної, енергетичної галузей, а також об'єкти зберігання та транспортування вибухонебезпечних речовин. Їх експлуатація пов'язана з підвищеним рівнем ризику виникнення аварійних ситуацій, що можуть спричинити значні матеріальні втрати, екологічні наслідки та загрозу життю і здоров'ю персоналу.

У таких умовах особливого значення набуває впровадження сучасних автоматизованих і роботизованих систем (РС), здатних виконувати контроль, діагностику та оперативне реагування без безпосередньої участі людини. Мобільні роботизовані платформи (МРП) для надзвичайних ситуацій (НС) є ефективним інструментом для виконання завдань у небезпечних середовищах, зокрема для обстеження територій, моніторингу параметрів технологічних процесів, виявлення джерел небезпеки та участі в аварійно-рятувальних операціях.

Разом із тим ефективність застосування МРП для НС безпосередньо залежить від їх технічного стану та здатності стабільно функціонувати в умовах підвищених навантажень і агресивного середовища. Вибухонебезпечні об'єкти (ВО) характеризуються наявністю горючих газів, пилу, високих температур, вібрацій та інших факторів, що негативно впливають на елементи платформи – електроприводи, сенсорні системи, електроніку та джерела живлення. За таких умов навіть незначні відхилення параметрів можуть призвести до втрати працездатності системи або виникнення аварійної ситуації.

Традиційні підходи до контролю технічного стану, які базуються на періодичних перевірках або обмеженому контролі окремих параметрів, не

забезпечують необхідного рівня оперативності та достовірності діагностики. Це знижує ефективність використання РС та підвищує ризики їх відмов у критичних умовах експлуатації.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення системи автоматизації моніторингу технічного стану (САМТС) МРП для НС, які забезпечують безперервний збір, обробку та аналіз параметрів функціонування у реальному часі. Такі системи дозволяють своєчасно виявляти відхилення від нормальних режимів роботи, прогнозувати можливі відмови та підвищувати загальну надійність і безпеку експлуатації платформи.

Особливістю систем моніторингу для ВО є необхідність врахування підвищених вимог до надійності, швидкодії та стійкості до зовнішніх впливів. Крім того, важливими є питання забезпечення безперервності передачі даних, захищеності інформації та сумісності з існуючими системами управління і диспетчеризації.

Таким чином, підвищення надійності та безпеки функціонування МРП для НС шляхом впровадження систем автоматизації моніторингу технічного стану є актуальною науково-практичною задачею, що має важливе значення для розвитку сучасних систем автоматизації, особливо в умовах експлуатації на ВО.

Мета роботи – підвищення надійності та безпеки функціонування мобільної роботизованої платформи для надзвичайних ситуацій.

Об'єкт розробки – процес функціонування мобільної роботизованої платформи для надзвичайних ситуацій в умовах вибухонебезпечного середовища.

Предмет розробки – методи та засоби підвищення надійності функціонування мобільної роботизованої платформи для надзвичайних ситуацій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати особливості застосування МРП у НС;
- дослідити вплив умов вибухонебезпечного середовища на надійність

роботи МРП.

- визначити інформативні параметри для оцінювання технічного стану платформи;
- провести аналіз існуючих систем моніторингу та оцінити їх ефективність;
- розробити структуру системи автоматизації моніторингу технічного стану МРП;
- обґрунтувати вибір апаратних засобів збору та передачі даних;
- розробити алгоритм раннього виявлення критичних відхилень;
- реалізувати програмне забезпечення (ПЗ) системи моніторингу;
- провести тестування системи та оцінити її ефективність.

Наукова новизна полягає у вдосконаленні підходу до побудови системи автоматизації моніторингу технічного стану МРП для НС шляхом інтеграції контролю ключових параметрів з алгоритмами раннього виявлення критичних відхилень, що дозволяє підвищити достовірність діагностики в умовах вибухонебезпечного середовища.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої системи для підвищення надійності та безпеки експлуатації МРП для НС при виконанні аварійно-рятувальних робіт та моніторингу стану ВО.

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 надзвичайних ситуаціях

Сучасний розвиток робототехніки та автоматизації сприяє активному впровадженню МРП у різні сфери діяльності, зокрема у задачі, пов'язані з ліквідацією наслідків НС. Особливого значення набуває застосування таких платформ на ВО, де існує підвищений ризик для життя і здоров'я персоналу [4, 5].

НС на ВО можуть виникати внаслідок витоку горючих газів, порушення технологічних процесів, аварій обладнання, пожеж або зовнішніх впливів. Такі ситуації характеризуються високою динамічністю розвитку, складністю прогнозування та необхідністю оперативного реагування. У подібних умовах використання людини безпосередньо в зоні небезпеки є вкрай обмеженим або повністю недопустимим, що обумовлює необхідність застосування РС.

МРП для НС, зображені на рис. 1.1, є універсальними технічними засобами, здатними пересуватися по складній місцевості та виконувати широкий спектр завдань. До основних функцій МРП у НС належать:

- дистанційне обстеження території;
- моніторинг параметрів навколишнього середовища (температура, концентрація газів, рівень радіації тощо);
- виявлення джерел небезпеки;
- передача відео- та телеметричної інформації оператору;
- участь у ліквідації наслідків аварій (наприклад, транспортування вантажів, відкриття клапанів, подача засобів пожежогасіння).

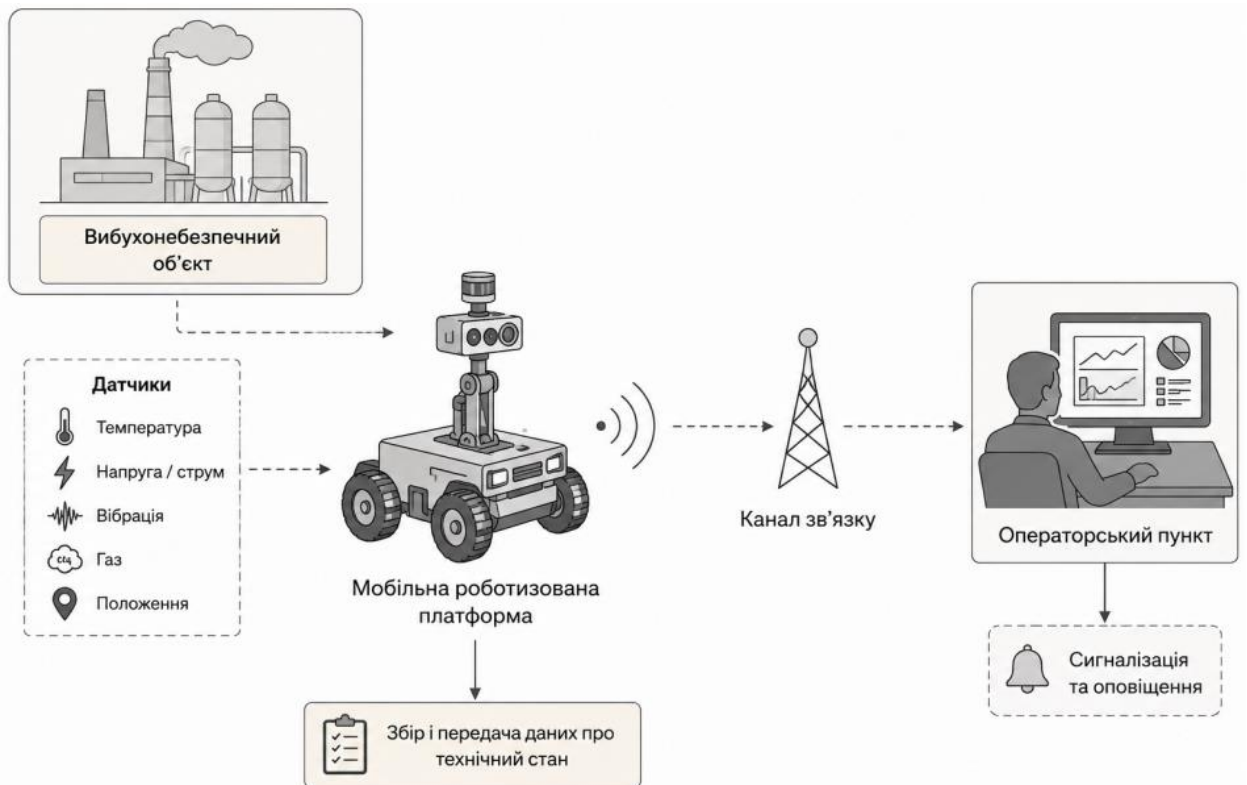


Рисунок 1.1 – Схема застосування МРП для НС

Залежно від умов експлуатації та призначення, МРП можуть мати різну конструкцію. Найбільш поширеними є колісні, гусеничні та комбіновані платформи. Колісні платформи характеризуються високою швидкістю пересування та енергоефективністю, проте мають обмежену прохідність у складних умовах. Гусеничні платформи, навпаки, забезпечують високу прохідність, стабільність та можливість руху по нерівній поверхні, але мають більші енергетичні витрати. Комбіновані конструкції дозволяють частково поєднати переваги обох типів [4, 5].

Однією з ключових особливостей застосування МРП у НС є необхідність їх роботи в умовах невизначеності та обмеженої інформації. МРП повинна бути здатною адаптуватися до змін навколишнього середовища, включаючи зміну рельєфу, появу перешкод, зміну параметрів середовища та інші фактори. Це вимагає використання сучасних сенсорних систем, алгоритмів обробки даних та систем автоматизації управління.

Особливу увагу слід приділити вимогам до надійності та безпеки функціонування МРП. Умови ВО накладають жорсткі обмеження на конструкцію та елементну базу системи. Усі компоненти повинні відповідати вимогам вибухозахисту, мати підвищену стійкість до температурних і механічних впливів, а також забезпечувати безперервну роботу протягом тривалого часу [4, 5].

Важливою складовою ефективного функціонування МРП є САМТС. У процесі роботи платформи відбувається постійна зміна навантажень на механічні та електричні компоненти, що може призводити до їх поступового зносу або раптових відмов. В умовах НС відмова навіть одного елемента системи може призвести до втрати керованості платформи або неможливості виконання поставленого завдання.

Тому особливістю застосування МРП для НС є необхідність реалізації системи безперервного контролю технічного стану, яка забезпечує:

- контроль температури вузлів і агрегатів;
- моніторинг вібраційних характеристик;
- контроль електричних параметрів (струм, напруга, потужність);
- оцінювання стану джерел живлення;
- виявлення відхилень від нормальних режимів роботи.

Ще однією важливою особливістю є необхідність дистанційного керування та передачі даних. У більшості випадків оператор знаходиться поза зоною небезпеки, тому всі дані про стан платформи та навколишнього середовища повинні передаватися каналами зв'язку в реальному часі. Це вимагає використання надійних і захищених систем передачі даних, здатних працювати в умовах перешкод та обмеженої пропускної здатності.

Крім того, сучасні тенденції розвитку робототехніки передбачають інтеграцію МРП у загальні інформаційно-керуючі системи, що дозволяє реалізувати централізований моніторинг, диспетчеризацію та координацію роботи декількох РС одночасно. Це особливо важливо при ліквідації масштабних аварій, де необхідна взаємодія кількох технічних засобів [6].

Отже, МРП є важливим елементом сучасних систем реагування на НС на ВО. Їх ефективне застосування визначається не лише конструктивними особливостями, але й рівнем автоматизації, надійністю функціонування та наявністю САМТС. Це обумовлює необхідність подальшого розвитку методів і засобів автоматизації, спрямованих на підвищення ефективності та безпеки використання роботизованих платформ.

1.2 Умови експлуатації мобільних роботизованих платформ на вибухонебезпечних об'єктах

Експлуатація МРП для НС на ВО характеризується складними та агресивними умовами навколишнього середовища, які суттєво впливають на надійність, довговічність та ефективність функціонування технічних систем. Врахування цих умов є ключовим етапом при розробленні САМТС.

До основних ВО належать нафтогазові підприємства, хімічні виробництва, склади паливно-мастильних матеріалів, шахти, а також об'єкти енергетичної інфраструктури. У таких середовищах присутні специфічні фактори, що створюють небезпеку як для персоналу, так і для РС [5, 7].

1.2.1 Основні фактори впливу навколишнього середовища

Умови експлуатації МРП для НС визначаються сукупністю фізичних, хімічних та механічних факторів, які можуть викликати деградацію елементів системи або їх повну відмову.

На рис. 1.2 наведено фактори впливу на МРП при експлуатації на ВО.

Температурні режими на ВО можуть суттєво відрізнятися від нормальних умов експлуатації: підвищені температури (пожежі, нагріте обладнання), локальні перегріву та різкі перепади температур. Вплив температури призводить до перегріву електродвигунів, деградації ізоляції проводів, зниження ефективності та нестабільної роботи електроніки [5, 7].

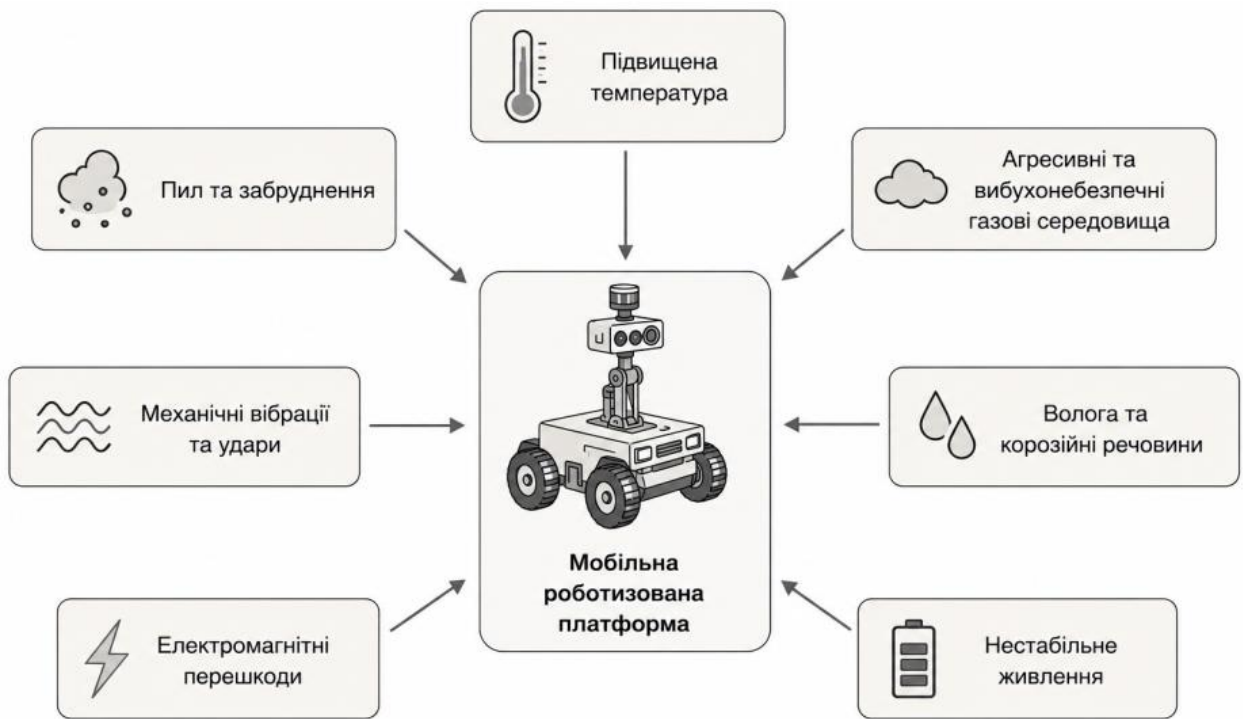


Рисунок 1.2 – Фактори впливу на МРП при експлуатації на ВО

Газові та хімічні ВО характеризуються наявністю горючих та токсичних газів: метан, пропан-бутан, водень та пари нафтопродуктів. Основні ризики та небезпеки – утворення вибухонебезпечних сумішей, корозія металевих елементів, пошкодження сенсорів, а також ризик іскроутворення.

Одним із критичних факторів, що впливають на роботу МРП, є запилені об'єкти. До небезпечних видів належать: вугільний пил, металевий пил та органічні частинки. Наслідки впливу на роботу МРП: забруднення сенсорів, погіршення охолодження, зношування механічних вузлів, а також ризик пилових вибухів.

Під час руху по складному рельєфу МРП піддається механічним навантаженням, ударам і вібраціям. Ці впливи призводять до ослаблення кріплень, пошкодження електроніки, зносу підшипників та порушення роботи датчиків.

Під час експлуатації МРП на промислових об'єктах можливі електромагнітні перешкоди: сильні електромагнітні поля, наведені струми, а

також перешкоди в каналах зв'язку. Наслідками цих перешкод для роботи МРП можуть бути: спотворення сигналів датчиків, збої в передачі даних та помилки у роботі контролера [5, 7].

У табл. 1.1 наведено аналіз впливу факторів середовища на елементи МРП для НС.

Таблиця 1.1 – Вплив факторів середовища на елементи МРП для НС

Фактор впливу	Елемент системи	Можливі наслідки
Температура	електродвигуни	перегрів, зниження ресурсу
Гази	електроніка	корозія, відмова
Пил	сенсори	спотворення показників
Вібрації	механічні вузли	знос, руйнування
ЕМ-перешкоди	канали зв'язку	втрата даних

1.2.3 Класифікація вибухонебезпечних зон та вимоги до мобільних роботизованих платформ

Для визначення вимог до обладнання використовується класифікація вибухонебезпечних зон [8]:

- зона 0 (вибухонебезпечна атмосфера присутня постійно);
- зона 1 (можливе періодичне виникнення);
- зона 2 (малоймовірне короткочасне виникнення).

Класифікація вибухонебезпечних зон визначає вимоги до герметичності корпусу, енергоспоживання, іскробезпеки та допустимих температур поверхні.

Умови експлуатації МРП у ВО визначають низку технічних вимог до них [5, 8]:

- надійність (безвідмовна робота у складних умовах, резервування критичних елементів);
- вибухозахист (відсутність іскроутворення, використання

вибухозахищених компонентів, контроль температури поверхні);

- герметичність (захист від пилу та вологи (IP65–IP68), ізоляція внутрішніх компонентів);

- стійкість до зовнішніх впливів (вібраційна стійкість, ударостійкість, температурна стабільність).

Складні умови експлуатації МРП визначають вимоги саме до САМТС, а саме необхідність безперервного контролю параметрів, використання надійних і захищених датчиків, забезпечення стійкої передачі даних та впровадження алгоритмів раннього виявлення відхилень.

Особливо важливою є здатність САМТС працювати в реальному часі та забезпечувати оперативне інформування оператора про небезпечні зміни параметрів.

Отже, умови експлуатації МРП для НС на ВО характеризуються комплексним впливом несприятливих факторів, які суттєво знижують надійність функціонування технічних систем. Це обумовлює необхідність розроблення ефективних систем САМТС, здатних забезпечити своєчасне виявлення відхилень параметрів і підвищення безпеки роботи платформи.

1.3 Основні параметри технічного стану мобільної роботизованої платформи

Ефективність функціонування МРП у НС значною мірою залежить від її технічного стану. Під технічним станом розуміють сукупність параметрів, що характеризують працездатність, надійність та готовність системи до виконання поставлених завдань [4, 5].

У складних умовах експлуатації, характерних для ВО, контроль технічного стану має здійснюватися безперервно з використанням САМТС.

Основні параметри технічного стану МРП, зображені на рис. 1.3, доцільно поділити на п'ять груп: електричні, теплові, механічні, енергетичні та експлуатаційні [4, 5].

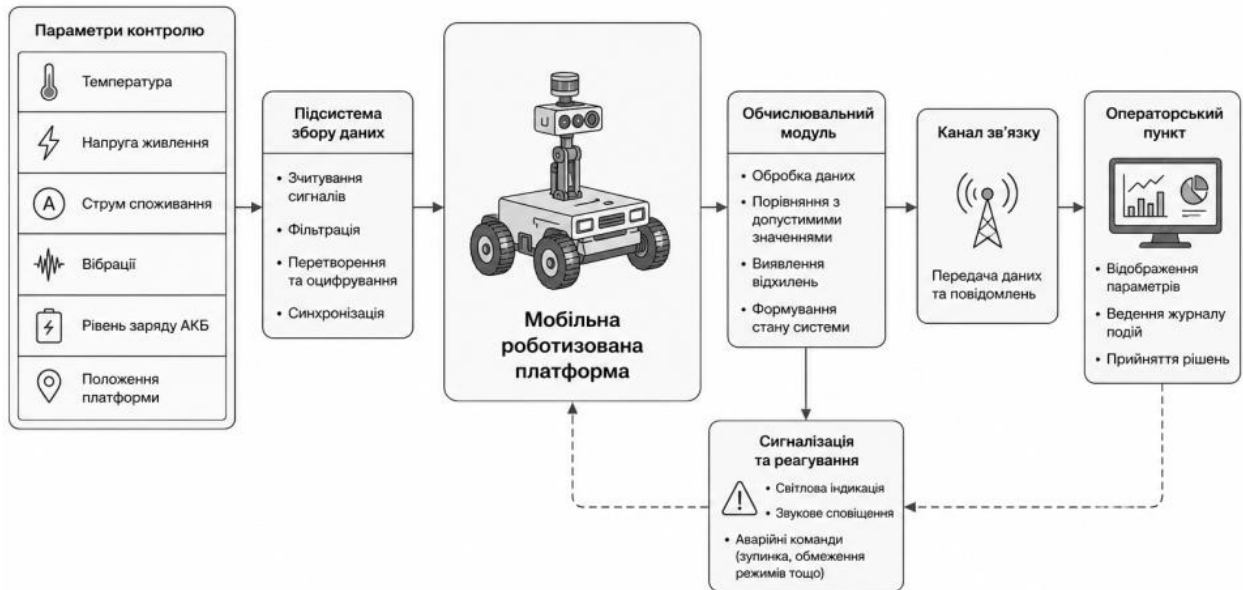


Рисунок 1.3 – Схема контролю параметрів технічного стану МРП

Електричні параметри технічного стану характеризують роботу електроприводів, електроніки та систем живлення. До основних електричних параметрів належать напруга живлення, струм споживання та електрична потужність. Контроль електричних параметрів дозволяє виявляти перевантаження, діагностувати короткі замикання, а також оцінювати ефективність роботи приводів.

Теплові параметри є одним із найважливіших параметрів технічного стану платформи. Контролю підлягають температура двигунів, електронних компонентів та акумуляторів.

Механічний стан платформи оцінюється за рівнем вібрацій, швидкістю руху, прискоренням та навантаженням на вузли. Підвищення вібрацій платформи свідчить про знос підшипників, розбалансування та механічні пошкодження.

Стан джерела живлення визначає автономність роботи платформи. До основних енергетичних параметрів платформи належать: ємність акумулятора, рівень заряду та час роботи.

До експлуатаційних параметрів технічного стану платформ належать: час безперервної роботи, кількість циклів навантаження, пробіг платформи та кількість аварійних подій. Експлуатаційні параметри використовуються для прогнозування ресурсу та планування технічного обслуговування.

У таблиці 1.2 наведено аналіз основних параметрів технічного стану МРП.

Таблиця 1.2 – Основні параметри технічного стану платформи

Група параметрів	Параметр	Одиниця виміру	Значення контролю
Електричні	напруга	В	стабільність
	струм	А	перевантаження
	потужність	Вт	ефективність
Теплові	температура	°С	перегрів
Механічні	вібрація	м/с ²	знос
	швидкість	м/с	стабільність руху
Енергетичні	ємність	А·год	ресурс
	заряд акумулятора	%	автономність
Експлуатаційні	час роботи	год	надійність

Для ефективного моніторингу технічного стану важливо визначити найбільш інформативні параметри. До цих параметрів належать:

- температура двигуна (перегрів → відмова);
- струм споживання (перевантаження);
- вібрації (механічний знос);
- напруга живлення (стабільність роботи).

Саме ці параметри є основою для побудови системи автоматизації моніторингу технічного стану МРП.

CAMTC повинна забезпечувати високу точність вимірювань, швидкодію, стійкість до перешкод, роботу в реальному часі та надійність сенсорів.

Оже, технічний стан МРП визначається сукупністю електричних, теплових, механічних, енергетичних та експлуатаційних параметрів. Їх безперервний моніторинг дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормальних режимів роботи, запобігати аварійним ситуаціям та підвищувати надійність функціонування платформи. Це створює основу для розроблення ефективної CAMTC.

1.4 Аналіз існуючих систем автоматизації моніторингу

У сучасних умовах розвитку робототехніки та автоматизації значна увага приділяється системам моніторингу технічного стану, які забезпечують підвищення надійності, безпеки та ефективності функціонування МРП. Особливо важливими такі системи є для застосування на ВО, де відмова обладнання може призвести до критичних наслідків [4, 5].

1.4.1 Основні підходи до моніторингу технічного стану

Аналіз сучасних рішень показує, що системи моніторингу можна поділити на кілька основних груп [5, 7]:

- вбудовані системи діагностики (реалізуються безпосередньо на платформі, контролюють базові параметри (температура, струм, напруга), забезпечують швидке реагування). До недоліків вбудованих систем діагностики належать обмежена функціональність та відсутність глибокого аналізу;

- віддалені системи моніторингу (передача даних на операторський пункт, централізована обробка, можливість аналізу історії даних). До недоліків віддалених систем моніторингу належить залежність від каналу зв'язку;

- IoT-орієнтовані системи (використання хмарних технологій, масштабованість, інтеграція з іншими системами). До недоліків IoT-орієнтованих систем належать питання безпеки та затримки передачі;
- інтелектуальні системи діагностики (використання алгоритмів аналізу даних, прогнозування відмов, адаптивна робота). До недоліків інтелектуальних систем діагностики належить складність реалізації.

1.4.2 Аналіз найбільш відомих систем автоматизації моніторингу

Boston Dynamics – американська компанія, що спеціалізується на розробці передових РС. Вона відома своїми динамічними, рухливими роботами, які демонструють рівень автономності та рівноваги, що раніше вважався неможливим. Компанія відіграє ключову роль у розвитку робототехніки для промисловості, логістики та досліджень.

Платформи Spot (рис. 1.4) компанії Boston Dynamics мають вбудовану САМТС (контроль температур, стану акумулятора, навантажень, передача даних оператору тощо).



Рисунок 1.4 – Мобільна платформа Spot

До переваг САМТС Boston Dynamics належать – висока надійність та інтеграція з системами керування. До недоліків – обмежений доступ до

внутрішніх алгоритмів і високу вартість.

Clearpath Robotics – канадська компанія, що спеціалізується на автономних мобільних роботах (UGV) для досліджень, промисловості, оборони та освіти. Вона широко відома своїми ROS-ready платформами, які активно використовуються у наукових лабораторіях та R&D по всьому світу. SAMTC для UGV-платформ – це комплекс апаратних і програмних засобів, що забезпечують безперервний контроль працездатності, діагностику та прогнозування відмов.

Для мобільних платформ типу Clearpath Jackal UGV (рис. 1.5), Clearpath Husky UGV, Clearpath Warthog UGV це особливо важливо через роботу у складних умовах (пил, волога, удари, температури).



Рисунок 1.5 – Компактна дослідницька платформа Clearpath Jackal UGV

До переваг SAMTC Clearpath Robotics належать – модульність та масштабованість. До недоліків – потребу в додатковій інтеграції та відсутність готового комплексного моніторингу.

FLIR Systems – американська компанія, що спеціалізується на розробці та виробництві тепловізорів, здатних фіксувати інфрачервоне випромінювання та перетворювати його на зображення, що дозволяє бачити в повній темряві, крізь дим або туман. Серед популярних серій – камери FLIR One – мобільні пристрої, FLIR Scout – спостереження на відкритому

повітрі та FLIR Boson – мініатюрні модулі для інтеграції (рис. 1.6). Продукція використовується в будівництві, медицині, охороні правопорядку, військових та рятувальних операціях.



Рисунок 1.6 – Мініатюрний модуль для інтеграції FLIR Boson

До переваг CAMTC FLIR Systems належать – точний температурний контроль та висока чутливість. До недоліків – контроль лише одного параметру та потреба інтеграції.

Siemens AG – німецький багатогалузевий технологічний концерн, що спеціалізується на промисловій автоматизації, цифровізації, інфраструктурі, транспорті та охороні здоров'я. Промислові системи моніторингу Siemens базуються на екосистемі Simatic, яка охоплює все віди датчиків до хмарних платформ.

Основні напрямки моніторингу:

- візуалізація процесів. Simatic WinCC – SCADA-система для збору даних та управління. Simatic Panels – сенсорні панелі для моніторингу на місцях (рис. 1.7);

- стан обладнання. Siplus CMS – аналіз вібрації та стану підшипників. Drivetrain Analyzer – моніторинг роботи двигунів та приводів;

- енергоменеджмент. Simatic Energy Manager – облік витрат енергії та ресурсів.

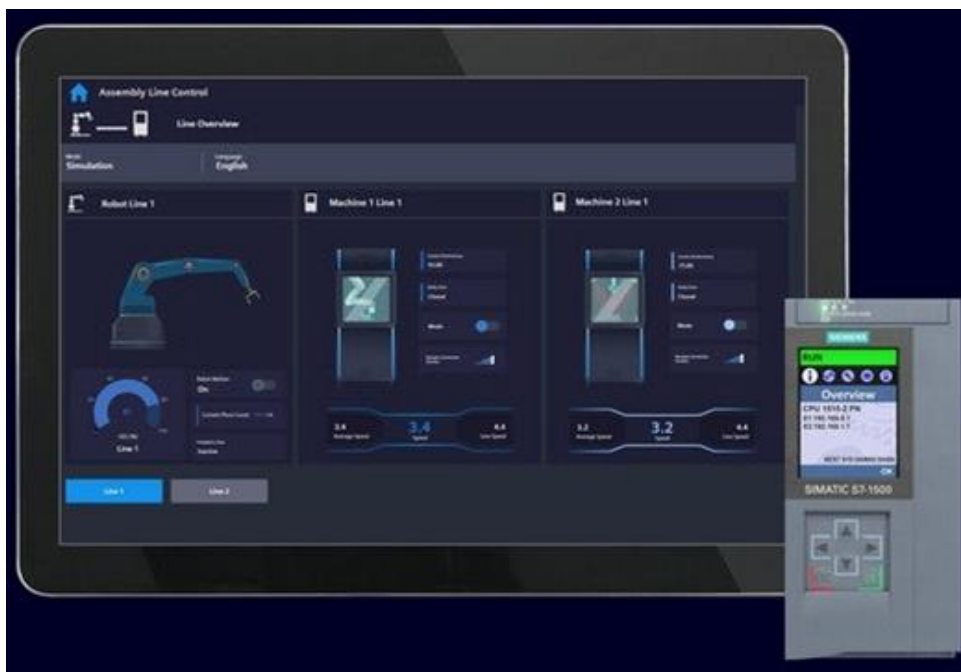


Рисунок 1.7 – CAMTC Simatic Panels

До переваг CAMTC Siemens належать – висока надійність та промисловий рівень. До недоліків – складність адаптації до мобільних платформ та велика вартість.

ABB – міжнародна технологічна компанія, що спеціалізується на електроенергетиці, автоматизації та промисловій робототехніці. ABB IRC5, зображений на рис. 1.8, являє собою контролер робота п'ятого покоління.



Рисунок 1.8 – Контролер ABB IRC5 для промислових роботів

ABB IRC5 поєднує в собі управління рухом, гнучкість, модульність, зручність використання, інтерфейсів додатків і безпека. Це забезпечує високу якість неперевірена час ефективного використання і неймовірну надійність. Продуктивність збільшується за рахунок розширеної діагностики, швидкого розслідування аварій і моніторингу в реальному часі стану робота.

До переваг САМТС АBB належать – точність діагностики, моніторинг в реальному часі та інтеграція з автоматикою. До недоліків – орієнтацію на стаціонарні системи та обмежене застосування в МРП.

У табл. 1.3 наведено результати аналізу САМТС найбільш відомих виробників компаній світу.

Таблиця 1.3 – Порівняльна таблиця САМТС

Компанія	Тип системи	Параметри контролю	Переваги	Недоліки
Boston Dynamics	вбудована	температура, акумулятор, навантаження	висока надійність	закритість, висока вартість
Clearpath Robotics	відкрита (ROS)	залежить від конфігурації	гнучкість, модульність	немає комплексного рішення
FLIR Systems	спеціалізована	температура	точність	обмежений функціонал
Siemens AG	SCADA	повний набір	промислова надійність	складність інтеграції
ABB	промислова	навантаження, стан вузлів	точність	не мобільні системи

У результаті аналізу САМТС встановлено, що існуючі системи мають такі недоліки:

– відсутність комплексного моніторингу всіх параметрів;

- недостатня адаптація до вибухонебезпечних умов;
- обмежена можливість раннього виявлення відмов;
- залежність від каналів зв'язку;
- висока вартість промислових рішень.

Аналіз САМТС показує, що існуючі рішення або спеціалізовані (контролюють 1 параметр), або надто складні (SCADA), або не адаптовані до МРП [5, 7].

Тому необхідна САМТС, яка забезпечує комплексний контроль, працює у реальному часі, адаптована до вибухонебезпечних умов, має алгоритми ранньої діагностики, а також є гнучкою та масштабованою.

Отже, проведений аналіз існуючих САМТС показав, що сучасні рішення не повною мірою задовольняють вимоги до МРП, які працюють у НС на ВО. Основними проблемами є обмежена функціональність, відсутність комплексного підходу до контролю параметрів та недостатня адаптація до складних умов експлуатації.

1.5 Постановка задачі на розроблення системи автоматизації моніторингу

На основі проведеного аналізу предметної області встановлено, що МРП, які застосовуються у НС на ВО, функціонують в умовах значного впливу негативних факторів, що знижують їх надійність та можуть призводити до відмов.

Існуючі САМТС не забезпечують комплексного контролю параметрів у реальному часі, мають обмежені можливості діагностики та не адаптовані до умов експлуатації у ВО. Це обумовлює необхідність розроблення нової системи, яка б забезпечувала підвищення надійності та безпеки функціонування МРП.

З урахуванням визначеної мети кваліфікаційної роботи, задача полягає у розробленні САМТС МРП, яка забезпечує:

- безперервний контроль параметрів у реальному часі;
- обробку та аналіз даних;
- виявлення відхилень від нормальних режимів роботи;
- формування сигналів попередження та аварій;
- передачу інформації оператору.

САМТС, що розробляється, має забезпечувати:

- збір даних (отримання сигналів від датчиків, підтримка аналогових і цифрових інтерфейсів);
- обробку даних (фільтрація сигналів, обчислення параметрів, аналіз стану);
- діагностику (виявлення відхилень, визначення критичних станів, формування попереджень);
- передачу даних (бездротовий зв'язок, робота в умовах перешкод);
- взаємодію з оператором (візуалізація, сигналізація, підтримка прийняття рішень).

При розробленні САМТС необхідно враховувати:

- роботу у вибухонебезпечному середовищі;
- обмеження енергоспоживання;
- необхідність високої надійності;
- вплив зовнішніх факторів (температура, пил, вібрації тощо);
- обмежену пропускну здатність каналів зв'язку.

Функціонально архітектуру САМТС МРП можна представити як сукупність взаємопов'язаних функціональних блоків (рис. 1.9), що забезпечують безперервний процес збору, обробки, аналізу та передачі інформації про стан основних вузлів і агрегатів платформи. До складу системи входять вимірювальні датчики, підсистема збору даних, центральний обчислювальний модуль, блок аналізу технічного стану, система передачі даних, операторський пункт та підсистема сигналізації й реагування.



Рисунок 1.9 – Архітектура САМТС МРП

Алгоритм функціонування САМТС МРП повинен включати операції в наступному порядку:

- збір даних з датчиків;
- первинна обробка сигналів;
- обчислення параметрів;
- порівняння з допустимими значеннями;
- виявлення відхилень;
- формування сигналів;
- передача даних оператору;
- прийняття рішення.

Отже, було сформульовано задачу розроблення САМТС МРП для НС, виконано її формалізацію та визначено основні функціональні вимоги.

1.6 Висновки до першого розділу

У першому розділі роботи проведено аналіз особливостей застосування МРП у НС на вибухонебезпечних об'єктах та досліджено основні фактори, що впливають на надійність їх функціонування. Встановлено, що використання МРП дозволяє суттєво підвищити рівень безпеки виконання аварійно-рятувальних та діагностичних робіт шляхом мінімізації безпосередньої участі людини у небезпечних умовах.

У ході дослідження визначено, що умови експлуатації на ВО характеризуються наявністю значних температурних навантажень, механічних вібрацій, електромагнітних перешкод, пилу, вологи та агресивних газових середовищ. Вплив зазначених факторів може призводити до погіршення роботи електронних компонентів, деградації механічних вузлів та виникнення аварійних ситуацій, що обумовлює необхідність безперервного контролю технічного стану МРП.

Проведено аналіз основних параметрів технічного стану платформи, до яких належать температурні, електричні, механічні, енергетичні та експлуатаційні параметри. Встановлено, що комплексний контроль зазначених параметрів дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормальних режимів роботи та підвищувати надійність функціонування РС.

У результаті аналізу існуючих САМТС визначено, що сучасні рішення мають ряд обмежень, пов'язаних із недостатньою адаптацією до умов вибухонебезпечного середовища, обмеженим набором контрольованих параметрів та відсутністю комплексного підходу до оцінювання технічного стану МРП. Це підтвердило актуальність розроблення нової системи автоматизації, здатної забезпечити підвищення надійності та безпеки експлуатації платформи.

На основі проведених досліджень сформульовано постановку задачі розроблення САМТС МРП. Визначено основні функціональні вимоги до системи, виконано формалізацію процесу оцінювання технічного стану та обґрунтовано необхідність реалізації алгоритмів безперервного контролю, аналізу та передачі даних у реальному часі.

2 РОЗРОБЛЕННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ МОНІТОРИНГУ

2.1 Загальна архітектура системи автоматизації моніторингу

САМТС МРП призначена для забезпечення безперервного контролю параметрів функціонування платформи в умовах НС на ВО. Основним призначенням системи є своєчасне виявлення відхилень у роботі основних вузлів та агрегатів, підвищення надійності функціонування МРП, а також забезпечення безпечного виконання поставлених завдань у складних умовах експлуатації [4, 5].

На рис. 2.1 наведена структурна схема системи автоматизації моніторингу технічного стану МРП.



Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема САМТС

Структурна схема САМТС формується з урахуванням специфіки роботи МРП, необхідності функціонування у реальному часі, впливу зовнішніх факторів та вимог до високої надійності передачі даних. Побудова

системи базується на принципі розподіленої обробки інформації, відповідно до якого частина функцій виконується безпосередньо на борту платформи, а частина – на інтерфейсі оператора.

Функціонально САМТС складається із комплексу взаємопов'язаних апаратних та програмних засобів, які забезпечують отримання інформації від датчиків, її первинну обробку, аналіз технічного стану, передачу даних оператору та формування керуючих або попереджувальних сигналів. Центральним елементом архітектури є МРП, на якій розміщуються вимірювальні пристрої, обчислювальний модуль, система зв'язку та система живлення [4, 5].

У процесі роботи МРП датчики здійснюють безперервний контроль параметрів технічного стану. Отримані сигнали надходять до блоку збору даних, де виконується їх перетворення, синхронізація та попередня фільтрація. На цьому етапі здійснюється усунення шумів, перешкод та нестабільностей сигналів, що особливо важливо в умовах підвищених електромагнітних впливів і вібрацій [5, 7].

Після первинної обробки інформація передається до центрального обчислювального модуля, який виконує аналіз параметрів технічного стану платформи. У цьому блоці реалізуються алгоритми оцінювання стану вузлів і агрегатів, порівняння отриманих параметрів із допустимими значеннями та виявлення критичних відхилень. При перевищенні встановлених порогових значень система формує повідомлення про передаварійний або аварійний стан.

Особливістю архітектури САМТС є використання багаторівневого підходу до контролю параметрів. Частина рішень приймається локально безпосередньо на платформі, що дозволяє забезпечити швидке реагування на небезпечні ситуації навіть у разі втрати зв'язку з оператором. Інша частина інформації передається зовнішньому оператору для детального аналізу та прийняття управлінських рішень [5, 7].

Для передачі інформації використовується бездротовий канал зв'язку, який забезпечує двосторонній обмін даними між платформою та операторським пунктом. Через канал зв'язку передаються телеметричні дані, параметри технічного стану, відеоінформація та сигнали аварійного оповіщення. Крім того, оператор має можливість передавати команди керування та змінювати режими роботи САМТС.

Важливою складовою архітектури є інтерфейс оператора, який виконує функції візуалізації, аналізу та зберігання інформації. На інтерфейсі відображаються поточні параметри роботи МРП, журнали подій, сигнали попередження та результати діагностики. Використання графічного інтерфейсу оператора дозволяє спростити процес контролю технічного стану та забезпечити оперативне реагування на аварійні ситуації.

Архітектура САМТС також передбачає можливість масштабування та інтеграції з іншими інформаційними системами. Це дозволяє використовувати декілька мобільних платформ одночасно, організовувати централізований моніторинг та забезпечувати обмін інформацією між різними рівнями систем автоматизації управління [5, 7].

Окрему увагу при побудові архітектури приділено забезпеченню надійності функціонування системи. Для цього передбачено резервування критичних елементів, контроль стану каналів зв'язку, захист від перевантажень та стабілізацію живлення. Крім того, система повинна забезпечувати працездатність в умовах підвищених температур, пилу, вібрацій та впливу агресивних середовищ.

Загальна архітектура САМТС МРП являє собою багаторівневу інтегровану систему, що забезпечує безперервний контроль параметрів, аналіз технічного стану та оперативне реагування на небезпечні ситуації. Запропонований підхід дозволяє підвищити надійність функціонування МРП та забезпечити безпечне виконання робіт у НС на ВО.

2.2 Вибір та обґрунтування датчиків системи автоматизації моніторингу

Одним із ключових етапів розроблення САМТС МРП є вибір вимірювальних засобів, які забезпечують отримання достовірної інформації про параметри функціонування платформи в умовах НС. Від правильності вибору датчиків значною мірою залежать точність оцінювання технічного стану, швидкість виявлення небезпечних відхилень та загальна надійність системи моніторингу [4, 5].

Особливістю експлуатації МРП на ВО є наявність складних умов навколишнього середовища, зокрема підвищених температур, вібрацій, електромагнітних перешкод, високої вологості, пилу та агресивних газових середовищ. У зв'язку з цим датчики повинні забезпечувати стабільну роботу в умовах зовнішніх впливів, мати високу точність вимірювання, швидкодію та стійкість до механічних навантажень.

Для контролю температурного режиму роботи основних вузлів МРП доцільно використовувати температурні датчики. Контроль температури є особливо важливим для електроприводів, силової електроніки та акумуляторних батарей, оскільки перегрів зазначених елементів може призвести до порушення роботи системи або виникнення аварійної ситуації. В умовах ВО температурний контроль також необхідний для запобігання перевищенню допустимих температур поверхні обладнання [11, 12].

Для реалізації САМТС можуть використовуватися цифрові температурні або терморезистивні датчики. Цифрові датчики забезпечують високу точність вимірювання та простоту інтеграції з мікроконтролерними системами, тоді як терморезистори характеризуються високою надійністю та можливістю роботи у широкому температурному діапазоні. Вибір конкретного типу визначається умовами експлуатації та вимогами до швидкодії системи [11, 12].

Важливим елементом САМТС є датчики струму та напруги, які дозволяють контролювати стан системи живлення та електроприводів. Аналіз струму споживання дає можливість виявляти перевантаження, короткі замикання, заклинювання механізмів та інші несправності. Контроль напруги живлення дозволяє оцінювати стабільність роботи акумуляторної системи та своєчасно виявляти критичне зниження рівня заряду [11-13].

При виборі датчиків струму важливими характеристиками є діапазон вимірювання, точність, гальванічна розв'язка та стійкість до електромагнітних перешкод. Для систем мобільної робототехніки найбільш доцільним є використання датчиків на основі ефекту Холла, які забезпечують безконтактне вимірювання струму та мають високу надійність.

Для оцінювання механічного стану МРП використовуються вібраційні датчики та акселерометри. Вібраційний контроль дозволяє визначати рівень механічних навантажень, виявляти розбалансування, знос підшипників, ослаблення кріплень та інші механічні несправності. Особливого значення контроль вібрацій набуває при русі платформи по нерівній поверхні або в умовах підвищених ударних навантажень [11, 12].

Акселерометри разом із гіроскопами формують інерційну систему вимірювання, що використовується для визначення орієнтації, нахилу та стабільності руху МРП. Використання комбінованих IMU-модулів дозволяє зменшити кількість окремих сенсорів та спростити інтеграцію системи [11].

Для контролю навколишнього середовища та забезпечення безпеки роботи на ВО до складу САМТС доцільно включити газоаналізатори, які мають високу чутливість, швидкодію та стійкість до впливу вологості й температурних змін. Їх використання дозволяє виявляти концентрацію горючих і токсичних газів, що особливо важливо під час роботи на ВО [14].

Контроль положення та переміщення МРП забезпечується за допомогою супутникових навігаційних модулів та інерціальних датчиків. GPS-модулі використовуються для визначення координат платформи та побудови маршруту руху, а інерціальні сенсори дозволяють підтримувати

стабільність навігації навіть у випадках тимчасової втрати супутникового сигналу.

Важливою складовою САМТС є відеокамери, які забезпечують візуальний контроль навколишнього середовища та технічного стану МРП. Відеодані можуть використовуватися як оператором, так і алгоритмами автоматизованого аналізу ситуації. У складних умовах доцільним є використання камер із захистом від пилу та вологи, а також тепловізійних модулів для контролю температурних аномалій [11, 12].

При виборі датчиків також необхідно враховувати параметри енергоспоживання, габаритні розміри, сумісність із бортовим обладнанням та можливість інтеграції з мікроконтролерною системою. Для МРП особливо важливими є компактність, мала маса та низьке енергоспоживання вимірювальних пристроїв, оскільки вони безпосередньо впливають на автономність роботи системи [11, 12].

Крім технічних характеристик, суттєве значення має забезпечення надійності передачі даних від датчиків до центрального обчислювального модуля. У зв'язку з цим доцільно використовувати цифрові інтерфейси передачі даних, такі як I²C, SPI, UART або CAN, які характеризуються високою завадостійкістю та можливістю роботи в промислових умовах [13].

У табл. 2.1 наведено основні характеристики обраних датчиків для створення апаратної частини САМТС МРП.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики датчиків

Тип датчика	Діапазон вимірювання	Точність	Інтерфейс
1	2	3	4
Температурний датчик DS18B20	-55...+125 °C	±0,5 °C	1-Wire
Датчик диму/газу MQ-135	10...1000 ppm	±5 %	аналоговий

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
GPS-модуль NEO-6M	до 5 м	$\pm 2,5$ м	UART
Датчик заряду акумулятора INA219	0...26 В	± 1 %	I ² C
Відеокамера ESP32-CAM	1600×1200 px	—	Wi-Fi / UART
Терморезистор PT100	-50...+250 °C	$\pm 0,3$ °C	аналоговий
Датчик струму ACS712	± 5 ... ± 30 А	$\pm 1,5$ %	аналоговий
Датчик напруги Voltage Sensor Module	0...25 В	± 1 %	аналоговий
Акселерометр MPU6050	$\pm 2g$... $\pm 16g$	$\pm 0,01g$	I ² C
Гіроскоп MPU6050	± 250 ... ± 2000 °/с	± 1 %	I ² C
Вібраційний датчик SW-420	0...20 м/с ²	± 5 %	цифровий
Датчик газу MQ-2	300...10000 ppm	± 5 %	аналоговий

Отже, вибір датчиків САМТС МРП повинен базуватися на комплексному врахуванні умов експлуатації, параметрів контролю, вимог до точності та надійності функціонування системи. Використання сучасних сенсорних технологій дозволяє забезпечити безперервний контроль технічного стану платформи, своєчасно виявляти небезпечні відхилення та підвищувати ефективність роботи РС в умовах НС.

2.3 Розроблення структури апаратної частини системи автоматизації моніторингу

Розроблення апаратної частини САМТС МРП є одним із найважливіших етапів, оскільки саме апаратне забезпечення визначає

можливості збору, обробки та передачі інформації про технічний стан платформи в режимі реального часу. Враховуючи специфіку експлуатації МРП на ВО, апаратна частина повинна забезпечувати високу швидкодію, енергоефективність, завадостійкість та надійність функціонування навіть за несприятливих умов навколишнього середовища [4, 5].

Під час проектування системи було обрано мікроконтролер сімейства STM32, який є одним із найбільш поширених рішень для побудови сучасних вбудованих систем автоматизації та моніторингу. Використання контролерів сімейства STM32 обумовлено їх високою продуктивністю, широким набором периферійних модулів, низьким енергоспоживанням та підтримкою великої кількості інтерфейсів передачі даних, що забезпечує просту інтеграцію із сучасними вимірювальними пристроями та модулями зв'язку [13-15].

У системі, що розробляється, доцільно використовувати мікроконтролер STM32F407VG, побудований на базі 32-розрядного ядра ARM Cortex-M4 із тактовою частотою до 168 МГц. Контролер має достатній обсяг оперативної та постійної пам'яті, підтримує апаратну обробку математичних операцій з плаваючою комою (FPU), а також містить значну кількість периферійних модулів, необхідних для побудови систем моніторингу [13, 16].

Основні характеристики контролера наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні характеристики мікроконтролера STM32F407VG

Параметр	Значення
1	2
Ядро	ARM Cortex-M4
Тактова частота	до 168 МГц
Flash-пам'ять	1 МБ
SRAM	192 КБ
Напруга живлення	1,8–3,6 В
АЦП	3 × 12 біт

Продовження таблиці 2.2

1	2
ЦАП	2×12 біт
UART	до 6
SPI	до 3
I ² C	до 3
CAN	2
USB OTG	Full Speed
Ethernet	10/100 Мбіт/с
DMA	Так

Структура апаратної частини САМТС, наведена на рис. 2.2, побудована за модульним принципом, що забезпечує простоту модернізації та масштабування системи.

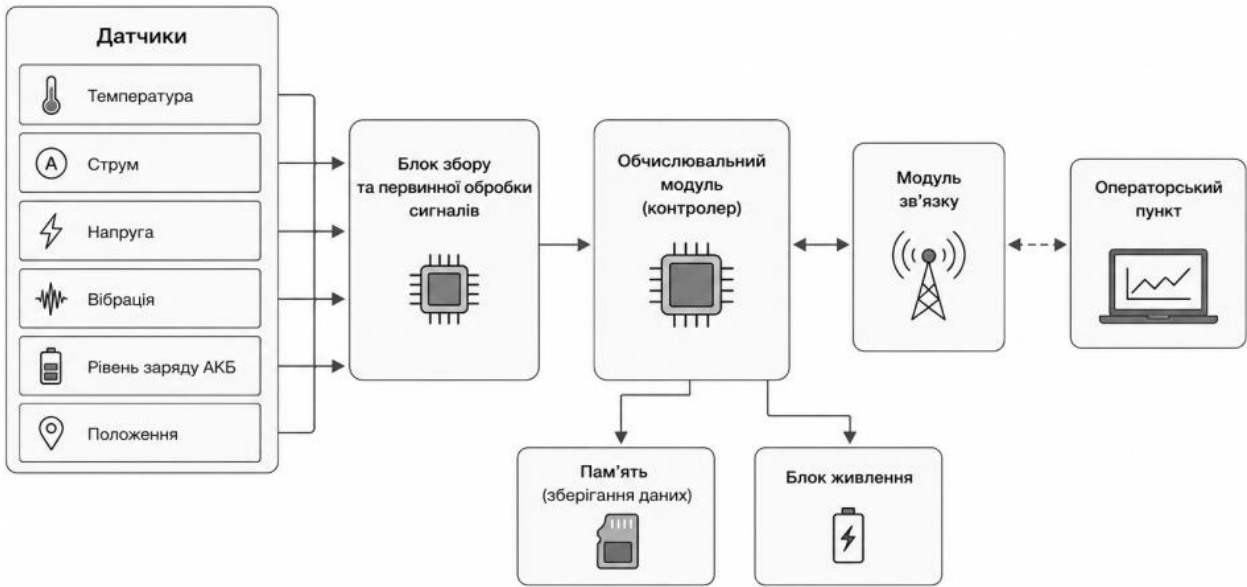


Рисунок 2.2 – Структура апаратної частини САМТС МРП

Центральне місце у структурі займає мікроконтролер STM32, який виконує функції координації роботи всіх периферійних пристроїв, приймання

інформації від датчиків, обробки вимірювань, аналізу технічного стану та передачі інформації оператору. Модульна побудова дозволяє підключати додаткові сенсори без суттєвої зміни структури всієї системи, що є важливою перевагою під час модернізації МРП.

До входів мікроконтролера підключаються температурні датчики, датчики струму, напруги, вібрації, інерціальні вимірювальні модулі, газоаналізatori та GPS-приймач. Для підключення цифрових датчиків використовуються інтерфейси I²C, SPI та UART, тоді як аналогові вимірювальні пристрої підключаються до вбудованих АЦП STM32. Наявність трьох незалежних 12-бітних АЦП дозволяє здійснювати паралельне вимірювання декількох аналогових параметрів без втрати швидкодії системи [13, 14].

Значну роль у роботі САМТС відіграє блок збору та попередньої обробки інформації. Перед надходженням до ЦПУ всі сигнали проходять процедури нормалізації, цифрової фільтрації та синхронізації, що дозволяє зменшити вплив випадкових шумів і електромагнітних завад. Особливо актуальним це є для МРП, які працюють поблизу потужного електрообладнання або у ВО.

Для оцінювання навантаження на мікроконтролер доцільно врахувати загальну кількість інформації, що надходить від вимірювальних каналів. Загальна швидкість потоку даних (Q) може бути визначена за формулою:

$$Q = \sum_{i=1}^n f_i \cdot b_i, \quad (2.1)$$

де f_i – частота опитування i -го датчика, Гц;

b_i – кількість інформації, що передається за один цикл опитування, біт;

n – кількість датчиків.

При використанні десяти датчиків із середньою частотою опитування 100 Гц та обсягом даних 16 біт швидкість інформаційного потоку

становитиме:

$$Q = 10 \cdot 100 \cdot 16 = 16 \text{ кбіт/с},$$

що є значно меншим за пропускну здатність інтерфейсів STM32 та не створює суттєвого навантаження на мікроконтролер.

Для передачі інформації на інтерфейс оператора використовується модуль бездротового зв'язку, який взаємодіє з контролером через інтерфейс UART або SPI. Залежно від умов експлуатації можуть застосовуватися модулі Wi-Fi, LoRa або LTE. Передавання здійснюється пакетним способом із контролем цілісності даних та повторною передачею пакетів у разі виникнення помилок [13-15].

Важливою складовою апаратної частини є система живлення, яка повинна забезпечувати стабільне функціонування всіх електронних модулів. Оскільки мікроконтролер STM32 працює при напрузі 3,3 В, у схемі використовуються DC/DC-перетворювачі та стабілізатори напруги, що забезпечують перетворення напруги акумуляторної батареї до необхідного рівня [13-15].

Запропонована структура апаратної частини забезпечує інтеграцію всіх функціональних модулів у єдину САМТС. Використання мікроконтролера STM32 дозволяє реалізувати високошвидкісний збір інформації, ефективну цифрову обробку сигналів та надійну передачу телеметричних даних оператору. Крім того, модульна архітектура спрощує подальшу модернізацію системи та забезпечує можливість підключення нових датчиків і функціональних блоків без зміни принципів її роботи.

У результаті розроблення апаратної частини створено основу для побудови сучасної САМТС МРП, яка відповідає вимогам щодо швидкодії, енергоефективності, надійності та масштабованості й може ефективно використовуватися під час виконання робіт у НС на ВО.

2.4 Організація збору та передачі даних у автоматизованій системі моніторингу

Ефективність функціонування САМТС МРП значною мірою залежить від правильності організації процесів збору, обробки та передачі інформації. Умови експлуатації на ВО вимагають забезпечення високої достовірності даних, стійкості до зовнішніх впливів та безперервного функціонування каналів зв'язку навіть у складних умовах навколишнього середовища [4, 5].

Основною задачею підсистеми збору даних є безперервне отримання інформації від вимірювальних пристроїв, її попередня обробка та передача до центрального обчислювального модуля. У процесі роботи МРП датчики генерують значний обсяг інформації, що характеризує стан електричних, механічних та енергетичних систем. До таких даних належать температурні показники, параметри живлення, рівень вібрацій, координати платформи, концентрація газів, а також відеоінформація.

На рис. 2.3 зображена схема організації збору та передачі даних у САМТС МРП.

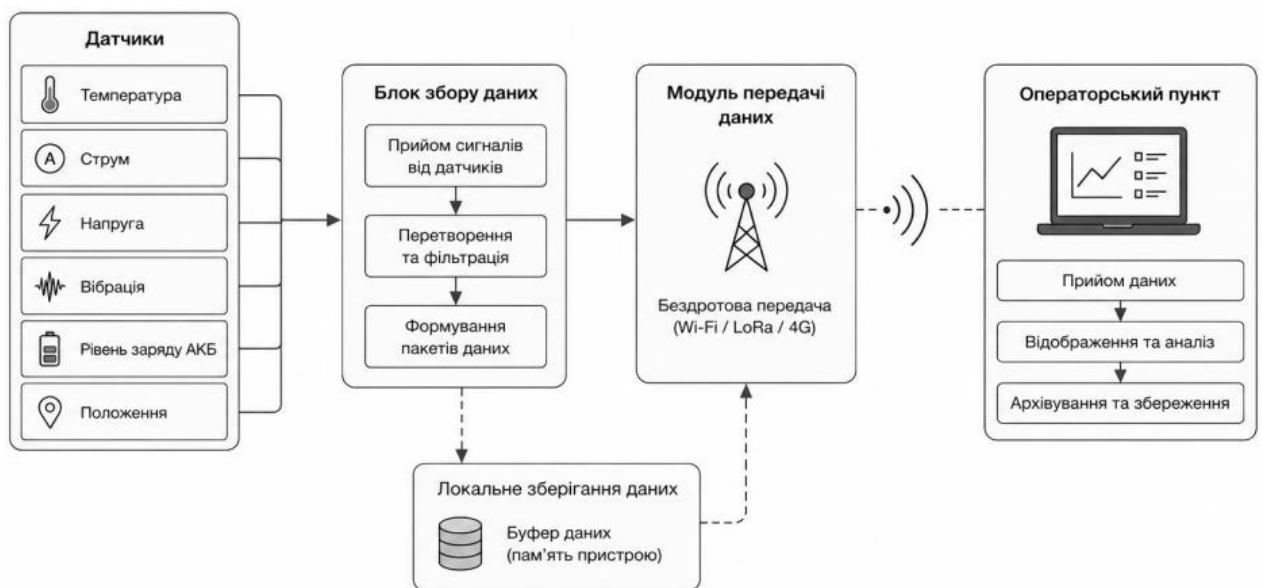


Рисунок 2.3 – Організація збору та передачі даних САМТС

Збір інформації здійснюється за допомогою спеціалізованих інтерфейсів та модулів узгодження сигналів. Оскільки у САМТС використовуються як аналогові, так і цифрові датчики, структура підсистеми збору даних повинна забезпечувати підтримку різних типів сигналів та форматів передачі інформації. Аналогові сигнали надходять до АЦП, де виконується їх дискретизація та перетворення у цифрову форму. Після цього інформація передається до центрального обчислювального модуля для подальшої обробки [14].

Важливим етапом організації збору даних є попередня фільтрація сигналів. У реальних умовах експлуатації на датчики впливають електромагнітні перешкоди, механічні вібрації та інші фактори, які можуть призводити до появи шумів і спотворень вимірювань. Для зменшення впливу таких факторів використовуються цифрові та апаратні методи фільтрації, що дозволяють підвищити достовірність отриманої інформації та стабільність функціонування САМТС.

Організація збору даних також передбачає синхронізацію роботи окремих вимірювальних каналів. Оскільки параметри технічного стану можуть змінюватися одночасно, важливо забезпечити узгодженість часових міток вимірювань. Це дозволяє коректно аналізувати взаємозв'язок між параметрами та підвищує точність оцінювання технічного стану МРП.

Після первинної обробки дані надходять до центрального обчислювального модуля, де виконується їх аналіз та формування інформаційних повідомлень. Для забезпечення надійності функціонування САМТС частина обробки може здійснюватися локально безпосередньо на борту МРП. Такий підхід дозволяє зменшити навантаження на канали зв'язку та забезпечити оперативне реагування на критичні відхилення параметрів навіть у випадку втрати зв'язку з оператором [14].

Передача даних між МРП та оператором здійснюється за допомогою бездротових каналів зв'язку. Використання бездротових технологій дозволяє забезпечити дистанційне керування платформою та отримання інформації у

реальному часі без необхідності фізичного підключення. У системі можуть використовуватися різні технології зв'язку залежно від умов експлуатації, дальності передачі даних та необхідної пропускної здатності.

Для роботи на відносно невеликих відстанях доцільним є використання технології Wi-Fi, яка забезпечує високу швидкість передачі даних та підтримує передачу відеоінформації. Однак у складних умовах промислових об'єктів ефективність Wi-Fi може знижуватися через наявність металевих конструкцій, перешкод та електромагнітних впливів.

Для забезпечення більшої дальності та підвищеної завадостійкості можуть використовуватися технології LoRa або LTE. LoRa характеризується низьким енергоспоживанням та можливістю передачі даних на значні відстані, що особливо важливо при роботі на великих промислових територіях. LTE забезпечує стабільний зв'язок та високу швидкість передачі інформації, але потребує наявності покриття мобільної мережі та має більше енергоспоживання [13, 14].

Важливим аспектом організації передачі даних є забезпечення їх захисту та цілісності. Оскільки САМТС функціонує в умовах підвищеної небезпеки, порушення передачі інформації або втрата критичних даних можуть призвести до помилкових рішень та аварійних ситуацій. Для підвищення надійності використовуються механізми контролю цілісності пакетів даних, повторної передачі у разі помилок та шифрування інформації.

Особливу увагу приділено організації передачі аварійних повідомлень. У випадку виявлення критичних відхилень САМТС повинна забезпечувати пріоритетну передачу сигналів тривоги незалежно від поточного навантаження каналу зв'язку. Це дозволяє оператору своєчасно реагувати на небезпечні ситуації та приймати рішення щодо подальшої роботи МРП.

Для забезпечення стабільності роботи САМТС у випадках короткочасної втрати зв'язку передбачено використання локального буферизування даних. Інформація тимчасово зберігається у внутрішній пам'яті бортового модуля та автоматично передається після відновлення

каналу зв'язку. Такий підхід дозволяє уникнути втрати важливих телеметричних даних та забезпечує повноту журналу подій.

Організація збору та передачі даних також враховує необхідність масштабування САМТС. Запропонована структура дозволяє підключати додаткові датчики, модулі зв'язку та обчислювальні ресурси без суттєвої зміни архітектури системи. Це створює можливість подальшого розширення функціональних можливостей МРП та адаптації САМТС до різних умов експлуатації.

Таким чином, організація збору та передачі даних у САМТС МРП базується на принципах безперервності, достовірності та надійності обміну інформацією. Запропонований підхід забезпечує ефективне функціонування системи в умовах НС на ВО та створює основу для своєчасного виявлення небезпечних відхилень і підвищення безпеки експлуатації МРП.

2.4 Розроблення алгоритму функціонування системи автоматизації моніторингу

Ефективність САМТС МРП значною мірою визначається алгоритмом її функціонування. Саме алгоритм забезпечує узгоджену роботу всіх апаратних і програмних компонентів системи, визначає порядок збору, обробки, аналізу та передачі інформації, а також формує логіку реагування на зміни параметрів технічного стану МРП [4, 5].

Розроблення алгоритму функціонування здійснювалося з урахуванням специфіки експлуатації МРП в умовах НС на ВО. Такі умови характеризуються високою динамікою змін навколишнього середовища, підвищеним рівнем ризику виникнення аварійних ситуацій та необхідністю оперативного реагування на критичні відхилення параметрів.

Основою функціонування САМТС є безперервний цикл збору та аналізу інформації про технічний стан МРП. Після ввімкнення системи виконується ініціалізація всіх апаратних модулів, перевірка працездатності

датчиків, каналів зв'язку та обчислювального модуля [19]. На цьому етапі САМТС здійснює самодіагностику та формує початкові параметри функціонування. У випадку виявлення несправностей САМТС генерує повідомлення про помилку та переходить у безпечний режим роботи.

На рис. 2.4 зображено алгоритм функціонування САМТС МРП.



Рисунок 2.4 – Алгоритм функціонування САМТС МРП

Після завершення ініціалізації САМТС переходить до режиму безперервного моніторингу. Датчики здійснюють вимірювання параметрів технічного стану МРП, зокрема температури, струму споживання, напруги живлення, рівня вібрацій, положення платформи та концентрації небезпечних газів. Отримані сигнали передаються до підсистеми збору даних, де виконуються їх синхронізація, фільтрація та попередня обробка.

Особливу увагу в алгоритмі приділено усуненню впливу шумів і нестабільностей сигналів. У реальних умовах експлуатації вимірювальні сигнали можуть спотворюватися через електромагнітні перешкоди, механічні вібрації та нестабільність живлення. Для підвищення достовірності інформації алгоритм передбачає застосування цифрової фільтрації та усереднення даних, що дозволяє зменшити ймовірність помилкового спрацювання САМТС [19-21].

Після попередньої обробки дані надходять до центрального обчислювального модуля, де виконується аналіз технічного стану МРП. На цьому етапі здійснюється порівняння поточних значень параметрів із допустимими межами, визначеними під час налаштування системи. Алгоритм контролює як абсолютні значення параметрів, так і швидкість їх зміни у часі, що дозволяє виявляти не лише явні аварійні стани, а й передаварійні режими роботи.

У випадку перевищення допустимих значень параметрів САМТС формує повідомлення про відхилення та виконує класифікацію рівня небезпеки. Якщо відхилення є незначним, система може лише інформувати оператора про зміну стану. У разі виявлення критичних параметрів активуються алгоритми аварійного реагування, які можуть передбачати обмеження роботи окремих вузлів, зниження навантаження або аварійну зупинку МРП.

Важливою особливістю алгоритму є реалізація багаторівневого підходу до аналізу технічного стану. Частина рішень приймається локально безпосередньо на борту МРП, що дозволяє забезпечити швидке реагування

на критичні ситуації навіть у випадку втрати зв'язку з операторським пунктом. Одночасно результати аналізу передаються оператору для подальшого контролю та прийняття рішень [19-21].

Передача інформації здійснюється за допомогою бездротового каналу зв'язку. Алгоритм забезпечує формування пакетів телеметричних даних, контроль їх цілісності та буферизацію у випадку тимчасової втрати зв'язку. Усі критичні повідомлення мають підвищений пріоритет передачі, що дозволяє забезпечити оперативне інформування оператора про небезпечні зміни параметрів.

Для підвищення надійності функціонування алгоритм передбачає ведення журналу подій. У пам'яті системи зберігаються дані про аварійні ситуації, перевищення допустимих параметрів, втрати зв'язку та інші події, що дозволяє проводити подальший аналіз роботи САМТС та оцінювати технічний стан МРП протягом тривалого часу.

Окрему увагу приділено питанням енергетичної ефективності функціонування САМТС. Оскільки МРП працює автономно, алгоритм забезпечує оптимізацію режимів роботи окремих модулів залежно від поточного стану системи. У випадках низького навантаження частина датчиків або допоміжних модулів може переводитися у режим пониженого енергоспоживання, що дозволяє збільшити тривалість автономної роботи.

Алгоритм функціонування також враховує можливість масштабування САМТС. Його структура дозволяє підключати додаткові датчики, реалізовувати нові функції аналізу та інтегрувати систему з іншими РС без суттєвої зміни загальної логіки роботи [19-21].

Отже, розроблений алгоритм функціонування САМТС моніторингу забезпечує безперервний контроль технічного стану МРП, своєчасне виявлення критичних відхилень та оперативне реагування на небезпечні ситуації. Запропонований підхід дозволяє підвищити надійність і безпеку експлуатації МРП в умовах НС на ВО та створює основу для ефективної роботи всієї САМТС.

2.5 Висновки до другого розділу

У другому розділі роботи розроблено структуру САМТС МРП, призначеної для роботи в умовах НС на ВО. Основну увагу приділено побудові архітектури системи, вибору апаратних засобів, організації збору та передачі даних, а також розробленню алгоритму її функціонування

У процесі дослідження сформовано загальну архітектуру САМТС, яка забезпечує взаємодію вимірювальних пристроїв, обчислювального модуля та системи зв'язку. Запропонована структура побудована за принципом розподіленої обробки інформації та забезпечує безперервний контроль параметрів технічного стану МРП в реальному часі.

Обґрунтовано вибір датчиків для контролю температурних, електричних, механічних та експлуатаційних параметрів. Визначено, що використання сучасних сенсорних пристроїв дозволяє забезпечити високу точність вимірювання параметрів, своєчасне виявлення критичних відхилень та підвищення достовірності оцінювання технічного стану платформи.

У ході розроблення апаратної частини системи визначено структуру обчислювального модуля, підсистеми збору даних, каналів зв'язку та системи живлення. Особливу увагу приділено питанням завадостійкості, енергоефективності та забезпечення надійного функціонування системи.

Розглянуто організацію процесів збору та передачі даних у системі моніторингу. Визначено принципи синхронізації вимірювань, фільтрації сигналів, буферизації інформації та передачі телеметричних даних за допомогою бездротових каналів зв'язку.

Також у розділі розроблено алгоритм функціонування САМТС МРП. Алгоритм забезпечує послідовне виконання процесів ініціалізації, збору даних, обробки інформації, аналізу параметрів та формування реакції системи на виявлені відхилення. Реалізація локального аналізу даних і механізмів аварійного реагування дозволяє підвищити надійність та безпеку функціонування МРП.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ МОНІТОРИНГУ

3.1 Загальна структура програмного забезпечення

ПЗ є ключовою складовою САМТС МРП, реалізує алгоритми збору, обробки та аналізу інформації, а також організовує передачу телеметричних даних оператору. Від архітектури програмного забезпечення безпосередньо залежать швидкодія системи, надійність функціонування, масштабованість та можливість подальшої модернізації комплексу. Використання сучасних методів розроблення вбудованих систем дозволяє створити ПЗ, здатне працювати в режимі реального часу та забезпечувати стабільне функціонування МРП навіть за наявності значної кількості одночасно виконуваних процесів [12, 16, 17].

Під час розроблення САМТС ПЗ побудовано відповідно до модульного принципу, що забезпечує розподіл функцій між окремими програмними компонентами. Такий підхід значно спрощує розроблення, тестування, супровід і подальше розширення функціональних можливостей системи. Кожний програмний модуль виконує окрему функцію, а взаємодія між ними здійснюється через стандартизовані програмні інтерфейси. Завдяки цьому зміна або модернізація одного модуля практично не впливає на роботу інших компонентів ПЗ [15, 17].

Загальна структура ПЗ САМТС наведена на рис. 3.1. Вона включає модулі ініціалізації обладнання, керування периферійними пристроями, збору інформації від датчиків, цифрової обробки сигналів, аналізу технічного стану, передачі телеметричних даних, ведення журналу подій та взаємодії з операторським пунктом. Побудова структури саме за таким принципом забезпечує чіткий розподіл функцій між окремими програмними компонентами та підвищує надійність роботи всієї системи.

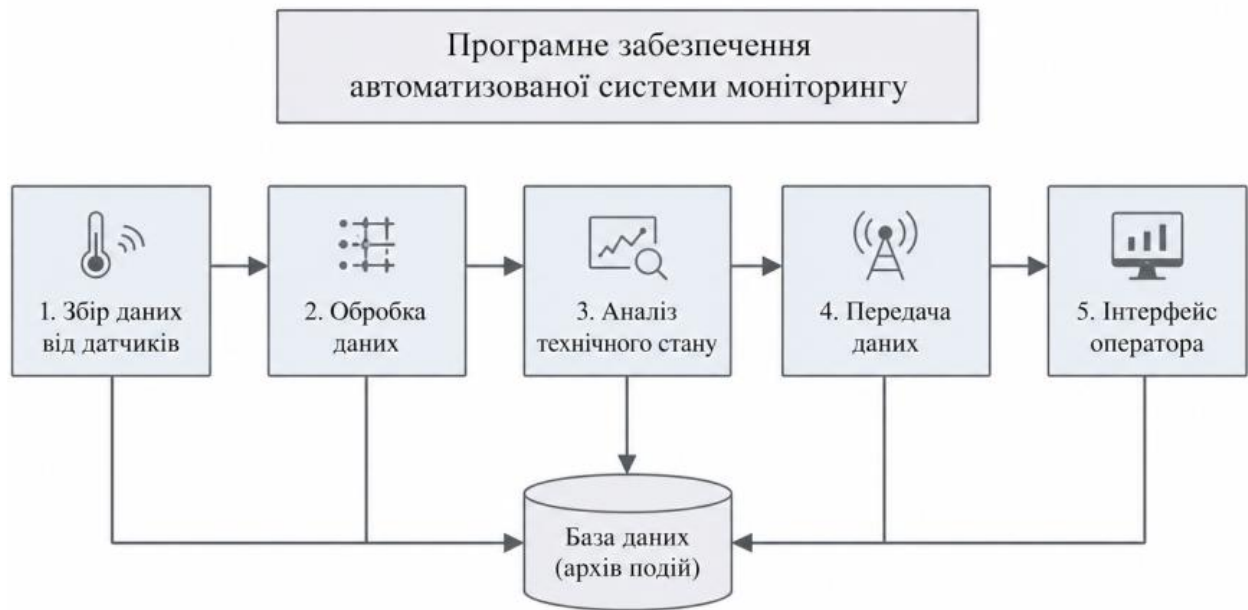


Рисунок 3.1 – Загальна структура ПЗ САМТС

Після ввімкнення МРП ПЗ виконує процедуру ініціалізації мікроконтролера STM32F407VG, налаштовує тактову систему, конфігурує порти введення/виведення, АЦП, таймери, контролери переривань та інтерфейси обміну даними. Крім цього, здійснюється перевірка працездатності основних периферійних модулів, датчиків та системи бездротового зв'язку. Така процедура дозволяє своєчасно виявити несправності ще до початку роботи САМТС [13-15].

Після завершення ініціалізації ПЗ переходить до основного циклу функціонування. Центральним компонентом є модуль збору даних, який із заданою періодичністю опитує всі підключені датчики. Для цифрових вимірювальних пристроїв використовуються інтерфейси I²C, SPI та UART, а аналогові сигнали надходять через вбудовані АЦП STM32. Завдяки можливостям мікроконтролера виконання опитування відбувається практично одночасно для всіх каналів, що забезпечує високу швидкодію системи та синхронність вимірювань [13, 14].

Після отримання вимірювальної інформації ПЗ виконує цифрову обробку сигналів. На цьому етапі здійснюється перевірка правильності отриманих значень, усунення випадкових шумів, цифрова фільтрація,

нормалізація параметрів та підготовка інформації до подальшого аналізу. Попередня обробка дозволяє суттєво підвищити точність оцінювання технічного стану МРП, особливо при роботі в умовах сильних електромагнітних перешкод і механічних вібрацій [21-23].

Наступним етапом роботи ПЗ є аналіз технічного стану МРП. Отримані значення параметрів порівнюються з допустимими межами, що були визначені під час налаштування САМТС. У випадку перевищення встановлених порогових значень формується повідомлення про несправність або аварійну ситуацію. Одночасно ПЗ визначає ступінь критичності відхилення та приймає рішення щодо подальших дій. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти потенційні несправності ще до виникнення серйозних відмов обладнання [19, 20].

Для підвищення ефективності роботи САМТС ПЗ реалізує механізм пріоритетної обробки подій. Найвищий пріоритет мають аварійні повідомлення, пов'язані з перегрівом обладнання, перевищенням допустимого струму, небезпечними концентраціями газів або критичним зниженням напруги живлення. Усі інші інформаційні повідомлення передаються відповідно до встановленої черговості без впливу на виконання критично важливих функцій системи.

Особливу увагу приділено реалізації програмного модуля передачі даних. Після завершення аналізу сформовані телеметричні пакети передаються через бездротовий канал зв'язку до операторського пункту. Для забезпечення цілісності інформації використовується контроль правильності передачі даних, повторне надсилання пакетів при виникненні помилок та буферизація інформації у випадку короткочасної втрати зв'язку.

Програмне забезпечення також реалізує функцію локального архівування інформації. Усі виміряні параметри, повідомлення про помилки, аварійні ситуації та службові події записуються до внутрішньої пам'яті контролера або зовнішнього накопичувача. Це дозволяє після завершення роботи МРП виконати детальний аналіз її технічного стану та оцінити

ефективність функціонування САМТС.

Значною перевагою розробленої структури ПЗ є можливість її масштабування. У разі необхідності до системи можуть бути додані нові програмні модулі для підтримки додаткових датчиків, нових алгоритмів аналізу або інших каналів передачі інформації без необхідності суттєвого перепроектування всієї програмної архітектури. Це відповідає сучасним принципам побудови ПЗ для РС та вбудованих систем керування [6, 9, 28].

Основні програмні модулі САМТС узагальнені у табл. 3.1, де наведено їх призначення та основні функції. Така таблиця дозволяє наочно показати взаємозв'язок між окремими компонентами ПЗ та полегшує подальший аналіз структури системи.

Таблиця 3.1 – Призначення та основні функції програмних модулів САМТС

Програмний модуль	Призначення	Основні функції
1	2	3
Модуль ініціалізації системи	підготовка апаратної платформи до роботи	ініціалізація мікроконтролера STM32, налаштування тактового генератора, портів GPIO, таймерів, АЦП, UART, SPI, I ² C, перевірка працездатності периферійних модулів
Модуль збору даних	отримання інформації від датчиків	опитування температурних датчиків, датчиків струму, напруги, вібрації, газоаналізаторів, GPS-модуля та інших вимірювальних пристроїв
Модуль цифрової обробки сигналів	підготовка вимірювальної інформації до аналізу	фільтрація шумів, усереднення значень, масштабування сигналів, перевірка достовірності отриманих даних
Модуль аналізу технічного стану	оцінювання працездатності МРП	порівняння параметрів із допустимими межами, виявлення відхилень, формування повідомлень про несправності

Продовження таблиці 3.1

1	2	3
Модуль прийняття рішень	визначення режиму роботи системи	аналіз рівня небезпеки, класифікація аварійних ситуацій, формування команд реагування
Модуль передачі даних	забезпечення обміну інформацією з оператором	формування телеметричних пакетів, передача даних через Wi-Fi (або інший бездротовий канал), контроль цілісності інформації
Модуль журналювання подій	реєстрація параметрів роботи системи	збереження телеметричних даних, журналу аварій, повідомлень про помилки та службових подій
Модуль взаємодії з оператором	надання інформації оператору	передача параметрів технічного стану, аварійних повідомлень, відображення поточного режиму роботи системи
Модуль керування енергоспоживанням	підвищення автономності роботи	контроль рівня заряду акумулятора, керування режимами енергозбереження, контроль живлення окремих модулів
Модуль самодіагностики	контроль працездатності програмно-апаратного комплексу	перевірка роботи датчиків, пам'яті, каналів зв'язку, мікроконтролера та формування повідомлень про виявлені несправності

Як видно з табл. 3.1, ПЗ побудовано за модульним принципом, що забезпечує чіткий розподіл функцій між окремими компонентами системи. Такий підхід підвищує надійність функціонування САМТС, спрощує її модернізацію та дозволяє незалежно вдосконалювати окремі програмні модулі без зміни загальної архітектури ПЗ.

Найбільше навантаження покладається на модулі збору та аналізу даних, які забезпечують безперервний контроль технічного стану МРП в режимі реального часу. Водночас модулі передачі даних, журналювання та взаємодії з оператором дозволяють організувати оперативний обмін інформацією між платформою та оператором, що є особливо важливим під час НС на ВО.

Розроблена структура ПЗ забезпечує комплексне керування всіма процесами САМТС МРП. Використання модульного принципу побудови, сучасних можливостей мікроконтролера STM32F407VG, цифрової обробки даних та програмних засобів контролю забезпечує високу надійність, швидкодію та можливість подальшого розширення функціональних можливостей системи. Запропонована архітектура повністю відповідає структурі апаратної частини САМТС МРП, і створює основу для реалізації програмних модулів, що розглядатимуться у наступних підрозділах.

3.2 Розроблення алгоритмів обробки даних

Одним із найважливіших етапів створення САМТС МРП є розроблення алгоритмів обробки даних. Саме програмні алгоритми забезпечують перетворення інформації, отриманої від вимірювальних пристроїв, у сукупність діагностичних параметрів, що характеризують поточний технічний стан платформи. Від правильності побудови алгоритмів безпосередньо залежать достовірність оцінювання технічного стану, швидкість реагування системи на небезпечні зміни параметрів та загальна ефективність її роботи [19, 20].

Під час експлуатації МРП на ВО одночасно контролюється велика кількість параметрів, які мають різну фізичну природу та різні частоти зміни. До системи надходять температурні показники, значення струму та напруги живлення, рівень вібрацій, координати платформи, показники газоаналізаторів та інша телеметрична інформація. Отримані дані характеризуються різною швидкістю надходження, можуть містити випадкові шуми та перешкоди, тому потребують попередньої програмної обробки перед виконанням аналізу технічного стану [21-23].

Загальна послідовність роботи алгоритмів наведена на рис. 3.2. Вона охоплює процеси отримання вимірювальної інформації, перевірки правильності даних, цифрової обробки сигналів, аналізу параметрів,

прийняття рішення щодо технічного стану МРП та передачі результатів оператору. Така структура алгоритму дозволяє забезпечити безперервне функціонування САМТС в режимі реального часу.



Рисунок 3.2 – Послідовність роботи алгоритмів

Першим етапом роботи ПЗ є приймання інформації від вимірювальних пристроїв. Мікроконтролер STM32F407VG періодично виконує опитування всіх датчиків відповідно до встановленої частоти дискретизації. Для цифрових пристроїв використовуються інтерфейси I²C, SPI та UART, тоді як аналогові сигнали надходять через вбудовані АЦП контролера. Отримані вимірювання записуються до оперативної пам'яті та проходять первинну перевірку на коректність значень [13-17].

Після завершення збору інформації виконується програмна перевірка правильності отриманих даних. На цьому етапі контролюється повнота отриманих пакетів інформації, перевіряється відповідність вимірних параметрів допустимим фізичним діапазнам та виконується контроль правильності передачі даних від периферійних модулів. У випадку виявлення помилок ПЗ автоматично повторює процедуру зчитування інформації або формує повідомлення про несправність відповідного датчика.

Наступним етапом є цифрова обробка сигналів. Враховуючи складні умови експлуатації МРП, вимірювальна інформація може містити випадкові відхилення, викликані електромагнітними завадами, механічними коливаннями або нестабільністю живлення. Для зменшення впливу таких факторів ПЗ реалізує цифрове усереднення результатів вимірювання, що дозволяє отримати більш стабільні значення контрольованих параметрів.

Середнє значення параметра ($\bar{x}$) визначається за виразом:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.1)$$

де x_i – окреме вимірне значення;

n – кількість вимірювань.

Застосування такого алгоритму дозволяє зменшити вплив випадкових похибок вимірювання та підвищити достовірність оцінювання технічного стану МРП [21, 22].

Після цифрової обробки виконується нормалізація вимірювальних параметрів, яка забезпечує приведення даних до єдиного масштабу незалежно від фізичної природи сигналу. Це значно спрощує подальший аналіз технічного стану системи та забезпечує можливість комплексної оцінки всіх контрольованих параметрів.

Наступним етапом роботи алгоритму є аналіз отриманої інформації. На цьому етапі поточні значення параметрів порівнюються з допустимими

межами, які визначені технічними характеристиками обладнання. Якщо значення знаходяться в межах норми, система переходить до наступного циклу вимірювання. У випадку перевищення допустимих значень формується повідомлення про несправність та визначається рівень небезпеки.

Для оцінювання відхилення параметра (Δ) від номінального значення використовується співвідношення:

$$\Delta = \left| \frac{x - x_{ном}}{x_{ном}} \right| \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

де x — поточне значення параметра;

$x_{ном}$ — номінальне значення параметра.

Отримане значення використовується ПЗ для визначення рівня критичності відхилення. Якщо відносне відхилення перевищує встановлений поріг, система автоматично формує попередження або аварійне повідомлення.

Після завершення аналізу всі результати об'єднуються у телеметричний пакет, який містить інформацію про поточний технічний стан МРП. До складу пакета входять значення всіх контрольованих параметрів, часові мітки вимірювань, службова інформація та повідомлення про можливі несправності. Передача сформованих пакетів здійснюється відповідно до структури, наведеної на рис. 2.3, що забезпечує узгоджену роботу програмної та апаратної частин САМТС.

Для підвищення надійності функціонування алгоритмів передбачено ведення журналу подій. Усі критичні повідомлення, аварійні ситуації, втрати зв'язку, перевищення допустимих параметрів та результати самодіагностики записуються до енергонезалежної пам'яті. Це дозволяє виконувати подальший аналіз роботи МРП та оцінювати причини можливих

несправностей.

Особливістю розроблених алгоритмів є їх модульна побудова. Кожний програмний модуль виконує окрему функцію, взаємодіючи з іншими компонентами ПЗ через програмні інтерфейси. Такий підхід забезпечує простоту модернізації САМТС, можливість підключення нових датчиків та реалізації додаткових функцій без зміни загальної архітектури ПЗ [6, 9, 28].

Основні етапи обробки інформації та відповідні програмні функції узагальнені у табл. 3.2, що дозволяє наочно представити взаємозв'язок між окремими алгоритмами та їх призначенням.

Таблиця 3.2 – Основні етапи обробки інформації

Етап обробки інформації	Програмна функція	Призначення функції
1	2	3
Отримання даних від датчиків	<code>readSensors()</code>	зчитування температури, струму, напруги, вібрацій, газових параметрів та інших вимірювань
Первинна перевірка даних	<code>validateData()</code>	перевірка коректності отриманих значень та виявлення помилкових або відсутніх даних
Фільтрація сигналів	<code>filterSignals()</code>	зменшення впливу шумів, електромагнітних завад та випадкових коливань
Усереднення вимірювань	<code>CalculateAverage()</code>	обчислення середнього значення параметрів для підвищення достовірності результатів
Нормалізація параметрів	<code>normalizeData()</code>	приведення вимірювань до єдиного масштабу для подальшого аналізу

Продовження таблиці 3.2

1	2	3
Порівняння з допустимими межами	<code>checkLimits()</code>	визначення відповідності параметрів нормальному режиму роботи
Виявлення відхилень	<code>detectDeviation()</code>	визначення перевищення допустимих значень та передаварійних станів
Класифікація стану системи	<code>classifyState()</code>	встановлення поточного стану платформи: нормальний, попереджувальний або аварійний
Формування повідомлення	<code>generateAlert()</code>	створення інформаційного, попереджувального або аварійного повідомлення
Пакування телеметрії	<code>createTelemetryPacket()</code>	формування пакета даних для передачі на операторський пункт
Передача даних	<code>sendTelemetry()</code>	надсилання параметрів технічного стану через бездротовий канал зв'язку
Запис у журнал подій	<code>logEvent()</code>	збереження результатів вимірювань, аварійних подій та службової інформації

Як видно з табл. 3.2, процес обробки інформації в САМТС має послідовну структуру: від отримання первинних даних до формування телеметричного пакета та передачі інформації оператору. Такий підхід забезпечує своєчасне виявлення критичних відхилень, підвищує достовірність оцінювання технічного стану МРП та створює основу для реалізації ПЗ САМТС.

Отже, розроблені алгоритми обробки даних забезпечують повний цикл роботи САМТС МРП – від отримання інформації від датчиків до формування діагностичних повідомлень і передачі результатів оператору. Використання мікроконтролера STM32F407VG, сучасних методів цифрової обробки сигналів та модульної організації ПЗ забезпечує високу швидкодію, достовірність оцінювання технічного стану та надійність функціонування САМТС в умовах НС на ВО.

3.3 Реалізація програмного забезпечення системи автоматизації моніторингу

Після розроблення структури ПЗ та алгоритмів обробки інформації наступним етапом створення САМТС є реалізація ПЗ, яке забезпечує практичне виконання всіх функцій системи. Саме програмна реалізація поєднує апаратні засоби МРП з алгоритмами збору, обробки, аналізу та передачі інформації, забезпечуючи функціонування САМТС в режимі реального часу [12, 15, 17].

ПЗ розроблено для мікроконтролера STM32F407VG, який завдяки високій продуктивності та значному набору периферійних модулів дозволяє реалізувати всі необхідні функції САМТС. Для розроблення ПЗ використовується інтегроване середовище STM32CubeIDE, що підтримує створення програм мовою C, налагодження програмного коду, компіляцію проєкту та завантаження програм до пам'яті мікроконтролера [13-15].

Архітектура ПЗ побудована відповідно до модульного принципу, така структура забезпечує незалежне функціонування окремих програмних модулів, їх взаємодію через внутрішні програмні інтерфейси та можливість подальшої модернізації системи без зміни її загальної архітектури.

Після подачі живлення ПЗ виконує процедуру ініціалізації мікроконтролера, налаштовує тактовий генератор, конфігурує інтерфейси GPIO, UART, SPI, I²C, АЦП, таймери та контролер переривань. Одночасно

виконується перевірка працездатності всіх підключених периферійних пристроїв, після чого система переходить до режиму безперервного моніторингу [13, 14].

Основний цикл роботи ПЗ організований за принципом безперервного опитування вимірювальних пристроїв. У кожному циклі виконується зчитування інформації від датчиків, цифрова обробка сигналів, оцінювання технічного стану МРП, формування телеметричного пакета та передача інформації оператору.

Центральним компонентом ПЗ є функція головного циклу роботи САМТС.

Фрагмент програмного коду основного циклу роботи САМТС наведено у лістингу 3.1 (повний програмний код наведено у Додатку А).

Лістинг 3.1 – Основний цикл роботи САМТС

```
while (1)
{
    ReadSensors();
    FilterSignals();
    AnalyzeState();
    CreateTelemetryPacket();
    SendTelemetry();
    SaveLog();
}
```

Представлений фрагмент програмного коду демонструє загальну логіку функціонування ПЗ. Кожний програмний модуль виконується послідовно, після чого система переходить до наступного циклу збору інформації. Така організація забезпечує безперервний моніторинг технічного стану МРП.

Однією з найбільш відповідальних програмних процедур є отримання інформації від вимірювальних пристроїв. Для цього реалізовано окремий програмний модуль, який забезпечує опитування всіх датчиків незалежно від використовуваного інтерфейсу зв'язку.

Фрагмент програмного коду зчитування даних із датчиків наведено у лістингу 3.2 (повний програмний код наведено у Додатку Б).

Лістинг 3.2 – Зчитування даних із датчиків

```
void ReadSensors(void)
{
    temperature = ReadTemperature();
    voltage = ReadVoltage();
    current = ReadCurrent();
    vibration = ReadVibration();
    gas = ReadGasSensor();
}
```

Отримані вимірювання проходять перевірку правильності та цифрову обробку. На цьому етапі ПЗ виконує усереднення вимірювань, фільтрацію випадкових шумів та нормалізацію сигналів. Використання цифрової обробки дозволяє значно підвищити точність визначення технічного стану МРП, що особливо важливо під час роботи в умовах значних електромагнітних перешкод [21-23].

Після завершення обробки інформації ПЗ переходить до аналізу технічного стану. Для кожного контролюваного параметра виконується порівняння поточного значення з допустимими межами. Якщо хоча б один параметр перевищує встановлений поріг, система формує повідомлення про аварійний стан.

Фрагмент програмного коду контролю допустимих параметрів наведено у лістингу 3.3.

Лістинг 3.3 – Контроль допустимих параметрів

```
if(temperature > TEMP_MAX)
{
    alarm = 1;
    SendAlarm("Overheat");
}
```

Аналогічні перевірки виконуються для напруги живлення, струму, рівня вібрацій та концентрації небезпечних газів. Усі результати аналізу використовуються під час формування загальної оцінки технічного стану МРП.

Для передачі інформації оператору реалізовано окремий програмний модуль формування телеметричного пакета. До складу пакета входять усі виміряні параметри, службова інформація, часові мітки та повідомлення про можливі несправності.

Фрагмент програмного коду формування телеметричного пакету наведено у лістингу 3.4 (повний програмний код наведено у Додатку В).

Лістинг 3.4 – Формування телеметричного пакета

```
Telemetry.temp = temperature;  
Telemetry.voltage = voltage;  
Telemetry.current = current;  
Telemetry.vibration = vibration;  
Telemetry.gas = gas;
```

Після формування пакета інформація передається оператору за допомогою бездротового інтерфейсу зв'язку. Передача даних виконується із контролем правильності отриманих пакетів, що дозволяє мінімізувати втрати інформації при роботі у складних умовах експлуатації.

Для забезпечення надійності роботи ПЗ реалізовано систему журналювання подій. Усі результати вимірювань, повідомлення про несправності, аварійні ситуації та службові події автоматично записуються до енергонезалежної пам'яті. Це дозволяє виконувати подальший аналіз роботи САМТС та оцінювати ефективність функціонування МРП.

Розроблене ПЗ відповідає сучасним принципам створення вбудованих систем та забезпечує ефективну взаємодію з апаратною частиною, реалізованою на базі мікроконтролера STM32F407VG. Використання сучасного середовища STM32CubeIDE, модульної організації програмного коду та сучасних алгоритмів цифрової обробки інформації дозволяє забезпечити високу швидкодію, надійність та стабільність роботи САМТС МРП [13-17, 19-23].

3.4 Інтерфейс оператора системи автоматизації моніторингу

Одним із ключових компонентів САМТС МРП є інтерфейс оператора, який забезпечує взаємодію людини з програмно-апаратним комплексом. Саме за допомогою інтерфейсу оператор отримує інформацію про поточний стан МРП, контролює значення основних технічних параметрів, аналізує повідомлення про можливі несправності та приймає рішення щодо подальших дій. Від якості побудови інтерфейсу значною мірою залежать швидкість реагування оператора на аварійні ситуації, зручність експлуатації САМТС та ефективність виконання робіт у НС на ВО [11, 21].

Під час проектування інтерфейсу оператора враховувалися сучасні принципи побудови систем диспетчерського контролю, відповідно до яких інформація повинна бути максимально наочною, структурованою та легкою для сприйняття. Програмний інтерфейс містить лише найбільш важливі параметри технічного стану МРП, а також засоби оперативного відображення аварійних повідомлень [10, 21].

Загальна структура інтерфейсу оператора наведена на рис. 3.3.

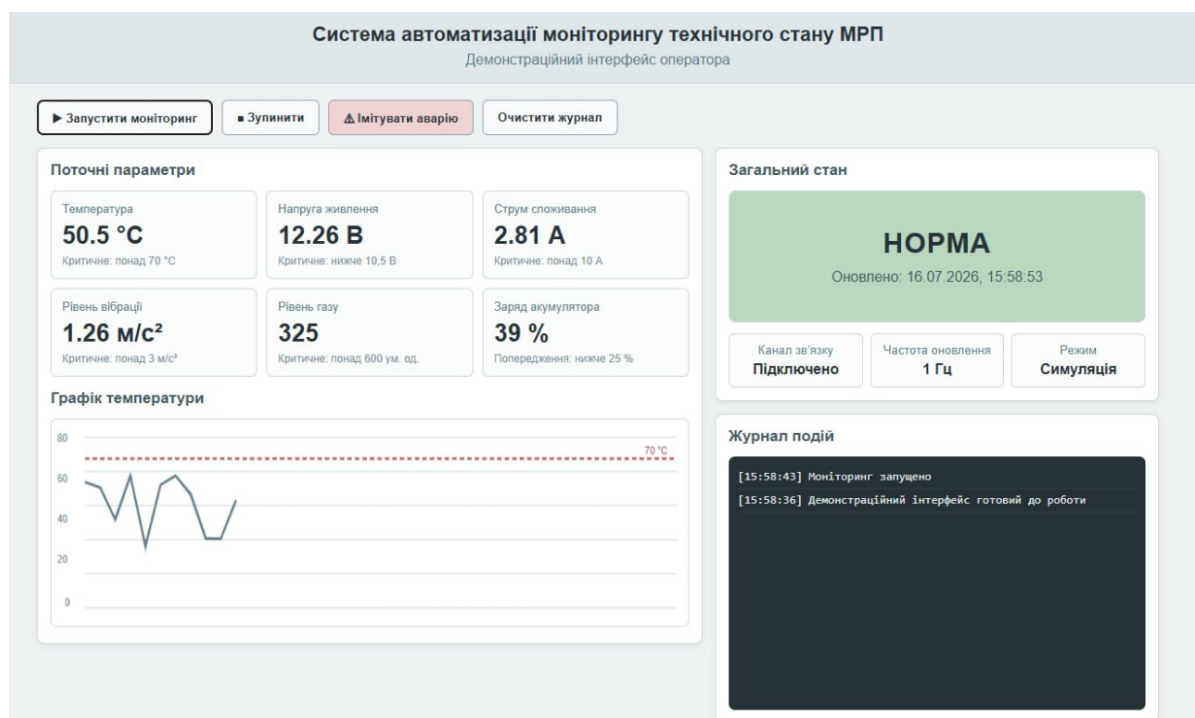


Рисунок 3.3 – Загальна структура інтерфейсу оператора САМТС

Інтерфейс оператора складається з області відображення телеметричних параметрів, панелі індикації поточного стану системи, журналу подій, області відображення аварійних повідомлень та панелі керування процесом моніторингу. Така структура дозволяє оператору одночасно контролювати всі основні параметри МРП без необхідності переходу між окремими програмними вікнами.

У верхній частині програмного вікна відображаються службові дані, що містять інформацію про дату та час роботи системи, стан каналу зв'язку, рівень заряду акумуляторної батареї, координати МРП та поточний режим її функціонування. Ці параметри дозволяють оператору швидко оцінити загальний стан РС ще до аналізу детальної телеметричної інформації.

Центральну частину інтерфейсу займає область відображення контрольованих параметрів. Тут у режимі реального часу виводяться температура силових елементів, напруга живлення, струм споживання, рівень вібрацій, концентрація небезпечних газів, швидкість руху платформи та інші параметри, які використовуються під час оцінювання технічного стану. Для кожного параметра передбачено цифрову індикацію та кольорову індикацію стану. У нормальному режимі роботи показники відображаються зеленим кольором, при наближенні до допустимих меж – жовтим, а при виникненні аварійної ситуації – червоним кольором.

Значну увагу приділено реалізації системи повідомлень. У випадку перевищення допустимих значень контрольованих параметрів ПЗ автоматично формує повідомлення про несправність, яке супроводжується візуальною індикацією та, за необхідності, звуковим сигналом. Такий підхід дозволяє мінімізувати час реагування оператора на виникнення потенційно небезпечної ситуації [19, 20].

Для забезпечення подальшого аналізу роботи системи в інтерфейсі реалізовано журнал подій. До журналу автоматично заносяться результати вимірювань, повідомлення про перевищення допустимих параметрів, зміни режимів роботи, втрати зв'язку та інші службові повідомлення. Наявність

журналу дозволяє проводити аналіз технічного стану МРП після завершення роботи та визначати причини виникнення можливих несправностей.

Важливою функцією інтерфейсу є можливість оперативного керування процесом моніторингу. Оператор може запускати або зупиняти процес збору інформації, здійснювати повторне опитування датчиків, очищувати журнал подій, зберігати результати вимірювань та формувати звіти про роботу МРП. Такий підхід значно спрощує експлуатацію САМТС та підвищує її функціональні можливості.

Для реалізації інтерфейсу оператора використовуються сучасні бібліотеки графічного програмування, що забезпечують побудову віконного інтерфейсу, відображення телеметричних параметрів та взаємодію користувача із системою. Інтерфейс побудовано за модульним принципом, що дозволяє легко розширювати його функціональні можливості без зміни структури всього ПЗ [15, 17].

У табл. 3.3 наведено основні елементи інтерфейсу оператора.

Таблиця 3.3 – Основні елементи інтерфейсу оператора

Елемент інтерфейсу	Призначення	Функціональні можливості
1	2	3
Головне інформаційне вікно	відображення загального стану системи	виведення основної інформації про роботу САМТС та МРП
Панель технічних параметрів	контроль поточних вимірювань	відображення температури, напруги, струму, рівня вібрацій, концентрації газів, швидкості руху та інших параметрів
Індикатор стану системи	оцінювання технічного стану	індикація режимів «Норма», «Попередження» або «Аварія» із використанням кольорової сигналізації
Панель телеметричних даних	відображення інформації від бортової системи	показ координат, часу роботи, рівня заряду акумулятора, стану каналу зв'язку та інших службових параметрів

Продовження таблиці 3.3

1	2	3
Журнал подій	реєстрація результатів роботи системи	автоматичний запис повідомлень про несправності, аварійні ситуації, результати самодіагностики та службові події
Панель аварійних повідомлень	інформування оператора про критичні ситуації	відображення текстових повідомлень про перевищення допустимих параметрів із можливістю підтвердження оператором
Панель керування	керування процесом моніторингу	запуск і зупинка системи, повторне опитування датчиків, очищення журналу подій, збереження звітів
Панель зв'язку	контроль обміну інформацією	відображення стану бездротового каналу зв'язку, рівня сигналу та інтенсивності передачі даних
Панель системних повідомлень	відображення службової інформації	інформування про запуск системи, підключення датчиків, завершення передачі даних
Кнопка формування звіту	формування документації	автоматичне створення звітів про технічний стан МРП за вибраний проміжок часу

Реалізація інтерфейсу оператора починається зі створення головного вікна, у якому розміщуються всі інформаційні панелі та елементи керування.

Фрагмент програмного створення головного вікна інтерфейсу оператора наведено у лістингу 3.5 (повний програмний код наведено у Додатку Г).

Лістинг 3.5 – Створення головного вікна інтерфейсу оператора

```
#include <QApplication>
#include <QMainWindow>
int main(int argc, char *argv[])
{
    QApplication app(argc, argv);
    QMainWindow window;
    window.setWindowTitle("Система моніторингу МРП");
    window.resize(1200, 700);
    window.show();
    return app.exec();
}
```

Після створення головного вікна інтерфейсу оператора ПЗ формує інформаційні панелі для відображення поточних параметрів технічного стану МРП.

Фрагмент програмного відображення параметрів технічного стану МРП наведено у лістингу 3.6 (повний програмний код наведено у Додатку Г).

Лістинг 3.6 – Відображення параметрів технічного стану МРП

```
QLabel *tempLabel = new QLabel();
tempLabel->setText("Температура: 42 °C");
QLabel *voltLabel = new QLabel();
voltLabel->setText("Напруга: 12.1 В");
QLabel *currentLabel = new QLabel();
currentLabel->setText("Струм: 1.8 А");
```

Під час надходження нової інформації від мікроконтролера STM32 ПЗ автоматично оновлює значення всіх інформаційних полів без необхідності перезапуску програми.

Фрагмент програмного оновлення інформації в інтерфейсі наведено у лістингу 3.7 (повний програмний код наведено у Додатку Г).

Лістинг 3.7 – Оновлення інформації в інтерфейсі

```
void MainWindow::updateTelemetry(Telemetry data)
{
    ui->tempValue->setText(QString::number(data.temperature));
    ui->voltValue->setText(QString::number(data.voltage));
    ui->currentValue->setText(QString::number(data.current));
    ui->gasValue->setText(QString::number(data.gas));
}
```

У випадку виникнення аварійної ситуації ПЗ автоматично формує відповідне повідомлення.

Фрагмент програмного відображення аварійного повідомлення наведено у лістингу 3.8 (повний програмний код наведено у Додатку Г).

Лістинг 3.8 – Відображення аварійного повідомлення

```
if (data.temperature > TEMP_MAX)
{
    QMessageBox::warning(this,
                          "Попередження",
                          "Перевищено допустиму температуру!");
}
```

Представлені фрагменти програмного коду демонструють основні принципи побудови інтерфейсу та організації взаємодії оператора із САМТС. Реальна програмна реалізація містить значно більшу кількість функцій, однак наведені приклади достатньо повно характеризують загальну структуру ПЗ.

Розроблений інтерфейс оператора забезпечує зручне відображення інформації про технічний стан МРП, оперативне інформування про виникнення аварійних ситуацій та ефективну взаємодію оператора з САМТС. Побудова інтерфейсу за модульним принципом забезпечує можливість його подальшої модернізації, інтеграції нових інформаційних панелей та розширення функціональних можливостей відповідно до вимог сучасних систем автоматизації [10, 11, 15, 21].

3.5 Тестування програмного забезпечення системи автоматизації моніторингу

Після завершення розроблення ПЗ САМТС МРП було проведено комплексне тестування його функціональних можливостей. Метою тестування є перевірка правильності реалізації алгоритмів збору, обробки та передачі інформації, оцінювання працездатності програмних модулів, а також підтвердження стабільності роботи системи в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації на ВО. Проведення тестування дозволяє своєчасно виявити програмні помилки, оцінити ефективність реалізованих алгоритмів та підтвердити відповідність ПЗ поставленим вимогам [15, 17].

Перевірка функціонування ПЗ виконувалася поетапно. Спочатку тестувалися окремі програмні модулі, після чого здійснювалася перевірка їх спільної роботи у складі САМТС. Такий підхід дозволяє локалізувати можливі помилки ще на ранніх етапах розроблення та значно скоротити час налагодження ПЗ [12, 17].

Загальна схема процесу тестування ПЗ зображена на рис. 3.4. Вона відображає послідовність перевірки окремих функціональних модулів, аналіз отриманих результатів та оцінювання працездатності САМТС.



Рисунок 3.4 – Схема тестування ПЗ САМТС

На першому етапі перевірялася правильність ініціалізації мікроконтролера STM32F407VG та всіх периферійних модулів. Контролювалася робота АЦП, таймерів, інтерфейсів UART, SPI, I²C, а також коректність обміну інформацією між мікроконтролером та вимірювальними пристроями. Результати тестування підтвердили правильність конфігурації всіх периферійних модулів та відсутність помилок під час запуску ПЗ [13, 14].

Наступним етапом стала перевірка програмних модулів збору інформації. Під час тестування контролювалася правильність отримання даних від температурних датчиків, датчиків струму, напруги, вібраційних сенсорів та газоаналізаторів. Особлива увага приділялася стабільності роботи системи при безперервному опитуванні великої кількості вимірювальних каналів. Встановлено, що програмне забезпечення забезпечує своєчасне отримання інформації від усіх датчиків без втрати вимірювальних даних.

Після перевірки збору інформації виконувалося тестування алгоритмів цифрової обробки сигналів. У ході випробувань оцінювалася ефективність роботи цифрових фільтрів, алгоритмів усереднення результатів вимірювання, нормалізації параметрів та контролю правильності отриманих даних. Отримані результати підтвердили, що використання цифрової обробки дозволяє істотно зменшити вплив випадкових шумів та електромагнітних завад, що особливо важливо під час експлуатації МРП у НС на ВО [21-23].

Окремо перевірялася робота алгоритмів аналізу технічного стану. Для цього програмно моделювалися ситуації перевищення допустимих значень температури, струму, напруги, рівня вібрацій та концентрації вибухонебезпечних газів. У всіх випадках система своєчасно формувала повідомлення про виникнення небезпечної ситуації та передавала відповідну інформацію оператору. Отже, було підтверджено правильність реалізації алгоритмів діагностування технічного стану МРП [19, 20].

Особлива увага приділялася тестуванню бездротової передачі даних. Перевірялася стійкість роботи САМТС при короткочасних втратах зв'язку, повторній передачі пакетів та відновленні з'єднання після виникнення перешкод. Проведені випробування показали, що ПЗ автоматично відновлює передачу телеметричної інформації після відновлення каналу зв'язку без втрати критично важливих даних.

Наступним етапом стало тестування інтерфейсу оператора. Перевірялася правильність відображення телеметричних параметрів, своєчасність оновлення інформації, формування аварійних повідомлень та

ведення журналу подій.

Для оцінювання працездатності ПЗ було проведено комплекс функціональних випробувань, результати яких наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати функціонального тестування ПЗ

Об'єкт тестування	Умови проведення тесту	Очікуваний результат	Отриманий результат	Висновок
1	2	3	4	5
Ініціалізація мікроконтролера STM32	запуск програмного забезпечення	коректна ініціалізація всіх периферійних модулів	ініціалізація виконана без помилок	пройдено
Зчитування температурного датчика	передача тестових значень температури	правильне відображення температури	дані отримано та відображено коректно	пройдено
Зчитування датчика напруги	імітація зміни напруги живлення	коректне вимірювання напруги	вимірювання виконано без відхилень	пройдено
Зчитування датчика струму	зміна навантаження електродвигуна	відображення зміни струму	параметри оновлюються в реальному часі	пройдено
Контроль вібрацій	імітація підвищених вібрацій	фіксація перевищення допустимого рівня	попередження сформовано своєчасно	пройдено
Газоаналізатор	подавання тестової концентрації газу	формування аварійного повідомлення	аварійний сигнал сформовано	пройдено
Алгоритм цифрової фільтрації	подавання зашумленого сигналу	зменшення впливу випадкових шумів	отримано стабільні результати вимірювання	пройдено
Аналіз технічного стану	перевищення допустимої температури	формування повідомлення про аварію	повідомлення сформовано автоматично	пройдено

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4	5
Передача телеметричних даних	передавання інформації оператору	передача без втрати пакетів	дані передано успішно	пройдено
Втрата каналу зв'язку	імітація розриву бездротового з'єднання	автоматичне відновлення передачі	передача відновлена після появи зв'язку	пройдено
Журналювання подій	формування аварійної ситуації	запис інформації до журналу	запис виконано коректно	пройдено
Інтерфейс оператора	безперервне оновлення параметрів	відображення даних у режимі реального часу	інформація оновлюється без затримок	пройдено

Під час проведення функціонального тестування було перевірено працездатність усіх основних програмних модулів САМТС. Як видно з табл. 3.4, усі випробування завершилися успішно. ПЗ забезпечує стабільний збір даних від датчиків, правильну обробку інформації, своєчасне формування повідомлень про аварійні ситуації, надійну передачу телеметричних даних та коректне відображення інформації в інтерфейсі оператора.

Під час тестування також оцінювалася продуктивність ПЗ. Контролювався час виконання основного циклу роботи САМТС, який включає отримання інформації від датчиків, цифрову обробку сигналів, аналіз технічного стану та передачу даних оператору. Встановлено, що середній час виконання одного циклу становить менше 100 мс, що забезпечує практично безперервний контроль технічного стану МРП та відповідає вимогам систем реального часу [13, 16].

Додатково перевірялася стабільність роботи ПЗ при тривалому безперервному функціонуванні. Імітація багатогодинної роботи показала відсутність зависань, втрати інформації або порушення роботи окремих програмних модулів. Це свідчить про достатній рівень надійності

розробленого ПЗ та можливість його використання під час тривалої експлуатації МРП.

За результатами проведеного тестування встановлено, що всі програмні модулі функціонують відповідно до розроблених алгоритмів, забезпечують правильний збір та обробку інформації, своєчасне формування аварійних повідомлень і стабільний обмін телеметричними даними між МРП та оператором. Отримані результати підтверджують працездатність САМТС та можливість її практичного застосування для контролю технічного стану МРП під час НС на ВО [10, 15, 19, 21].

3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі роботи виконано розроблення ПЗ САМТС МРП, призначеної для роботи під час НС на ВО. Запропоновано модульну архітектуру ПЗ, яка забезпечує чіткий розподіл функцій між окремими програмними компонентами, підвищує надійність функціонування системи та спрощує її подальшу модернізацію.

Розроблено алгоритми збору, цифрової обробки та аналізу інформації, які забезпечують своєчасне отримання даних від датчиків, їх фільтрацію, перевірку достовірності, оцінювання технічного стану МРП та формування телеметричних повідомлень. Реалізацію ПЗ виконано для мікроконтролера STM32F407VG із використанням середовища STM32CubeIDE, що забезпечує ефективне використання периферійних ресурсів мікроконтролера та стабільну роботу САМТС в режимі реального часу.

Розроблено інтерфейс оператора САМТС, який забезпечує зручне відображення телеметричної інформації, контроль основних параметрів технічного стану, оперативне інформування про виникнення аварійних ситуацій та ведення журналу подій. Запропонована структура інтерфейсу сприяє швидкому прийняттю рішень оператором під час експлуатації МРП у складних умовах.

Проведене функціональне тестування ПЗ підтвердило працездатність усіх програмних модулів, правильність реалізації алгоритмів збору, обробки та передачі інформації, а також стабільність роботи ПЗ при тривалому функціонуванні. Результати випробувань засвідчили, що САМТС забезпечує безперервний контроль технічного стану МРП, своєчасне виявлення небезпечних відхилень контрольованих параметрів і надійний обмін телеметричними даними з оператором.

Отримані результати підтверджують, що розроблене ПЗ повністю відповідає поставленій меті роботи, забезпечує високу надійність, швидкодію та ефективність функціонування САМТС й може бути використане як основа для практичного впровадження САМТС МРП спеціального призначення.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ МОНІТОРИНГУ

4.1 Організація експериментальних досліджень системи автоматизації моніторингу

Після завершення розроблення апаратного та ПЗ САМТС МРП наступним етапом роботи є проведення експериментальних досліджень, спрямованих на перевірку працездатності створеної системи в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації. Основною метою експериментальних досліджень є підтвердження правильності функціонування програмно-апаратного комплексу, оцінювання точності вимірювання контрольованих параметрів, визначення швидкодії системи та перевірка її здатності своєчасно виявляти потенційні несправності МРП під час НМ на ВО [13-17].

Організація експериментальних досліджень виконувалася відповідно до сучасних принципів випробування систем автоматизації та вбудованих інформаційно-вимірювальних комплексів. Під час проведення досліджень особлива увага приділялася забезпеченню повторюваності експериментів, достовірності отриманих результатів та можливості кількісного оцінювання ефективності функціонування САМТС [10, 21].

Загальна структура експериментального стенда наведена на рис. 4.1. До його складу входять МРП, мікроконтролер STM32F407VG, комплект вимірювальних датчиків, модуль бездротового зв'язку, ПК оператора та ПЗ САМТС. Така конфігурація дозволяє відтворити реальні умови функціонування системи та оцінити взаємодію всіх її компонентів.

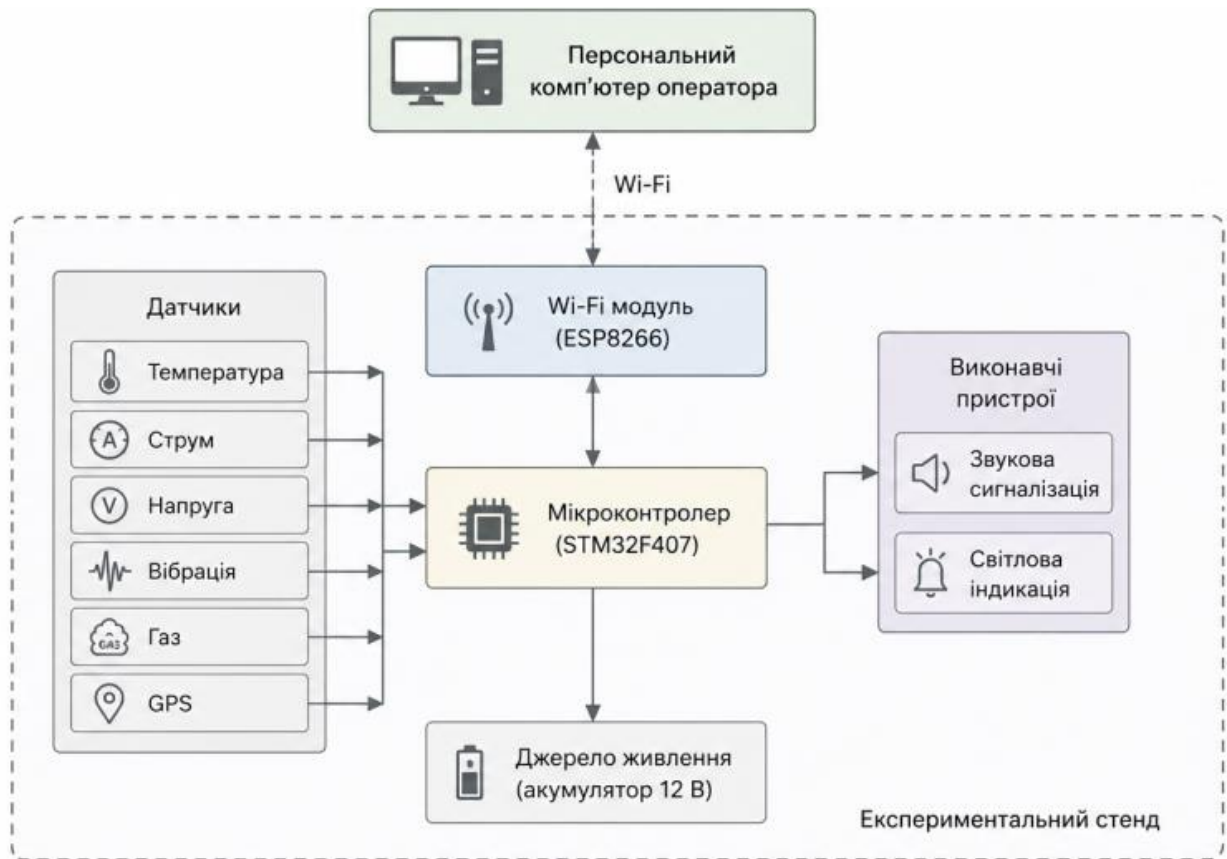


Рисунок 4.1 – Загальна структура експериментального стенда

Для проведення експериментальних досліджень використовувався комплект вимірювального обладнання, технічні характеристики якого наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики комплекту вимірювального обладнання експериментального стенда

Найменування обладнання	Модель	Основні технічні характеристики	Призначення
1	2	3	4
Мікроконтролер	STM32F407VG	ARM Cortex-M4, 168 МГц, Flash 1 МБ, SRAM 192 КБ, ADC 12 біт	центральний контролер CAMTC
Датчик температури	DS18B20	діапазон: – 55...+125 °C; похибка ±0,5 °C; інтерфейс 1-Wire	контроль температури компонентів та електроприводів

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4
Датчик струму	ACS712-20A	діапазон ± 20 А; чутливість 100 мВ/А; живл. 5 В	контроль струму споживання електродвигунів
Датчик напруги	Voltage Sensor 0–25 V	діапазон вимірювання 0 – 25 В; похибка не більше 1 %	контроль напруги живлення системи
Датчик вібрації	SW-420	діапазон частот 1 – 1000 Гц; цифровий вихід	виявлення підвищених механічних вібрацій
Газовий датчик	MQ-2	виявлення LPG, пропану, бутану, метану, диму; живлення 5 В	контроль концентрації вибухонебезпечних газів
GPS-модуль	NEO-6M	точність позиціонування до 2,5 м; UART; частота оновлення 5 Гц	визначення координат МРП
Бездротовий модуль	ESP8266 Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n; UART; швидкість до 72 Мбіт/с	передача телеметричних даних оператору
Джерело живлення	Li-Ion акумулятор	напруга 12 В; ємність 6000 мА·год	автономне живлення МРП
ПК оператора	ПК	Intel Core i5, RAM 16 ГБ, SSD 512 ГБ, Windows 11	обробка, відображення та архівування телеметричної інформації

Перед початком експериментів виконувалося калібрування всіх вимірювальних каналів. Під час калібрування перевірялася правильність роботи датчиків, здійснювалася корекція коефіцієнтів перетворення, а також контролювалася стабільність показів вимірювальних пристроїв. Такий підхід дозволяє мінімізувати систематичні похибки та забезпечити необхідну точність отриманих результатів [21-23].

Наступним етапом була перевірка функціонування програмно-апаратного комплексу у штатному режимі роботи. На цьому етапі контролювалася правильність ініціалізації мікроконтролера STM32F407VG, стабільність опитування всіх підключених датчиків, швидкість цифрової обробки сигналів, формування телеметричних пакетів та передача інформації оператору. Одночасно оцінювалася працездатність інтерфейсу оператора, який був розроблений у третьому розділі роботи.

Особливу увагу приділено моделюванню типових режимів експлуатації МРП. Під час експериментів послідовно створювалися ситуації, характерні для роботи на ВО: підвищення температури електронних компонентів, збільшення струму споживання електроприводів, виникнення додаткових механічних вібрацій, зниження напруги живлення, поява небезпечних концентрацій газів та короткочасне порушення бездротового каналу зв'язку. Для кожної із зазначених ситуацій оцінювалася швидкість реагування САМТС, правильність формування аварійних повідомлень та ефективність передачі інформації оператору [19, 20].

Важливим елементом експериментальних досліджень є визначення періоду опитування вимірювальних пристроїв. Частота отримання інформації повинна забезпечувати своєчасне виявлення небезпечних змін параметрів без надмірного навантаження на обчислювальні ресурси мікроконтролера. Період оновлення інформації визначається співвідношенням

$$T = \frac{1}{f}, \quad (4.1)$$

де T – період опитування датчиків, с;

f – частота збору вимірювальної інформації, Гц.

При частоті опитування $f = 10$ Гц період оновлення даних становить:

$$T = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ с.}$$

Отримане значення свідчить, що САМТС виконує повний цикл оновлення інформації кожні 100 мс, що є достатнім для своєчасного контролю технічного стану МРП та відповідає вимогам систем реального часу [13, 16].

Під час експериментальних досліджень також оцінювалася швидкодія ПЗ. Для цього визначався сумарний час виконання одного циклу роботи САМТС, який включає отримання інформації від датчиків, цифрову обробку сигналів, аналіз технічного стану, формування телеметричного пакета та передачу інформації оператору. Практичні вимірювання показали, що середня тривалість одного циклу не перевищує 100 мс, що забезпечує практично безперервний контроль стану МРП.

Окрім оцінювання швидкодії, перевірялася надійність функціонування САМТС під час тривалої безперервної роботи. Експеримент передбачав багаторазове повторення циклів вимірювання та передачі інформації без перезавантаження ПЗ. За результатами досліджень не було зафіксовано втрати вимірювальних даних, зависань ПЗ або порушення функціонування окремих програмних модулів, що свідчить про достатній рівень надійності розробленої САМТС МРП.

Особливу увагу приділено перевірці працездатності САМТС при виникненні аварійних ситуацій. Під час експериментів імітувалися перевищення допустимих температур, струму, напруги, рівня вібрацій та концентрації вибухонебезпечних газів. У всіх випадках САМТС своєчасно виявляла відхилення, формувала відповідні повідомлення та передавала їх оператору. Це підтверджує правильність реалізованих алгоритмів аналізу технічного стану МРП та ефективність роботи ПЗ.

Отримані експериментальні результати створюють основу для подальшого дослідження ефективності функціонування САМТС у різних

режимах експлуатації. Проведені дослідження підтверджують, що розроблений програмно-апаратний комплекс забезпечує надійний контроль технічного стану МРП, стабільний збір і передачу телеметричних даних, а також своєчасне виявлення потенційно НС під час виконання робіт на ВО.

4.2 Оцінка ефективності системи автоматизації моніторингу

Оцінка ефективності САМТС МРП є важливим етапом експериментальних досліджень, оскільки дозволяє кількісно підтвердити доцільність запропонованих апаратних і програмних рішень. Ефективність системи визначається її здатністю своєчасно отримувати інформацію від датчиків, виконувати цифрову обробку сигналів, виявляти відхилення контрольованих параметрів та передавати результати оператору в режимі реального часу [19, 20].

Загальна схема оцінювання ефективності САМТС зображена на рис. 4.2. Вона відображає послідовність отримання експериментальних даних, обчислення показників ефективності та формування висновків щодо працездатності системи.



Рисунок 4.2 – Загальна схема оцінювання ефективності САМТС

Для оцінювання ефективності було використано показники швидкодії, достовірності виявлення аварійних станів, стабільності передачі телеметричних даних, енергоспоживання та коефіцієнта готовності системи. Такий набір показників дозволяє комплексно оцінити роботу САМТС як програмно-апаратного комплексу, що функціонує в умовах НС на ВО [21-23].

Основним показником, який характеризує швидкість системи, є час виконання одного циклу моніторингу. До цього циклу входять операції зчитування даних із датчиків, цифрової фільтрації, аналізу параметрів, формування телеметричного пакета та передачі інформації оператору. За результатами експериментальних досліджень середній час одного циклу моніторингу становив $t_y = 0,1$ с.

Частота оновлення інформації (f) визначається за формулою:

$$f = \frac{1}{t_y}, \quad (4.1)$$

підставимо експериментальне значення:

$$f = \frac{1}{0,1} = 10 \text{ Гц.}$$

Отже, система оновлює інформацію про технічний стан МРП 10 разів за секунду, що є достатнім для оперативного контролю параметрів у реальному часі.

Для оцінки достовірності виявлення аварійних станів було проведено серію тестових випробувань, під час яких імітувалися перевищення допустимих значень температури, струму, напруги, вібрацій та концентрації газу. Загальна кількість тестових аварійних ситуацій становила $N_{\text{заг}} = 50$, а кількість правильно виявлених аварійних ситуацій становила $N_{\text{вияв}} = 48$.

Достовірність виявлення аварійних станів (D) визначається за формулою:

$$D = \frac{N_{\text{вияв}}}{N_{\text{заг}}} \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

підставимо експериментальне значення:

$$D = \frac{48}{50} \cdot 100\% = 96 \%.$$

Отримане значення свідчить, що система забезпечує високу достовірність виявлення небезпечних відхилень контрольованих параметрів.

Важливим показником ефективності є надійність передачі телеметричних даних. Під час тестування було сформовано та передано $N_{\text{пак}}=1000$, а телеметричних пакетів, з яких операторський пункт успішно прийняв $N_{\text{пр}}=985$ пакетів.

Коефіцієнт успішної передачі даних ($K_{\text{пер}}$) визначається за формулою:

$$K_{\text{пер}} = \frac{N_{\text{пр}}}{N_{\text{пак}}} \cdot 100\%, \quad (4.3)$$

підставимо експериментальне значення:

$$K_{\text{пер}} = \frac{985}{1000} \cdot 100\% = 98,5 \%.$$

Отже, коефіцієнт успішної передачі даних $K_{\text{пер}}=98,5 \%$, що підтверджує достатню стабільність бездротового каналу передачі інформації та ефективність механізмів контролю цілісності даних.

Для оцінювання енергетичної ефективності САМТС було визначено споживану потужність її основних електронних компонентів. При напрузі живлення $U=12$ В та середньому струмі споживання $I=0,45$ А, споживана потужність дорівнює:

$$P=U \cdot I, \quad (4.4)$$

підставимо експериментальне значення:

$$P=12 \cdot 0,45=5,4 \text{ Вт.}$$

Отримане значення споживаної потужності $P=5,4$ Вт свідчить, що САМТС має помірне енергоспоживання та може використовуватися у складі МРП без суттєвого зменшення її автономності.

Для оцінювання тривалості автономної роботи САМТС ($t_{\text{а\text{в\text{т}}}}$) використано акумуляторну батарею ємністю $C=6$ А/год.

Орієнтовний час автономної роботи системи ($t_{\text{а\text{в\text{т}}}}$) визначається за формулою:

$$t_{\text{а\text{в\text{т}}}}=\frac{C}{I}, \quad (4.5)$$

підставляючи числові значення, отримаємо:

$$t_{\text{а\text{в\text{т}}}}=\frac{6}{0,45}=13,3 \text{ год.}$$

Отже, САМТС може працювати автономно приблизно 13,3 год, що є достатнім для проведення тривалих моніторингових операцій.

Ще одним узагальненим показником ефективності є коефіцієнт готовності системи, який характеризує частку часу, протягом якого система перебуває у працездатному стані.

Коефіцієнт готовності системи (K_z) визначається за формулою:

$$K_z = \frac{t_{роб}}{t_{роб} + t_{прост}} \cdot 100\%, \quad (4.6)$$

де $t_{роб}$ – час працездатної роботи системи, год;

$t_{прост}$ – час простою системи, год.

Під час тривалого тестування системи час працездатної роботи системи становив $t_{роб}=120$ год, а час простою $t_{прост}=2$ год.

Після підстановки числових значень отримаємо:

$$K_z = \frac{120}{120 + 2} \cdot 100\% = 98,4\%.$$

Отримане значення коефіцієнту готовності системи $K_z=98,4\%$ підтверджує високий рівень готовності САМТС до практичного використання.

Результати проведених розрахунків доцільно узагальнити у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати оцінювання ефективності САМТС

Показник ефективності	Позначення	Розраховане значення	Висновок
1	2	3	4
Час одного циклу моніторингу	t_u	0,1 с	забезпечує роботу в реальному часі
Частота оновлення даних	f	10 Гц	достатня для оперативного контролю

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4
Достовірність виявлення аварій	D	96 %	висока точність виявлення відхилень
Коефіцієнт передачі пакетів	$K_{пер}$	98,5 %	стабільний обмін телеметрією
Споживана потужність	P	5,4 Вт	помірне енергоспоживання
Час автономної роботи	$t_{авт}$	13,3 год	достатній для тривалих випробувань
Коефіцієнт готовності	K_2	98,4 %	висока готовність системи

Як видно з табл. 4.2, розроблена САМТС має достатню швидкодію, високу достовірність виявлення аварійних станів, стабільну передачу телеметричних даних та помірне енергоспоживання. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих технічних рішень і можливість практичного використання системи для контролю технічного стану МРП.

Отже, проведене оцінювання ефективності показало, що САМТС відповідає основним вимогам до швидкодії, надійності та автономності. Система забезпечує своєчасне виявлення критичних відхилень параметрів, стабільний обмін інформацією з операторським пунктом та достатній рівень готовності для використання під час НС виконання робіт на ВО.

4.3 Оцінювання динамічних характеристик системи автоматизації моніторингу

Однією з основних вимог до САМТС МРП є її здатність оперативно реагувати на зміну контрольованих параметрів. Під час виконання аварійно-рятувальних робіт на ВО навіть незначна затримка під час виявлення перевищення допустимих температур, рівня вібрацій, струму електродвигунів або концентрації вибухонебезпечних газів може призвести до втрати працездатності платформи або створення небезпечної ситуації.

Саме тому важливим етапом експериментальних досліджень є оцінювання динамічних характеристик розробленої САМТС [19, 20].

При дослідженні інформаційно-вимірювальних систем процес збору, цифрової обробки та передачі інформації часто подають у вигляді аперіодичної ланки першого порядку, яка достатньо точно описує інерційні властивості системи. Такий підхід дозволяє оцінити характер реакції програмно-апаратного комплексу на зміну вхідного сигналу [19].

Передавальна функція ($W(s)$) САМТС має вигляд:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (4.6)$$

де K – коефіцієнт передачі системи;

T – стала часу;

s – оператор Лапласа.

Для розробленої САМТС коефіцієнт передачі K прийнято рівним одиниці, оскільки інформація після цифрової обробки передається без масштабного перетворення, а середня стала часу T , визначена під час експериментальних досліджень і становить 0,1 с. Тому передавальна функція набуває вигляду:

$$W(s) = \frac{1}{0,1s + 1}.$$

Загальна структурна схема аперіодичної ланки наведена на рис. 4.3.



Рисунок 4.3 – Структурна схема передавальної функції САМТС

Представлена схема відображає загальний принцип проходження інформації через САМТС. Вхідним сигналом є інформація, що надходить від вимірювальних датчиків, після чого вона проходить цифрову обробку, аналізується ПЗ та передається оператору у вигляді телеметричних повідомлень.

Для оцінювання динамічних властивостей системи було досліджено її реакцію на стрибкоподібну зміну одного з контрольованих параметрів. Аналіз експериментальних результатів показав, що вихідний сигнал змінюється плавно, без автоколивань та без значного перерегулювання, що є характерною особливістю аперіодичної ланки першого порядку. Такий характер перехідного процесу забезпечує високу достовірність оцінювання технічного стану МРП та виключає появу хибних аварійних повідомлень.

Графічне представлення перехідного процесу наведено на рис. 4.4. З аналізу характеристики видно, що після зміни вхідного сигналу система плавно переходить до нового усталеного режиму роботи без коливань та нестійких режимів. Це свідчить про достатній запас стійкості та правильність вибору алгоритмів цифрової обробки інформації.

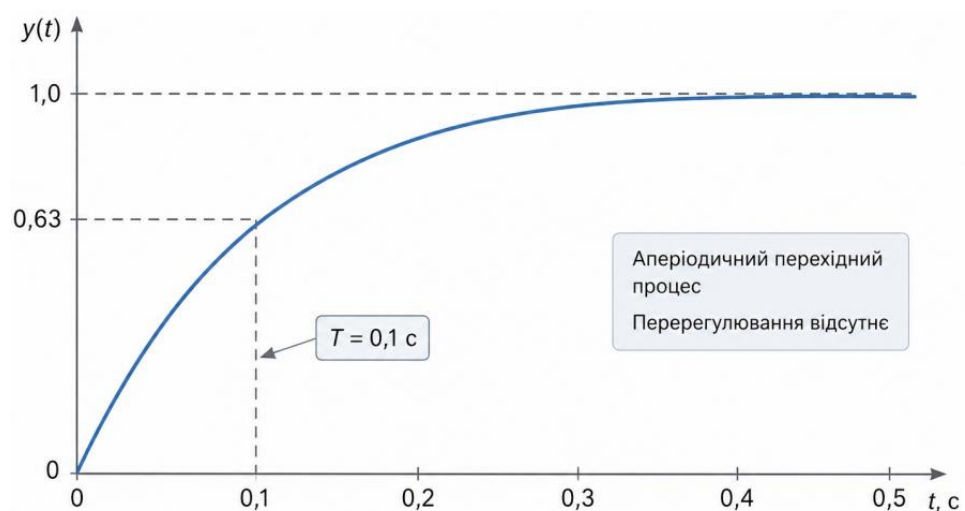


Рисунок 4.4 – Графік перехідного процесу

Під час експериментальних досліджень також оцінювався вплив збільшення кількості контрольованих параметрів на швидкодію САМТС.

Встановлено, що одночасне опрацювання інформації від температурних датчиків, датчиків струму, напруги, вібрації, концентрації вибухонебезпечних газів та GPS-модуля практично не впливає на характер перехідного процесу. Це пояснюється достатньою продуктивністю мікроконтролера STM32F407VG та ефективною модульною організацією ПЗ, розробленого у третьому розділі роботи [13-17].

Додатково було виконано оцінювання характеру реакції САМТС при виникненні аварійних ситуацій. Під час імітації перевищення допустимих значень температури, струму, рівня вібрацій та концентрації газу ПЗ своєчасно формувало аварійні повідомлення, а інтерфейс оператора миттєво відображав інформацію про зміну технічного стану МРП. При цьому не спостерігалось затримок, пропуску вимірювань або накопичення помилок у процесі безперервної роботи системи.

У табл. 4.3 наведено основні динамічні характеристики САМТС.

Таблиця 4.3 – Основні динамічні характеристики САМТС

Параметр	Характеристика
1	2
Тип динамічної ланки	аперіодична першого порядку
Передавальна функція	$W(s) = \frac{1}{0,1s + 1}$
Характер перехідного процесу	аперіодичний
Наявність автоколивань	не спостерігається
Перерегулювання	практично відсутнє
Стійкість системи	стійка
Характер реакції	плавний
Робота в режимі реального часу	забезпечується

Як видно з табл. 4.3, розроблена САМТС характеризується стабільною та передбачуваною динамікою. Відсутність коливальних процесів і значного

перерегулювання забезпечує достовірне визначення технічного стану МРП навіть за швидкої зміни контрольованих параметрів.

Проведений аналіз динамічних характеристик підтвердив, що САМТС має достатній запас стійкості, характеризується аперіодичним характером реакції та забезпечує безперервний контроль технічного стану МРП в режимі реального часу. Отримані результати підтверджують правильність вибору структури ПЗ, апаратної реалізації на базі мікроконтролера STM32F407VG та ефективність застосованих алгоритмів цифрової обробки інформації, що дозволяє рекомендувати розроблену систему до практичного використання під час виконання робіт на ВО.

4.4 Заходи з безпечних умов праці у наукової лабораторії

Розміри наукової лабораторії, в якій проводилися дослідження в рамках кваліфікаційної роботи, складає $8,3 \times 6 \times 3,1$ м.

Робоче місце устатковано столом і ПК, потужністю у 600 Вт, а також монітором LCD – 24", оновлення екрану – 60 Гц.

У приміщенні наукової лабораторії працює 2 людини. Площа приміщення $49,8 \text{ м}^2$, а об'єм – $154,38 \text{ м}^3$. Згідно з НПАОП 0.00-1.28-10 площа на одне робоче місце має становити не менше 6 м^2 , а об'єм – 20 м^3 .

Згідно з НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення можна віднести до категорії без підвищеної небезпеки (сухе не запилене приміщення з ізолювальною підлогою) [29].

У приміщенні наукової лабораторії використовується система живлячих провідників, трифазна, чотирипровідна з глухо заземленою нейтраллю напругою до 1000 В, отже, згідно з НПАОП 40.1-1.32-01 встановлено систему заземлення TN-C-S типу. Окрім того, додатково застосовується повторне заземлення нульового проводу задля зниження потенціалу корпусів і напруги дотику у випадках обриву нульового проводу [29].

Робота в приміщенні наукової лабораторії проводиться сидячи, отже, не вимагає фізичного навантаження, тому належить до категорії Ia (легкі фізичні роботи, енерговитрати до 120 ккал/ч). З метою забезпечення комфортних умов для працівників, а також повідно до ДСН 4.4.6.042-99 у приміщенні наукової лабораторії встановлені такі оптимальні показники мікроклімату [29]:

- для холодного періоду: температура повітря 22 – 24 °С; вологість повітря 40 – 60 %; швидкість руху повітря оптимальна 0,1 м/с;

- для теплого періоду року: температура повітря 23 – 25 °С; вологість повітря 40 – 60 %; швидкість руху повітря оптимальна 0,1 м/с, допустима 0,2 м/с.

У приміщенні наукової лабораторії залучено природне та штучне освітлення відповідно до ДБН Ст. 2.5-28-2006 [29].

Природне світло проникає через бічні світлопроєми, які направлені на північ, отже, забезпечують коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,2 %.

Необхідна освітленість приміщення 200 – 500 лк [29].

Згідно з ДСН 4.4.6.037-99 рівень шуму в лабораторії не перевищує 50 дБА.

Категорія приміщення П – Па згідно з ПУЕ-2011. Лабораторія розташована в будівлі II ступеня вогнестійкості згідно з ДБН 1.1.7-2002. Зважаючи на пожежо- і вибухонебезпечності належить до категорії В відповідно до НАПБ Б.04.002-2007 (адже у приміщенні наукової лабораторії знаходяться тверді горючі матеріали) [29].

У приміщенні наукової лабораторії підготовлено 3 робочі місця, устатковані ПК. У разі підвищення температури окремих вузлів ймовірні ситуації щодо оплавлення ізоляції сполучних проводів, що може спричинити замикання.

Пожежна безпека в наукової лабораторії забезпечується відповідно до ДСТУ 12.1.004-91, системою запобігання пожежі, протипожежного захисту й

організаційно-технічними заходами:

- встановлено 1 вогнегасник ВВК-1,4 (зокрема 1 вогнегасник на 3 ПК).
- приміщення наукової лабораторії обладнано системою автоматичної пожежної сигналізації з застосуванням димових датчиків типу ДИП-1 (1 шт.) згідно з ДБН Ст. 2.5-56-2010 (1 на 86 м²);
- навчання персоналу правилам пожежної безпеки, регулярні інструктажі з пожежної безпеки;
- розміщені інструкції та план евакуації персоналу у випадку пожежі.

4.5 Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі роботи проведено експериментальні дослідження розробленої САМТС МРП, призначеної для роботи в умовах НС на ВО. Для цього було сформовано експериментальний стенд, до складу якого увійшли мікроконтролер STM32F407VG, комплект вимірювальних датчиків, модуль бездротового зв'язку та ПЗ, що дозволило максимально наблизити умови дослідження до реальної експлуатації системи.

Під час проведення експериментальних досліджень підтверджено працездатність програмно-апаратного комплексу, виконано перевірку функціонування вимірювальних каналів, оцінено швидкодію системи, надійність передачі телеметричних даних та ефективність роботи алгоритмів аналізу технічного стану МРП. Отримані результати свідчать про стабільну роботу системи в різних режимах експлуатації та своєчасне виявлення потенційно небезпечних відхилень контрольованих параметрів.

Виконано кількісне оцінювання ефективності САМТС за показниками швидкодії, достовірності виявлення аварійних ситуацій, стабільності передачі інформації, енергоспоживання, автономності та коефіцієнта готовності. Проведені розрахунки підтвердили, що система забезпечує оновлення інформації в режимі реального часу, характеризується високою достовірністю виявлення небезпечних режимів роботи та ефективно

використовує обчислювальні ресурси мікроконтролера.

Окрему увагу приділено аналізу динамічних характеристик САМТС. Встановлено, що її поведінка відповідає властивостям аперіодичної ланки першого порядку, а перехідний процес має плавний характер без автоколивань і суттєвого перерегулювання. Це підтверджує достатній запас стійкості системи та правильність вибору алгоритмів цифрової обробки інформації.

Результати експериментальних досліджень підтвердили ефективність запропонованої структури САМТС, доцільність використання мікроконтролера STM32F407VG як центрального елемента керування та правильність прийнятих рішень щодо побудови апаратного і ПЗ. Розроблена система забезпечує безперервний контроль технічного стану МРП, оперативне виявлення аварійних ситуацій і своєчасне інформування оператора, що дозволяє рекомендувати її до практичного використання під час виконання робіт у НС на ВО.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання, що полягає у розробленні САМТС МРП для НС, призначеної для експлуатації на ВО. Досягнуто поставленої мети щодо підвищення надійності та безпеки функціонування МРП шляхом впровадження засобів безперервного контролю її технічного стану.

Проведено аналіз особливостей застосування МРП у НС, досліджено умови їх експлуатації на ВО, визначено основні фактори, що впливають на працездатність системи, а також виконано аналіз сучасних САМТС. На основі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність створення комплексної системи, здатної забезпечити безперервний контроль технічного стану платформи в режимі реального часу.

Розроблено структуру САМТС, обґрунтовано вибір її апаратного забезпечення, визначено склад інформаційно-вимірювальних датчиків, мікроконтролерної платформи та засобів бездротового зв'язку. Запропонована архітектура забезпечує ефективний збір, попередню обробку, передачу та відображення інформації про технічний стан МРП.

Реалізовано ПЗ САМТС, розроблено алгоритми збору, аналізу та обробки телеметричних даних, а також алгоритми раннього виявлення критичних відхилень контрольованих параметрів. Реалізовані програмні модулі забезпечують безперервний моніторинг технічного стану, автоматичне формування попереджень та передачу інформації оператору.

Проведено експериментальні дослідження працездатності розробленої САМТС, виконано оцінювання її швидкодії, надійності та ефективності функціонування. Результати експериментів підтвердили коректність роботи запропонованих алгоритмів, високу достовірність контролю параметрів, своєчасне виявлення аварійних ситуацій та стабільне функціонування системи в умовах, наближених до реальної експлуатації.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої САМТС під час експлуатації МРП, що виконують аварійно-рятувальні, пошукові та діагностичні роботи на ВО. Запропоновані технічні рішення можуть бути адаптовані до різних типів роботизованих платформ та інтегровані до сучасних інформаційно-керуючих систем.

Використання розробленої системи дозволяє своєчасно виявляти небезпечні зміни технічного стану обладнання, підвищити безвідмовність роботи МРП, знизити ймовірність виникнення аварійних ситуацій та покращити безпеку виконання робіт у складних умовах експлуатації.

Отримані результати підтверджують досягнення поставленої мети кваліфікаційної роботи та свідчать про доцільність подальшого розвитку запропонованої САМТС шляхом використання методів інтелектуального аналізу даних, алгоритмів прогнозування технічного стану, технологій машинного навчання та інтеграції з хмарними сервісами моніторингу, що дозволить ще більше підвищити ефективність експлуатації МРП.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. Київ. Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарева, 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. Токарева, 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.