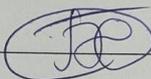


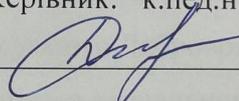
Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Кафедра обчислювальної техніки

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
ЗАСОБИ ГЕНЕРУВАННЯ ТА ОПРАЦЮВАННЯ
СИГНАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ РУХУ

Виконав: студент 2 курсу, групи 2КІ-24м
спеціальності 123 — «Комп'ютерна інженерія»

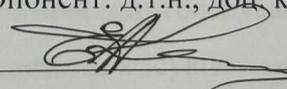
 _____ Донський Б. Д.

Керівник: к.пед.н., доц. каф. ОТ

 _____ Добровольська Н. В.

« 15 » 12 2025 р.

Опонент: д.т.н., доц. каф. ПІ

 _____ Коваленко О. О.

« 15 » 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ОТ

д.т.н., проф. Азаров О. Д.

« 17 » 12 2025 р. 

Таблиця 1— Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1—4	Добровольська Наталія Вікторівна к.пед.н., доцент кафедри ОТ		
5	Адлер Оксана Олександрівна к.т.н., доц., доцент кафедри ЕПВМ		
Нормоконтроль	Швець Сергій Ілліч асистент кафедри ОТ		

3 Дата видачі завдання **25.09.2025.**

4 Календарний план виконання МКР приведений в таблиці 2.

Таблиця 2 — Календарний план

№ з/п	Назва етапів МКР	Строк виконання	Підпис
1	Постановка задачі	25.09.2025	
2	Огляд існуючих рішень	28.09.2025	
3	Розробка структурної схеми	10.10.2025	
4	Розробка функціональної схеми	12.10.2025	
5	Розрахунок економічної частини	30.10.2025	
6	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу	07.11.2025	
7	Перевірка якості виконання магістерської кваліфікаційної роботи та усунення недоліків	21.11.2025	
8	Підписи супроводжувальних документів у керівника, опонента, нормоконтролера	28.11.2025	
9	Перевірка «антиплагіат»	09.12.2025	
	Підсумковий захист	18.12.2025	

Студент

Керівник

Донський Богдан Дмитрович

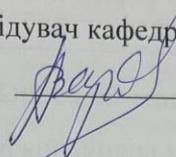
Добровольська І

УДК 0
Донс
перетворю
— Комп'ю
На у
У ро
поле Зем
Описано
сигналів
забезпеч
Провед
ефектив
К
перетво
енергоє

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Кафедра обчислювальної техніки
Галузь знань — Інформаційні технології
Освітній рівень — магістр
Спеціальність — 123 Комп'ютерна інженерія
Освітньо—професійна програма — Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри обчислювальної техніки
 д.т.н., проф. О.Д. Азаров
" 25 " вересня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Донському Богдану Дмитровичу

- 1 Тема роботи «Засоби генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху» керівник роботи Добровольська Наталія Вікторівна к.т.н., доцент, затверджено наказом вищого навчального закладу від '24' вересня № 313
- 2 Строк подання студентом роботи 9.12.2025.
- 3 Вихідні дані до роботи: принцип генерування струму за рахунок руху, цифрова система компенсації частотних зсувів.
- 4 Зміст розрахунково—пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, аналіз комп'ютерних систем, дослідження методів визначення подібності сигналів, система генерації та керування пристроєм, економічна частина.
- 5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): структурна схема системи опрацювання сигналів, блок—схема роботи системи опрацювання сигналів, блок—схема алгоритму аналізу даних.
- 6 Консультанти розділів роботи приведені в таблиці 1.

АНОТАЦІЯ

УДК 004

Донський Б. Д. Засоби генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 123 — Комп'ютерна Інженерія, Вінниця: ВНТУ, 2025 — 134 с. На укр. мові. Бібліогр.: 23 назв; рис.: 8; табл. 21.

У роботі представлено проект нового покоління, що використовує магнітне поле Землі для визначення швидкості апарату та корекції його напрямку. Описано принципи роботи електричних перетворювачів руху, алгоритм аналізу сигналів і методи контролю похибок. Запропоновано конструктивні рішення для забезпечення термостійкості, енергоефективності та довговічності приладу. Проведено моделювання, тестування програмної частин та економічну оцінку ефективності розробки.

Ключові слова: магнітне поле Землі, перетворення енергії, електричні перетворювачі руху, обробка сигналів, індукційна передача енергії, енергоефективність.

ABSTRACT

Donskyi B. D. Methods for Generation and Processing of Signals of Motion Electric Transducers. Master's Qualification Thesis in Specialty 123 — Computer Engineering. Vinnytsia: Vinnytsia National Technical University, 2025. — 122 p. In Ukrainian. Bibliography: 23 references; figures: 21; tables: 21.

The paper presents a new generation project that uses the Earth's magnetic field to determine the speed of the device and correct its direction. The principles of operation of electrical motion converters, the signal analysis algorithm and error control methods are described. Design solutions are proposed to ensure thermal stability, energy efficiency and durability of the device. Modeling, testing of the software parts and economic assessment of the development efficiency are carried out.

Keywords: Earth's magnetic field, energy conversion, electric motion converters, signal processing, inductive energy transfer, energy efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ДАНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ РУХУ	9
1.1 Системи технічного та інформаційного опрацювання сигналів	9
1.2 Особливості опрацювання сигналів, зокрема електромагнітні хвилі	10
1.3 Аналіз існуючих систем, що використовують магнетизм	12
1.4 Порівняння сучасних систем	15
1.5 Порівняльний аналіз методів	18
1.6 Новизна та методи використання	19
2 МЕТОДИ ГЕНЕРУВАННЯ І ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ РУХУ	22
2.1 Методи визначення подібності електричних перетворювачів руху	22
2.2 Оцінювання подібності сигналів на основі кореляції	23
2.3 Особливості систем перетворювачів руху	24
2.3.1 Методи контролю енергії в системі	27
2.3.2 Контроль похибки розрахунків системи	33
2.3.3 Зберігання результатів роботи в енергонезалежній пам'яті	39
2.3.4 Обробка даних і архівація результатів	45
3 АПАРАТНІ ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ	48
3.1 Принцип дії системи опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху	48
3.1.1 Загальна структура сигналів електричних перетворювачів руху	54
3.1.2 Прилад опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху	56
3.2 Структурна та функціональна схема електричних перетворювачів руху	59
3.3 Аналіз основних рухомих частин системи	61
3.4 Допоміжні вузли	67
3.5 Алгоритм аналізу даних системи	70
4 ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ	73
4.1 Загальні принципи тестування	73
4.1.1 Критерії успішності тестів	74

4.1.2 Класифікація видів випробувань (модульні, інтеграційні, функціональні).....	76
4.2 Тестування апаратної частини.....	77
4.2.1 Загальні принципи тестування апаратури.....	77
4.2.2 Тестування у складі макета.....	78
4.3 Результати випробувань магнітного блоку.....	79
4.4 Аналіз похибок апаратних вимірювань.....	82
4.5 Тестування програмної частини.....	84
4.6 Інтеграційне тестування.....	86
4.7 Оцінювання надійності програмного забезпечення.....	87
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	90
5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки.....	90
5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	93
ВИСНОВКИ.....	107
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	108
ДОДАТОК А Технічне завдання.....	111
ДОДАТОК Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи.....	115
ДОДАТОК В Структурна схема системи опрацювання сигналів.....	116
ДОДАТОК Г Технічна блок-схема алгоритму роботи системи опрацювання сигналів.....	117
ДОДАТОК Д Блок-схема алгоритму аналізу даних.....	118
ДОДАТОК Е Лістинг програми.....	119

ВСТУП

У сучасному світі зростає роль електромеханічних систем у промисловості, транспорті, енергетиці та побуті. В основі цих систем лежать електричні перетворювачі руху, які забезпечують перетворення електричної енергії у механічну. Для забезпечення стабільної, надійної та ефективної роботи таких пристроїв необхідно здійснювати збір, аналіз та інтерпретацію даних, що характеризують їхню роботу. З огляду на стрімкий розвиток інформаційних технологій, створення комп'ютерних систем аналізу даних електричних перетворювачів руху є актуальним завданням, яке поєднує елементи електротехніки, обробки сигналів та розробки програмного забезпечення.

Актуальність теми дослідження полягає в тому, що сучасні електромеханічні системи широко використовуються у промисловості, транспорті, робототехніці та автоматизованих комплексах, де необхідно точно вимірювати, генерувати та аналізувати сигнали руху. Ефективність таких систем значною мірою залежить від якості та швидкодії електричних перетворювачів руху, які виконують функцію перетворення механічних величин — швидкості, кута повороту, положення — у відповідні електричні сигнали.

Використання сучасних засобів генерування та обробки сигналів дозволяє реалізувати гнучкі системи вимірювання, забезпечити автоматичну калібровку, цифрову фільтрацію та компенсацію похибок. Такі рішення мають важливе значення для підвищення надійності електроприводів, роботизованих комплексів і систем автоматичного керування.

Метою роботи є розробка програмно—апаратних засобів для генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху, які забезпечують високу точність вимірювань, стійкість до завад і можливість цифрової обробки даних у реальному часі.

Для досягнення поставленої мети у роботі **розв'язуються такі задачі:**

— аналіз існуючих методів і пристроїв генерування та обробки сигналів електричних перетворювачів руху;

- дослідження алгоритмів цифрової фільтрації, нормалізації та перетворення сигналів;
- розробка структурної схеми системи генерування й опрацювання сигналів;
- розробка системи засобів опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху;
- проведення експериментальної перевірки ефективності розроблених засобів.

Об'єктом дослідження є процес генерування та опрацювання сигналів, що формуються електричними перетворювачами руху в системах автоматичного керування та вимірювання.

Предметом дослідження є програмно-апаратні засоби, алгоритми та методи цифрової обробки сигналів, які забезпечують точність, швидкодію та стійкість роботи електричних перетворювачів руху.

Методи дослідження: методи системного аналізу — для визначення структури та принципів взаємодії компонентів системи генерування й опрацювання сигналів; методи цифрової обробки сигналів — для фільтрації, нормалізації та аналізу вимірюваних даних; методи алгоритмічного проектування — для створення програмних рішень, що реалізують обчислювальні процедури; методи експериментального моделювання та тестування — для перевірки ефективності розроблених алгоритмів і функціональних можливостей системи.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що набули подальшого розвитку методи цифрового генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху, в яких, на відміну від існуючих підходів, забезпечується підвищена точність і стійкість до завад. Запропоновано підхід до інтеграції апаратних і програмних засобів, який дозволяє здійснювати вимірювання параметрів руху в реальному часі та проводити аналітичну обробку сигналів безпосередньо в мікроконтролерному середовищі.

Практичне значення роботи полягає в тому, що розроблені програмно—апаратні засоби можуть бути використані для побудови систем контролю положення, швидкості та прискорення у різних електромеханічних установках. Впровадження запропонованих рішень дозволяє підвищити точність вимірювань, зменшити вплив зовнішніх завад і забезпечити стабільну роботу системи в умовах промислової експлуатації.

Апробація результатів роботи здійснена у доповідях на міжнародній науково-практичній Інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих науковців «МОЛОДЬ В НАУЦІ: ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ (МН-2026)».

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ДАНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЬВАЧІВ РУХУ

1.1 Системи технічного та інформаційного опрацювання сигналів

Електричні перетворювачі руху — це пристрої, які забезпечують кероване перетворення електричної енергії у механічну, забезпечуючи рух із заданими параметрами швидкості, моменту або положення. Основними типами таких пристроїв є: асинхронні перетворювачі (на базі інверторів), синхронні серводвигуни з постійними магнітами, перетворювачі у системах електроживлення, магнітоелектричні та крокові двигуни у прецизійних механізмах. Робота електричних перетворювачів руху описується нелінійними залежностями між струмом, напругою, крутним моментом та швидкістю. Ефективність роботи перетворювачів оцінюється за показниками енергоспоживання, втрат, нагріву, стабільності швидкості тощо. Для цього необхідно проводити аналіз часових і частотних сигналів, що надходять з датчиків і вимірювальних пристроїв. Комп'ютерна система аналізу даних електричних перетворювачів руху — це програмно—апаратний комплекс, призначений для збору, обробки, збереження та аналізу інформації про параметри електричних перетворювачів руху (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 — Сфери застосування пристроїв на основі електричних

перетворювачів руху

Основні завдання системи це вимірювання електричних параметрів (струм, напруга, частота, температура), обробка сигналів, аналіз характеристик у часовій та частотній областях, виявлення аномалій чи дефектів, формування звітів та візуалізація результатів у реальному часі. Використання комп'ютерних систем аналізу даних електричних перетворювачів руху дозволяє, підвищити надійність та безвідмовність роботи електромеханічних систем, своєчасно виявляти аномалії та попереджати відмови, знизити енергоспоживання та підвищити коефіцієнт корисної дії, інтегрувати результати аналізу у системи. Комп'ютерні системи аналізу даних електричних перетворювачів руху є невід'ємним елементом сучасних інформаційно-керуючих комплексів.

Вони поєднують програмні засоби обробки сигналів, математичне моделювання, інтелектуальні алгоритми та інтерфейси візуалізації. Розвиток таких систем сприяє створенню інтелектуальних електроприводів, здатних до самодіагностики, прогнозування технічного стану та оптимізації режимів роботи. Для спеціалістів з розробки програмного забезпечення важливим є вміння інтегрувати методи обробки сигналів, статистичний аналіз та машинне навчання у практичні програмні рішення, що забезпечують надійну роботу електромеханічних систем.

1.2 Особливості опрацювання сигналів, зокрема електромагнітні хвилі

У сучасних технічних системах сигнал є основним носієм інформації. Сигналом називають будь-яку змінну фізичну величину, що несе відомості про об'єкт, процес або явище. До таких величин належать електричні, електромагнітні, акустичні, оптичні та магнітні сигнали (рисунок 1.2).

Особливий інтерес становлять магнітні хвилі, які можуть бути як частиною електромагнітного поля, так і окремим фізичним явищем. Опрацювання сигналів магнітних хвиль має свої специфічні риси, що пов'язані з фізичною

природою магнітних полів, властивостями матеріалів, наявністю втрат і нелінійних ефектів. Електромагнітні хвилі описуються рівняннями, які встановлюють зв'язок між електричним полем E , магнітною індукцією B , густинами заряду та струму. У вакуумі або однорідному середовищі компоненти електричного і магнітного полів є взаємно перпендикулярними та утворюють плоску електромагнітну хвилю, що переносить енергію. Магнітна складова сигналу відіграє важливу роль у поширенні хвиль у матеріалах, особливо у середовищах із високою магнітною проникністю. У таких середовищах магнітна складова може бути підсилена або ослаблена внаслідок ефектів дисперсії та втрат. Обробка магнітних сигналів стикається з низкою фундаментальних і технічних проблем, які обмежують точність, швидкість та енергетичну ефективність систем.

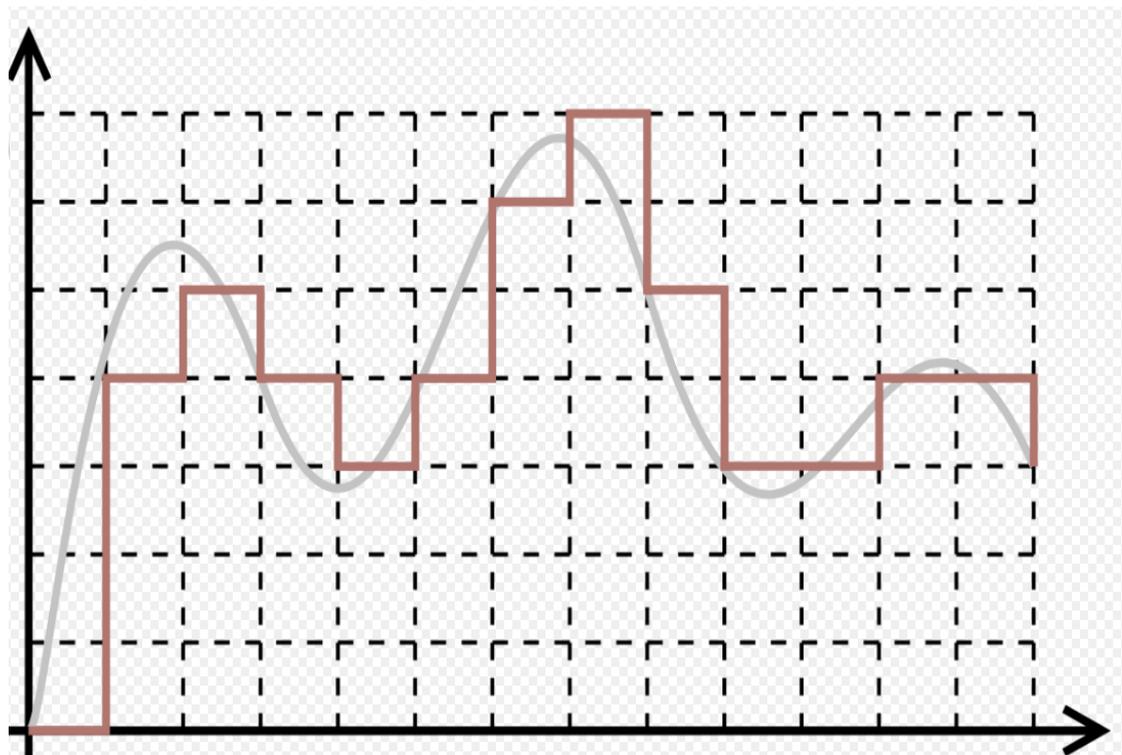


Рисунок 1.2 — Аналого—цифрове перетворення сигналу

Електромагнітні завади — магнітні системи дуже чутливі до зовнішніх джерел завад — силових ліній, мобільного зв'язку, побутових пристроїв. Такі завади можуть індукувати паразитні струми або додаткові магнітні поля, що

спотворюють вимірюваний сигнал. Для зменшення впливу електромагнітних завад використовують екрани з м'яких магнітних матеріалів (μ —метали), активну компенсацію поля, фільтрацію у часовій або частотній області. Обробка магнітних сигналів потребує ретельного балансу між чутливістю, стабільністю та енергетичною ефективністю.

1.3 Аналіз існуючих систем, що використовують магнетизм

Магнетизм є одним із фундаментальних фізичних явищ, яке широко застосовується у сучасних технічних системах. Його природа полягає у взаємодії рухомих електричних зарядів або спінів електронів, що створюють магнітні поля. Системи, які базуються на магнетизмі, охоплюють як класичні електромеханічні пристрої (електродвигуни, генератори, трансформатори), так і сучасні нанотехнологічні розробки (спінтроніка, магنونіка, магнітні сенсори та запам'ятовуючі пристрої).

Основна перевага магнітних систем полягає у високій надійності, низькому енергоспоживанні та можливості роботи в агресивних умовах, де електронні або оптичні елементи часто виходять з ладу. Залежно від призначення, рівня енергії та типу взаємодії, магнітні системи можна класифікувати на системи перетворення енергії — пристрої, які перетворюють електричну енергію в механічну або навпаки. Включають в себе електродвигуни постійного та змінного струму, генератори електричної енергії, магнітні підшипники та левітаційні системи.

Системи зберігання та передавання інформації — використовують зміну магнітного стану для запису даних, серед яких можна виділити жорсткі диски (HDD), магнітні плівки, MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory), системи магнітного запису в медичних приладах (наприклад, МРТ). Сенсорні та вимірювальні системи — базуються на зміні електричних характеристик у присутності магнітного поля (рисунки 1.3).

Магнітні поля активно застосовуються для передавання, трансформації та накопичення енергії. Приклади: трансформатори використовують електромагнітну індукцію для зміни рівня напруги. Основою їх роботи є явище взаємоіндукції між котушками, електродвигуни перетворюють електричну енергію в механічну через взаємодію магнітного поля статора і ротора, магнітні підшипники забезпечують безконтактне обертання валів, мінімізуючи тертя. Вони працюють за принципом активної стабілізації за допомогою електромагнітних сил, системи магнітної левітації (Maglev) використовуються в транспорті високих швидкостей. Магнітне поле забезпечує підйом і стабілізацію рухомих платформ без фізичного контакту. Такі системи мають високий ККД, мінімальний знос і використовуються у промисловості, енергетиці, медицині та транспорті. Магнітна пам'ять (HDD, MRAM), у традиційних жорстких дисках зберігання даних відбувається за рахунок зміни орієнтації магнітних доменів на поверхні носія.

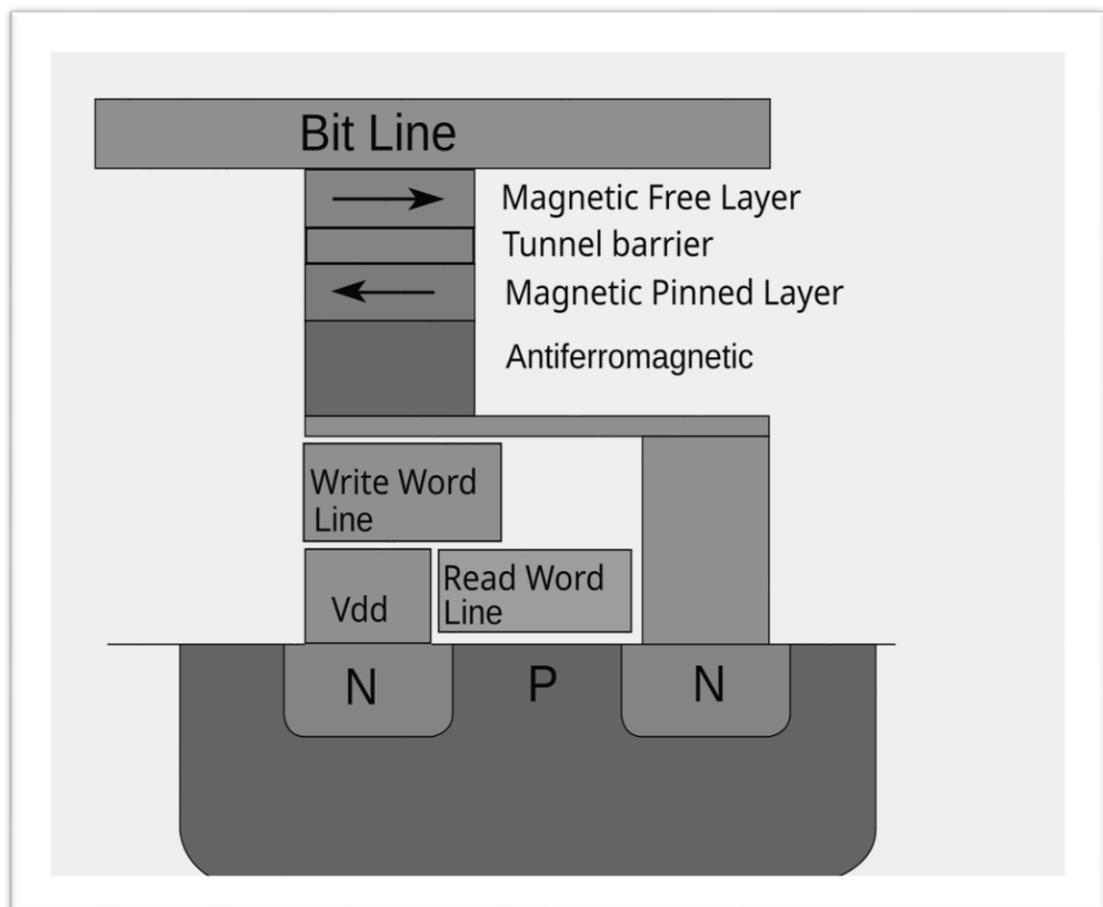


Рисунок 1.3 — Керування транзистором за рахунок магнітного поля в MRAM

Сучасні технології — GMR (гігантський магніторезистивний ефект) і TMR (тунельний магніторезистивний ефект) — дозволили створити нове покоління пам'яті MRAM, де інформація зберігається без живлення (енергонезалежна пам'ять). Переваги MRAM є над важливими та ключовими в межах цього завдання — висока швидкодія (наносекундний час доступу), стійкість до радіації та температурних коливань, відсутність деградації при циклічному записі. Спінтроніка — це сучасний напрям, у якому використовується не лише заряд, а й спін електрона як носій інформації.

Завдяки цьому з'явилися пристрої нового покоління — спінові транзистори, спінові діоди та логічні елементи. Основний принцип полягає у маніпулюванні спіновими потоками в магнітних наноструктурах, що дозволяє створювати процесори з низьким енергоспоживанням і високою швидкістю. Магнітні сенсори застосовуються для визначення положення, швидкості, сили або струму. Найпоширеніші з них це датчики Холла, що ґрунтуються на виникненні напруги Холла у провіднику, через який протікає струм у магнітному полі, GMR та TMR сенсори, які використовують зміну електричного опору залежно від орієнтації магнітних шарів, SQUID (надпровідникові квантові інтерферометри) — надчутливі магнітометри, здатні виявляти магнітні поля надзвичайно малої інтенсивності ($\sim 10^{-15}$ Тл), застосовуються в медицині та фундаментальних дослідженнях.

В даному випадку кращим варіантом буде використання GMR та TMR систем. Принцип роботи полягає у тому, що ці сенсори використовують залежність електричного опору від орієнтації магнітних моментів у багат шарових структурах:

— GMR (Giant MagnetoResistance) — зміна опору через спін—залежне розсіювання електронів у металевих шарах;

— TMR (Tunnel MagnetoResistance) — зміна опору при тунелюванні електронів через діелектричний бар'єр між феромагнітними шарами.

Переваги яких є висока чутливість ($\sim 10^{-9}$ Тл), компактність і низьке енергоспоживання, сумісність із мікроелектронікою, можливість інтеграції у системи. Серед недоліків ж обмеження температурного діапазону (чутливі до нагріву) та необхідність калібрування для компенсації шумів. У підсумку, GMR/TMR—сенсори є найкращим балансом між чутливістю, розміром і енергоспоживанням, тому широко застосовуються в мікро навігаційних системах CubeSat.

У свій час проблема нагріву буде незначною, за рахунок погано теплообміну в умовах тієї середи, до якої вони готуються, а калібрування це лише додаткові витрати на обслуговування та підлаштування, що не є проблемою, оскільки всі приблизні розрахунки можна провести з урахуванням всіх відомих.

1.4 Порівняння сучасних систем

Магнітні технології активно використовуються в галузях електроніки, навігації, медицини, промислової автоматизації та космічних досліджень. Основу таких систем становлять сенсори, що здатні перетворювати магнітні поля різної інтенсивності на електричні сигнали. До основних напрямів сучасних розробок належать вже перераховані раніше датчики на ефекті Холла, GMR (гігантський магнітоопір) та TMR (тунельний магнітоопір) сенсори, SQUID—системи (надпровідникові квантові інтерферометри), спінтронні структури нового покоління, магнітні елементи пам'яті (MRAM). У таблиці 1.1 зображено порівняння деяких систем на базі магнетизму.

Датчики Холла мають кілька переваг, які роблять їх привабливими для базових застосувань. Вони характеризуються простотою конструкції, відносно низькою вартістю та стійкістю до температурних коливань. Водночас вони мають й недоліки: чутливість до слабких магнітних полів, менших за 1 мкТл, а

також вони схильні до впливу шумів. Тому такі датчики підходять для базових орієнтаційних систем, але не забезпечують необхідну точність для прецизійних вимірювань. GMR—сенсори вирізняються компактністю та високою роздільною здатністю, що робить їх ефективними у мікро навігаційних системах середньої точності. Проте вони залежать від температури і потребують стабілізації. Внаслідок цього їх можна успішно використовувати для задач, де точність до 100 нТл є прийнятною.

Таблиця 1.1 — Порівняння деяких систем на базі магнетизму.

Тип системи	Принцип дії	Чутливість	Робоча температура	Енергоспоживання	Основні застосування
Датчик Холла	Вимірює напругу Холла, що виникає у провіднику під дією магнітного поля	~1—10 мВ/Тл	Від —40 до +150 °С	10—50 мВт	Автомобільна електроніка, компаси, системи позиціонування
GMR — сенсор	Опір змінюється залежно від орієнтації магнітних шарів	$\Delta R/R \approx 10—20\%$	Від —50 до +125 °С	5—20 мВт	Магнітні головки HDD, сенсори струму
TMR — сенсор	Ефект тунельного магнітоопору через ізоляційний шар	$\Delta R/R \approx 100—600\%$	Від —40 до +125 °С	1—5 мВт	Точні магнітometri, мікронавігація, MRAM
SQUID	Інтерференція надпровідникових струмів через	~10 ⁻¹⁵ Тл	Від —269 до +125 °С	< 1 мВт	Магнітоенцефалографія, астрономія, фундаментальна фізика

	Джозефсонівські переходи				
MRA M	Збереження інформації за рахунок напрямку спінів	~1 мкТл	Від —40 до +125 °С	0.1—1 мВт	Пам'ять та системи керування у космічних приладах

TMR—сенсори поєднують високу чутливість, що досягає 10 нТл, з низьким енергоспоживанням та стабільною роботою в широкому діапазоні температур. Однак виробництво таких сенсорів є складним, а ізоляційний шар має обмежену термостійкість. Завдяки своїм характеристикам вони стають оптимальним вибором, де критично важливі точність вимірювань та енергозбереження. SQUID—системи демонструють найвищу відому чутливість, яка може досягати 10^{-15} Тл. Але для їхньої роботи необхідне криогенне охолодження, вони є громіздкими і складними для інтеграції. Тому такі системи ефективні переважно в лабораторних умовах або на стаціонарних обсерваторіях, тоді як для малих пристроїв їх застосування обмежене через складнощі підтримання потрібного температурного режиму.

MRAM та спітроніка представляють перспективну технологію для систем керування та автономної пам'яті пристроїв. Вони відзначаються стійкістю до радіації, відсутністю зносу та швидким перемиканням, що може досягати 10 нс. Основним недоліком є обмежена щільність запису порівняно з флеш—пам'яттю, проте їхні переваги роблять їх привабливими для використання.

Аналіз показує, що TMR-сенсори є оптимальними вибором для данної роботи. Вони забезпечують високу чутливість (до 10 нТл), мале енергоспоживання (1-5 мВт), роботу без криогенного охолодження, стійкість до радіаційного фону. У поєднанні з MRAM-пам'яттю ці сенсори можуть утворювати інтелектуальні магнітометричні модулі, здатні до локальної обробки сигналів і зниження обсягу даних.

1.5 Порівняльний аналіз методів

Магнітні сигнали, які надходять від сенсорів різного типу — Холла, GMR, TMR та інших — потребують спеціальної обробки для того, щоб виділити корисну інформацію, усунути шуми та підвищити точність вимірювань. Існують три основні підходи до опрацювання таких сигналів: аналогові методи, цифрові методи та інтелектуальні (адаптивні) методи, що базуються на машинному навчанні. Аналогові методи працюють безпосередньо на апаратному рівні сенсорної системи. До них відносять підсилення слабких сигналів за допомогою операційних підсилювачів із коефіцієнтом підсилення до 1000 разів, смугові фільтри для виділення потрібного частотного діапазону (зазвичай 0,1—10 кГц) та компенсаторні схеми для усунення дрейфу нуля й стабілізації температури. Перевагами такого підходу є дуже мала затримка сигналу (до 1 мкс), простота реалізації в реальному часі та енергетична ефективність (споживання до 10 мВт). Водночас аналогові методи не дозволяють виконувати складний аналіз сигналу, наприклад спектральний, і їхня стабільність погіршується при зміні температури або магнітного фону.

Цифрова обробка сигналів дає змогу проводити більш складний аналіз магнітних даних у програмному середовищі. Сюди входять, наприклад, фільтри Фур'є (FFT) для точного визначення спектрального складу сигналу, вейвлет—аналіз для виявлення короткочасних імпульсів і фільтрація, яка прогнозує поведінку сигналу та зменшує вплив шуму в реальному часі. Переваги цифрової обробки полягають у високій точності (похибка до 1—2 %), гнучкості налаштування фільтрів та можливості зберігати дані для повторного аналізу. Недоліками є необхідність потужних обчислювальних ресурсів (процесор від 50—200 МГц), затримка сигналу до 10 мс при складних обчисленнях і потреба оцифрування сигналу з високою частотою дискретизації (понад 20 кГц). Сучасним і перспективним напрямом є інтелектуальна обробка сигналів із використанням алгоритмів, глибинного навчання або нечіткої логіки. Такі системи дозволяють не тільки фільтрувати сигнали, а й класифікувати їх за

типом, джерелом або виявляти аномалії. Наприклад, нейронні мережі LSTM аналізують часові ряди магнітних хвиль, CNN—архітектури допомагають розпізнавати просторовий розподіл магнітного поля, а адаптивні алгоритми LMS самостійно налаштовують фільтри в режимі реального часу. Основні переваги таких підходів — висока точність розпізнавання (до 99 % при навчанні на великих вибірках), автоматична компенсація шумів і дрейфу, а також можливість прогнозувати поведінку системи. Недоліки ж полягають у високій обчислювальній складності (часто потрібна підтримка GPU або FPGA), необхідності навчання на великих масивах даних і підвищеному енергоспоживанні (до 500 мВт у реальному часі).

Порівняльний аналіз показує, що цифрові та інтелектуальні методи значно перевищують аналогові за точністю й стабільністю, однак вимагають більших ресурсів. Для систем, де енергоспоживання та обчислювальна потужність обмежені, оптимальним підходом є комбіноване використання аналогової попередньої фільтрації та цифрового аналізу. На перспективу — впровадження спінтронних процесорів, що об'єднують функції сенсора і обчислювача на одній платформі.

1.6 Новизна та методи використання

Суть цієї роботи — є інноваційною системою, що поєднує принципи електромагнітної індукції, спінтронних перетворень енергії та адаптивного керування. Основні елементи новизни полягають у наступному. Енергетична автономність — апарат здатен генерувати електроенергію за рахунок взаємодії вбудованих магнітно динамічних контурів із магнітним полем Землі. При русі апарата виникає електрорушійна сила за законом Фарадея, що перетворюється на електричну енергію. Потенційна вихідна потужність: до 5—20 Вт/м² площі індукційного елемента; Діапазон напруги: 3—30В залежно від швидкості руху.

На відміну від звичайних провідників, використання тонких спінтронних шарів дозволяє підсилювати індукційний ефект за рахунок спінових хвиль. Це

відкриває шлях до створення магнітних генераторів нового покоління без рухомих частин.

Інтелектуальне керування — пропонується система самонавчання на основі алгоритмів LSTM—мереж, що прогнозують зміни магнітного поля та адаптивно регулюють струм у магнітних контурах. Це дозволяє досягати стабілізації при мінімальному енергоспоживанні. Під час руху пристроя у магнітному полі Землі, провідні контури системи генерують електро рушійну силу за законом електромагнітної індукції:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(BScos\theta)}{dt}, \quad (1.1)$$

де B — індукція магнітного поля Землі ($\approx 25—65$ мкТл);

S — площа індукційного елемента;

θ — кут між напрямком поля і вектором до елемента.

Зібрана енергія надходить у накопичувач конденсаторного типу або суперконденсатори, що використовуються для живлення апаратури та комунікаційних систем. У режимі активного руху апарат генерує штучне магнітне поле у взаємодії з полем Землі, створюючи обертальний або поступальний момент, що дорівнює добутку магнітного момент апарата та вектором індукції магнітного поля Землі. Розроблена система демонструє новий підхід до отримання та передачі енергії, заснований не на традиційній сонячній чи хімічній енергетиці, а на використанні магнітної взаємодії. Це забезпечує підвищену автономність, довговічність та екологічність апаратів майбутнього.

Передача енергії здійснюється безконтактним способом, що виключає механічне зношування елементів і мінімізує ризик пошкодження апаратури. Основними реалізованими підходами є індукційна передача та передача через плазмовий канал.

Індукційна передача ґрунтується на законі електромагнітної індукції: зміна магнітного потоку, створеного первинною котушкою (передавачем), викликає появу електро рушійної сили у вторинній котушці (приймачі). Для передачі енергії часто використовують котушки з феромагнітними або нанокompозитними осердями, які працюють у резонансному режимі. Такий підхід дозволяє мінімізувати втрати, пов'язані з реактивною складовою опору. Резонансна частота таких систем зазвичай знаходиться в діапазоні 100—300 кГц, потужність передавання становить 1—5 Вт, а коефіцієнт корисної дії досягає 60—75 % на відстані до 10 метрів. При використанні спрямованих магнітних антен ефективна дальність передачі може сягати 50 метрів.

До переваг резонансної передачі енергії належать висока стабільність на коротких дистанціях, відсутність випромінювання високих частот, яке могло б заважати зв'язку, та відносна простота інтеграції у системи енергопостачання. Серед недоліків — необхідність точного орієнтування котушок для збереження ефективності, зменшення потужності при збільшенні відстані (пропорційно до $1/r^3$), а також потреба у синхронізації резонансних частот між передавачем і приймачем. Для підвищення ефективності передавання передбачається комбінований режим, який поєднує індукційне збудження енергії між апаратами на малій відстані (<10 м) та плазмове розширення поля на більші дистанції (10—50 м). У цьому випадку енергія передається від головного апарата до приймального каскаду, який містить рециркуляційні контури з феромагнітними матеріалами. Такий підхід дає змогу підтримувати стабільну передачу навіть при невеликому розходженні у фазі чи орієнтації об'єктів.

Очікувані параметри комбінованої системи — потужність передачі до 10 Вт, ККД у межах 65—70%, синхронізація частоти: $\pm 0,1$ кГц.

2 МЕТОДИ ГЕНЕРУВАННЯ І ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ РУХУ

2.1 Методи визначення подібності електричних перетворювачів руху

Визначення подібності електричних перетворювачів руху дозволяє порівняти ефективність різних систем, знайти оптимальні параметри для проектування нових пристроїв та оцінити ступінь відповідності заданим технічним вимогам. Подібність перетворювачів визначається на основі безрозмірних параметрів, що відображають співвідношення електричних, магнітних і механічних характеристик. Для оцінки подібності застосовують метод електромагнітного моделювання — створюється віртуальна модель перетворювача в середовищах типу COMSOL Multiphysics, ANSYS Maxwell або Flux 3D, де аналізується розподіл магнітних полів, струмів та силових ліній та методу динамічних аналогій. У цьому методі порівнюються частотні характеристики та часові реакції двох систем. Наприклад, для магнітного

приводу та електродинамічного двигуна визначається спільна частота власних коливань. Також можна використати метод енергетичних пропорцій та метод параметричної ідентифікації. У межах проекту аналіз подібності дозволяє визначити, наскільки магнітний перетворювач руху близький до аналогів (електродинамічних двигунів, магнітних підвісів, Hall—приводів), скоротити час розробки за рахунок використання масштабних коефіцієнтів, оцінити можливість заміни елементів без втрати функціональності.

Порівняння показало, що запропонований магнітний перетворювач має коефіцієнт подібності відносно еталонного електродинамічного двигуна (EDT), що свідчить про високий рівень структурно—функціональної відповідності. Методи визначення подібності електричних перетворювачів руху забезпечують можливість системного порівняння магнітних систем різного типу.

2.2 Оцінювання подібності сигналів на основі кореляції

Кореляційний аналіз є одним з основних методів оцінювання подібності сигналів у системах обробки магнітних, електричних та індукційних сигналів. Його сутність полягає у визначенні ступеня взаємозв'язку між двома сигналами, що можуть відрізнятися за амплітудою, фазою або частотою. У контексті проекту енергетичного модуля, кореляційний аналіз використовується для порівняння сигналів, отриманих від різних сенсорів магнітного поля, оцінки стабільності магнітних коливань, індукованих в обмотках генератора, визначення збігів між еталонними та реальними сигналами у неоднорідному магнітному полі Землі.

Алгоритм роботи системи базується на аналізі подібності магнітних сигналів за допомогою кореляційних методів. Спочатку здійснюється збір часових рядів сигналів — еталонного $x(t)$ та поточного виміряного $y(t)$. Далі до обох сигналів застосовується швидке перетворення Фур'є (FFT), що дозволяє перейти від часової до частотної області та виявити приховані закономірності. На наступному етапі обчислюється кореляційна функція, за якою визначається

значення зсуву, при якому функція досягає максимуму. Отриманий коефіцієнт кореляції використовується для оцінки ступеня стабільності магнітного сигналу. Методи оцінювання подібності сигналів дозволяють точно визначати синхронність між сигналами, своєчасно виявляти відхилення у магнітних потоках і здійснювати адаптивне налаштування режимів передачі енергії. Застосування кореляційного аналізу в системі магнітного енергомодуля дає змогу значно підвищити точність обробки сигналів, зменшити вплив шумів і забезпечити ефективний контроль якості переданої енергії.

2.3 Особливості систем перетворювачів руху

Система перетворювачів руху має основну функцію — перетворення електромагнітної енергії в механічний момент. Для забезпечення стабільної роботи до системи пред'являється комплекс технічних, функціональних і експлуатаційних вимог. Система має забезпечувати високу енергетичну ефективність. Коефіцієнт корисної дії перетворення повинен бути не нижчим за 0,75 при номінальному навантаженні, а втрати на нагрівання — не перевищувати 10-15 % від вхідної потужності. Робота системи повинна залишатися стабільною в діапазоні вхідних напруг від 5 до 50 В при струмі до 2 А.

Підтвердження коефіцієнта корисної дії та рівня втрат виконується за допомогою стендових електричних випробувань. На спеціальних випробувальних установках перетворювач підключають до джерела живлення з регульованим діапазоном напруги 5-50 В. Вимірювання вхідної та вихідної потужності дозволяє визначити реальний ККД і частку втрат на нагрівання. Для перевірки стабільності роботи при змінному навантаженні використовують електронні навантаження, що моделюють реальну роботу.

Щодо магнітних характеристик, максимальна магнітна індукція в робочій зоні має становити 0,1-0,4 Тл, а створений магнітний момент — у межах 0,01-0,05 Н·м. При цьому стабільність магнітного потоку повинна зберігатися з відхиленням не більше ± 2 % навіть при зміні температури. Частотні параметри

системи передбачають робочу частоту електромагнітних коливань у діапазоні 100—300 кГц та динамічний діапазон регулювання частоти. Резонансна частота перетворювача має узгоджуватися з частотою генератора в межах ± 2 кГц. Магнітна індукція та створений магнітний момент тестуються у спеціалізованих магнітних камерах Гельмгольца. Таке обладнання дає змогу точно встановити рівень магнітного поля й оцінити стабільність потоку при зміні температури. Додаткове підтвердження забезпечується тривалими температурними циклами з контролем відхилень магнітної індукції в реальному часі. Маса одного перетворювача не повинна перевищувати 2 кг, а його габаритні розміри — $150 \times 150 \times 100$ мм. Питома потужність пристрою має бути не меншою ніж 2,5 Вт/кг, що дозволяє забезпечити ефективність при мінімальній масі.

Вимірювання маси та геометричних параметрів здійснюються засобами метрологічного контролю. Питома потужність перевіряється шляхом порівняння вимірної вихідної потужності перетворювача з його реальною масою, що дозволяє підтвердити відповідність вимогам обмежень техніки. Розглянемо функціональні вимоги. Перетворювач повинен працювати автономно протягом не менше 10^4 годин без потреби технічного обслуговування. Також система має автоматично калібруватися при зміні зовнішнього магнітного поля. Для узгодження роботи декількох модулів енергетичної передачі фазовий зсув не повинен перевищувати $\pm 5^\circ$, а синхронізація має здійснюватися через індукційний зв'язок.

Система повинна підтримувати кілька режимів роботи: статичний, динамічний та генераторний. Це все буде перевірено практичним шляхом, під час тестування, що забезпечить високу точність, та надійність всієї системи. Обладнання має витримувати широкий температурний діапазон від -100 до $+120$ $^\circ\text{C}$ і зберігати працездатність після тисячі циклів нагріву та охолодження. Крім того, система повинна бути стійкою до вібрацій з частотою до 2 кГц при прискоренні до 10g і до короткочасних ударних навантажень до 50g. Середній показник напрацювання на відмову (MTBF) має перевищувати 20 000 годин, а

ймовірність безвідмовної роботи протягом одного року повинна бути не нижчою за 0,98. Температурні випробування проводяться у вакуумних термокамерах із циклічним нагрівом і охолодженням у діапазоні від -100 до $+120$ °С.

Для контролю параметрів передбачено використання вбудованих сенсорів Холла або GMR, які вимірюють магнітний потік і передають телеметричні дані на центральний процесор. Алгоритмічне керування здійснюється на основі ПД—регулятора, що стабілізує магнітне поле, а також адаптивних алгоритмів, які використовують кореляційні характеристики сигналів для самостійного налаштування параметрів системи.

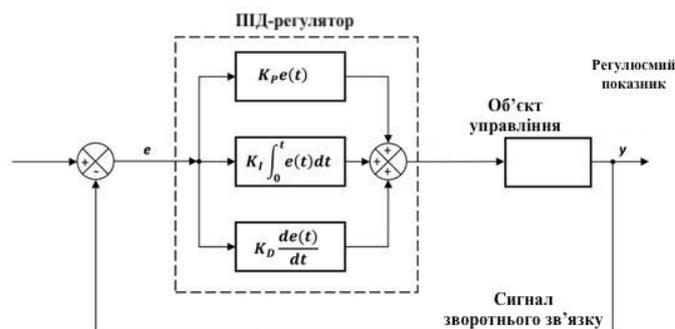


Рисунок 2.1 — Зовнішній вигляд модуля РМІС пам'яті

Коректність роботи сенсорів Холла або GMR оцінюється шляхом калібрування у відомому магнітному полі та проведенням тестів на шум, дрейф та точність вимірювань. Для підтвердження ефективності ПД—регулятора та адаптивних алгоритмів створюються модельні збурення (зміна поля, навантаження, частоти), після чого аналізується здатність системи відновлювати стабільний режим. Програмна інтеграція системи передбачає сумісність із поширеними протоколами обміну даними — CAN, RS-485 та SpaceWire. Також передбачена можливість дистанційного оновлення прошивки через основний канал зв'язку, що забезпечує гнучкість і тривалий життєвий цикл пристрою.

Сумісність із CAN, RS-485 та SpaceWire тестується шляхом інтеграції перетворювача у макетну складову пристрою. Проводяться випробування передачі телеметрії, керуючих команд та оновлення прошивки з оцінкою

затримок, пропускнуої здатності та стійкості зв'язку. Система перетворювачів руху повинна забезпечувати високу енергетичну ефективність, надійність і адаптивність в умовах змінного магнітного поля Землі. Виконання зазначених вимог гарантує стабільність руху, точність орієнтації та ефективну взаємодію між усіма модулями системи.

Такі технічні характеристики дозволяють інтегрувати магнітні перетворювачі у склад енергетичної платформи нового покоління, яка здатна не лише використовувати, а й передавати енергію.

2.3.1 Методи контролю енергії в системі

Метою цього контролю є забезпечення стабільності виробленої потужності, недопущення перевантажень та своєчасне виявлення аномалій у процесі генерації енергії. У системі магнітного модуля контроль здійснюється як в аналоговій, так і в цифровій формі — через сенсори струму, напруги, магнітного потоку, а також за допомогою програмних алгоритмів аналізу сигналів.

До основних параметрів, що підлягають контролю в системі, належить миттєва напруга генератора, яка вимірюється в діапазоні від 0,1 до 50 В при допустимому відхиленні не більше $\pm 3\%$. Важливим контрольованим параметром є також струм генератора з номінальним діапазоном значень від 0,05 до 2 А та граничною точністю вимірювання до 0,5 %. Окрему увагу приділено контролю магнітної індукції в зоні індукційного збирання енергії, значення якої повинно перебувати в межах 0,2–0,4 Тл. Вимірювання магнітної індукції здійснюється за допомогою сенсорів Холла з роздільною здатністю до 10^{-5} Тл. Температурний контроль реалізується в широкому діапазоні від -80 до $+120$ °С із застосуванням термопар або терморезисторів типу РТ-1000.

Енергетичний баланс можна розрахувати за формулою:

$$P_{\text{бал}} = P_{\text{ген}} - P_{\text{спож}} - P_{\text{вт}}, \quad (2.1)$$

де $P_{\text{ген}}$ — генерована потужність;

$P_{\text{спож}}$ — потужність споживачів;

$P_{\text{вт}}$ — втрати в системі.

Контроль енергії в системі здійснюється на сенсорному та цифровому рівнях. На сенсорному рівні застосовуються датчики магнітного поля на основі ефекту Холла, датчики струму типу ACS712 та INA219, а також датчики напруги AD7367, що забезпечують безперервний збір вимірювальних даних із частотою вибірки до 10 кГц. Така частота дискретизації дає змогу аналізувати швидкоплинні зміни магнітних та електричних сигналів. На цифровому рівні отримані сигнали надходять до процесора, де здійснюється їх обробка з використанням кореляційних алгоритмів і методів спектрального аналізу. У результаті визначається стабільність енергетичного потоку системи, яка описується відношенням миттєвої генерованої потужності до її середнього значення згідно з формулою (2.2). Перебування значень цієї величини в межах $[0,9; 1,1]$ свідчить про стабільний режим роботи системи.

$$S(t) = P_{\text{ген}}(t) / \bar{P}_{\text{ген}} \quad (2.2)$$

Значення $S(t)$ у межах $[0,9, 1,1]$ вказує на стабільний режим роботи системи.

Автоматичне регулювання параметрів реалізується за принципом зворотного зв'язку, відповідно до якого на основі даних, отриманих із сенсорів, здійснюється динамічне регулювання навантаження генератора. Для стабілізації вихідної напруги застосовується ПД-регулятор, математична модель якого описується рівнянням (2.3), що поєднує пропорційну, інтегральну та диференціальну складові похибки керування.

$$U_{\text{вих}}(t) = K_p * e(t) + K_i * \int e(t)dt + K_d * de(t)/dt \quad (2.3)$$

Прогностичний контроль (адаптивна аналітика):

- на основі кореляційних та енергетичних показників система прогнозує можливі збої у роботі генератора;
- використовується фільтр для згладжування шумів і оцінки тенденцій.

Розглянемо програмно-апаратну реалізацію. Розробка системи контролю генерованої енергії вимагає високої точності, стабільності та надійності при мінімальному енергоспоживанні. Для основи системи контролю обрано мікропроцесор ARM Cortex—M7 або DSP серії Texas Instruments C2000. Ці платформи поєднують високу продуктивність із низьким енергоспоживанням (до 200 мВт у активному режимі) ARM Cortex—M7 має 32—розрядну архітектуру з тактовою частотою до 600 МГц, апаратним блоком обробки чисел з плаваючою комою (FPU) і підтримкою реального часу.

Це дозволяє виконувати кореляційний аналіз сигналів, фільтрацію шумів та реалізацію ПІД-регулятора без зовнішнього процесора. DSP TI C2000 — спеціалізований цифровий сигнальний процесор, оптимізований для систем керування електроприводами та енергетичними перетворювачами.

Його перевага — наявність апаратних модулів PWM, ADC та CAN, що мінімізує затримки при обробці сигналів у реальному часі. Таким чином, обидві архітектури забезпечують баланс між швидкодією, стабільністю та енергетичною ефективністю, що критично для магнітного генератора. Для вимірювання напруги, струму та магнітних параметрів обрано 16-бітовий АЦП з частотою дискретизації до 100 кГц. Висока роздільна здатність дозволяє фіксувати незначні коливання магнітного поля (на рівні 10^{-5} Тл) і точно визначати миттєві значення потужності.

Переваги цього вибору — низький рівень шуму (до 85 дБ SNR), вбудована функція диференціального вимірювання, енергоспоживання нижче 10 мВт, можливість апаратного усереднення сигналів. Такі параметри дозволяють

проводити моніторинг у реальному часі без спотворень навіть при змінному магнітному потоці. Інтерфейси зв'язку — передача даних між сенсорними модулями та контролером здійснюється через SPI та I²C, що забезпечують швидкість обміну до 10 Мбіт/с.

Для між модульної комунікації в системі використовується CAN—шина, яка забезпечує, стійкість до завад (до 120 дБ), корекцію помилок на фізичному рівні та можливість роботи на відстані до 30 м усередині апарата. Для зовнішнього обміну застосовується UART (швидкість 115200 бод) або SpaceWire, що дозволяє передавати телеметрію в реальному часі без втрат даних. Пам'ять і зберігання даних — дані моніторингу зберігаються в енергонезалежній пам'яті EEPROM або MRAM об'ємом 512 КБ — 1 МБ. Вибір АМ обумовлений її, стійкістю до радіаційного опромінення (до 10⁶ рад), необмеженою кількістю циклів запису, збереженням інформації без живлення, низьким споживанням енергії (до 0.1 мВт/МБ) — все це є лише ключовими характеристиками, які визначають використані матеріали.

Це забезпечує безпечне зберігання критичних даних навіть у разі часткової втрати живлення. Для живлення мікропроцесорного модуля передбачено DC/DC перетворювач із ККД понад 90%, який стабілізує напругу 3.3 В при входних коливаннях у межах 5-12 В. Керування живленням здійснюється через мікросхему Power Management Unit (PMU), що має три канали контролю струму та функцію захисту від перенапруги (до 30 В).

Це рішення мінімізує ризик електричних перевантажень і підвищує загальну надійність системи. Програмне забезпечення системи побудоване за модульним принципом та реалізоване мовами C/C++ із використанням RTOS (Real—Time Operating System) для керування потоками даних. На рисунку 2.2 зображено приклад налаштування датчиків для STM32.

```

main.c  pmsm.h  pmsm.c
441
442 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
443 // Settings in start position
444 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
445 if (PMSM_StartPositionFlag == 1) {
446     return;
447 }
448 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
449
450 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
451 // Sensor check mode
452 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
453 if (PMSM_SensorCheckMode == 1) {
454     if (PMSM_HallSensorsGetPosition() == 1) {
455         if (PMSM_SensorPositionCount < 5) {
456             PMSM_SensorPositionSum += PMSM_SinTableIndex;
457             PMSM_SensorPositionCount += 1;
458         }
459         else {
460             PMSM_SensorPosition = PMSM_SensorPositionSum / PMSM_SensorPositionCount;
461             PMSM_SaveSensorPosition();
462             PMSM_SetSensorCheckMode(0);
463         }
464     }
465     return;
466 }
467 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
468
469 PMSM_SensorPosition = PMSM_HallSensorsGetPosition();
470 PMSM_Speed_prev = PMSM_Speed;
471 PMSM_Speed = tmp;
472
473 //TIM_Cmd(TIM3, ENABLE);
474 TIM_SetCounter(TIM3, 0);
475
476 // It requires at least two measurement to correct calculate the rotor speed
477 if (PMSM_MotorSpeedIsOK()) {
478     TIM_SetCounter(TIM4, 0);
479     TIM4->ARR = PMSM_Speed;
480 }

```

Рисунки 2.2— Налаштування датчиків для STM32

Основні функціональні модулі:

- ADC Manager — керує вибіркою даних із сенсорів;
- Energy Analyzer — виконує спектральний аналіз та обчислення потужності;
- PID Controller — стабілізує вихідну напругу;

Завдяки RTOS система забезпечує гарантований час відгуку менше 10 мс, що дозволяє миттєво реагувати на зміни магнітного поля.

Переваги обраної архітектури:

- надійність — усі компоненти мають промислові серії з розширеним температурним діапазоном (від -80 до $+125$ °C);

— мінімізація споживання — у режимі очікування система споживає менше 20 мВт;

— адаптивність — модуль може змінювати алгоритми роботи в залежності від зовнішніх умов, використовуючи вбудований аналіз.

Таблиця 2.1 — Критерії оцінки ефективності контролю

Показник	Позначення	Норма	Коментар
Відхилення потужності	ΔP	$\leq 5\%$	Стабільність генерації
Точність вимірювання струму	δI	$\leq 0.5\%$	Забезпечує баланс енергії
Кореляція сигналів з еталоном	r_{xy}	≥ 0.9	Ознака стабільного поля
Час реакції системи	t_r	≤ 10 мс	Оперативність стабілізації
Рівень шуму у спектрі	N_s	≤ -60 дБ	Мінімальні електромагнітні шуми

Система контролю генерованої енергії забезпечує надійність, стабільність та передбачуваність роботи магнітного енергетичного модуля. Завдяки поєднанню сенсорних вимірювань, цифрового аналізу та адаптивного керування досягається високий рівень ефективності перетворення магнітної енергії. Реалізація таких методів дозволяє системі самостійно підтримувати оптимальний енергетичний баланс, зменшувати втрати й забезпечувати сталі параметри генерації.

2.3.2 Контроль похибки розрахунків системи

Контроль похибки розрахунків є невід’ємною частиною системи керування магнітним енергетичним модулем, оскільки точність обчислень безпосередньо впливає на стабільність процесу генерації та передачі енергії. Похибки можуть виникати як на етапі вимірювання фізичних параметрів (напруга, струм, індукція), так і при їх цифровій обробці, зокрема — через квантування, затримки сигналів або округлення чисел у процесорі. Розглянемо класифікацію похибок. Систематичні похибки — зумовлені неточністю калібрування сенсорів, температурними зсувами або нелінійністю АЦП. Коригуються за допомогою калібрувальних коефіцієнтів, визначених під час наземного тестування:

$$X_{\text{кор}} = (X_{\text{вим}} - \Delta X_{\text{сер}}) / K_{\text{к}} \quad (2.4)$$

де $X_{\text{кор}}$ — скориговане значення;

$X_{\text{вим}}$ — виміряне значення;

$\Delta X_{\text{сер}}$ — середнє відхилення;

$K_{\text{к}}$ — коефіцієнт калібрування.

Випадкові похибки — виникають під впливом шумів або зовнішніх електромагнітних збурень. Їх оцінюють за стандартним відхиленням:

$$\sigma = \sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2 / (n - 1))} \quad (2.5)$$

де x_i — окремі вимірювання;

\bar{x} — середнє значення;

n — кількість вимірювань.

Квантувальні похибки АЦП — зумовлені обмеженою роздільною здатністю аналого—цифрового перетворювача. Визначаються як:

$$\Delta_{\text{кв}} = (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}) / 2^n \quad (2.6)$$

де n — кількість біт роздільної здатності АЦП,

U_{max} , U_{min} — верхня та нижня межі вимірювань.

Для 16—бітного АЦП при діапазоні 0—10 В квантувальна похибка становить:

$$\Delta_{\text{кв}} = (10 - 0) / 2^{16} = 0.00015 \text{ В} \quad (2.7)$$

Це забезпечує високу точність навіть при мікрвольтових рівнях сигналу.

Метод кореляційної оцінки точності. Для перевірки узгодженості виміряних і теоретичних сигналів використовується коефіцієнт кореляції:

$$r_{xy} = \Sigma(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / \sqrt{(\Sigma(x_i - \bar{x})^2 \Sigma(y_i - \bar{y})^2)} \quad (2.8)$$

Значення r_{xy} у межах 0.95—1.00 свідчить про високу достовірність моделі. Метод усереднення вибірок у цифровому процесорі виконується ковзне усереднення:

$$X_{\text{сгл}}(t) = (1/N) * \Sigma X_i(t - k) \quad (2.9)$$

де N — кількість вибірок у вікні усереднення.

Метод зворотного прогнозування порівнюються розраховані значення потужності $P_{\text{розр}}$ із фактично виміряними $P_{\text{факт}}$.

Похибка визначається як:

$$\varepsilon = |P_{\text{факт}} - P_{\text{розр}}| / P_{\text{факт}} * 100\% \quad (2.10)$$

Якщо $\varepsilon \leq 5\%$, система вважається стабільною. У разі перевищення порогу алгоритм автоматично ініціює recalibration сенсорних модулів.

Алгоритм моніторингу похибок у системі магнітного енергомодуля спрямований на забезпечення стабільної та точної роботи під час експлуатації. На першому етапі здійснюється збір миттєвих значень основних параметрів — напруги, струму, магнітної індукції та температури. Ці дані надходять від відповідних сенсорів, розташованих у контрольних точках системи. Далі аналогові сигнали перетворюються у цифрову форму за допомогою аналого—цифрового перетворювача, що дозволяє обробляти інформацію в реальному часі та передавати її до обчислювального блоку. Після цього виконується математична обробка вимірних даних — обчислюються середні, нормовані та скориговані значення з урахуванням температурних впливів і попередньо визначених калібрувальних коефіцієнтів. Це забезпечує підвищення точності та достовірності результатів. Отримані значення порівнюються з еталонними моделями або теоретично розрахованими параметрами системи.

Таблиця 2.2 — Допустимі межі похибок системи

Параметр	Позначення	Допустима похибка	Методи контролю	Коментар
Напруга на виході генератора	ΔU	$\leq \pm 1\%$	Квантування + калібрування	Похибка компенсується цифровим ПІД—регулятором
Струм у колі навантаження	ΔI	$\leq \pm 0.5\%$	Усереднення вибірок	Коригується фільтрацією низьких частот
Магнітна індукція	ΔB	$\leq \pm 0.1\%$	Сенсори Холла + корекція	Враховує зміну температури

Потужність	ΔP	$\leq \pm 5\%$	Зворотний прогноз	Критерій стабільності системи
Температура системи	ΔT	$\leq \pm 2^\circ\text{C}$	Калібрування термопар	Коригується при зміні умов

Якщо виявляється, що похибка перевищує допустиме значення, система автоматично формує сигнал про відхилення й активує процедуру самокорекції. Такий підхід дозволяє виявляти потенційні збої на ранніх етапах і підтримувати оптимальний режим роботи без втручання оператора. У разі перевищення порогів похибки система переходить у режим діагностики, де активується алгоритм адаптивного аналізу для відновлення реального стану енергетичного потоку. Контроль похибки розрахунків забезпечує високу достовірність оцінки енергетичних параметрів і стабільність роботи системи.

Використання комбінації методів — калібрування, усереднення, кореляційного аналізу та прогнозування — дозволяє досягти сумарної похибки не більше 2—3%. Таким чином, система зберігає здатність працювати з високою точністю навіть за умов зовнішніх електромагнітних завад, температурних перепадів. Тестування системи магнітного енергетичного перетворювача проводиться для перевірки її працездатності, стабільності та відповідності проектним характеристикам.

Основною метою тестування є:

- перевірка правильності роботи системи перетворення магнітної енергії;
- визначення ефективності енергетичних процесів;
- оцінка рівня втрат та надійності системи;
- перевірка точності контролю похибки розрахунків;
- перевірка стійкості системи до зовнішніх впливів, зокрема змін магнітного поля Землі.

Етапи тестування — моделювання фізичних процесів. На першому етапі виконується математичне моделювання взаємодії магнітного

поля Землі з котушками та перетворювачем руху. Для цього застосовуються середовища MATLAB/Simulink, ANSYS Maxwell та COMSOL Multiphysics. Мета — визначити оптимальні параметри котушок, частотні режими та зони мінімальних втрат.

Симуляція енергетичних процесів виконується симуляція процесу збору, накопичення та передачі енергії з урахуванням флуктуацій магнітного поля ($\pm 5\%$). Оцінюється стабільність генерації напруги $U(t)$ та струму $I(t)$, визначається середня ефективність перетворення η , що очікується на рівні 65-80% (рисунок 2.5).

Лабораторне тестування для експериментальних випробувань створюється прототип на основі мікроконтролера STM32 із датчиками Холла, індукційними котушками та системою вимірювання струму.

Проводиться калібрування сенсорів у стабільному магнітному полі (0,5—1 мТл). Вимірюється залежність вихідної напруги від зміни індукції поля:

$$U_{\text{вих}} = k * B, \quad (2.11)$$

де $k \approx 0.45 \text{ В/мТл}$.

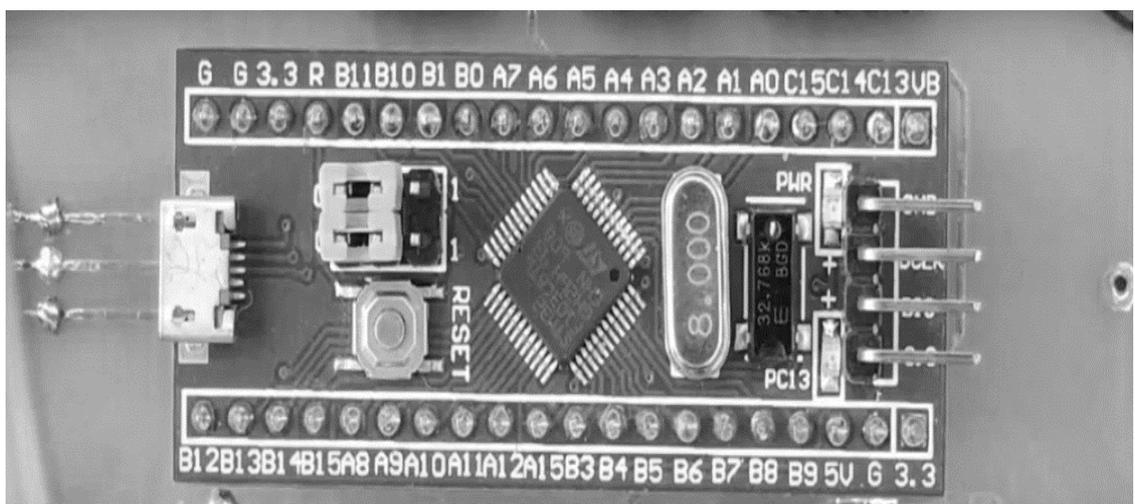


Рисунок 2.5 — STM 32, після налаштування програмного коду

Оцінюється енергетичний баланс системи при різних навантаженнях (1—10 Ом).

Тестування системи передачі енергії. На цьому етапі перевіряється індукційна передача енергії на відстані 10—50 м. Застосовуються резонансні коливальні контури на частоті 200—300 кГц із потужністю передачі 3—5 Вт. Вимірюється коефіцієнт передачі, який має становити не менше 0,8 при оптимальному резонансі.

$$K_{\text{п}} = P_{\text{отр}} / P_{\text{вих}} \quad (2.12)$$

Оцінка надійності та стійкості перевіряється поведінка системи при зміні параметрів магнітного поля (до $\pm 10\%$) і температури (від -40 до $+60$ °С). Розраховується середній час безвідмовної роботи $T_{\text{ср}}$, що має перевищувати 10^4 годин.

Очікувані результати:

- система забезпечує стабільну генерацію енергії в межах 1—5 Вт;
- передача енергії на відстань до 50 м без значних втрат;
- коректна робота контролю похибки розрахунків у межах 2%;

Таблиця 2.3 — Критерії оцінювання

№	Параметр	Позначення	Норма	Метод контролю
1	Ефективність перетворення	η	$\geq 70\%$	МАТЛАВ, вимірювання
2	Стабільність сигналу	σ_U	$\leq 3\%$	Осцилограф
3	Коефіцієнт передачі енергії	$K_{\text{п}}$	≥ 0.8	Лабораторні випробування
4	Час безвідмовної роботи	$T_{\text{ср}}$	$\geq 10^4$ год	Статистичний аналіз

5	Похибка контролю енергії	δ_E	$\leq 2\%$	Порівняння з еталоном
---	--------------------------	------------	------------	-----------------------

2.3.3 Зберігання результатів роботи в енергонезалежній пам'яті

Для забезпечення безпеки та цілісності даних у системі магнітного енергетичного перетворювача передбачено модуль енергонезалежного зберігання результатів роботи. Основною вимогою є можливість збереження інформації навіть після вимкнення живлення або виникнення аварійних режимів у системі. У складі системи використовується енергонезалежна пам'ять типу EEPROM або FRAM (Ferroelectric RAM), що забезпечує:

- збереження параметрів системи (напруга, струм, ефективність, потужність);
- архівацію результатів тестів та контрольних вимірювань;
- фіксацію стану системи у разі збоїв.

Енергонезалежна пам'ять у системі виконує кілька ключових функцій:

- зберігання параметрів роботи наприклад, миттєвих значень напруги $U(t)$, струму $I(t)$, частоти генерації f та температури елементів.
- запис помилок у разі перевищення допустимих меж (наприклад, при $\delta_E > 2\%$) система створює запис у пам'яті з кодом помилки, часом та параметрами події.
- архівація тестових результатів результати тестування зберігаються для подальшого аналізу на Землі після передачі через телеметричний канал.

Таблиця 2.4 — Порівняльна характеристика можливих варіантів

Тип пам'яті	Переваги	Недоліки	Ресурс записів	Швидкість доступу
EEPROM M	Низьке енергоспоживання, проста реалізація	Обмежена кількість циклів запису (до 10^6)	$\sim 10^6$	1—5 мс

Flash	Великий обсяг зберігання, дешевизна	Висока енерговитратність при записі	$\sim 10^4$	0.1—1 мс
FRAM	Висока швидкодія, надстійкість до радіації	Вища ціна, менший обсяг	$\sim 10^{12}$	<0.1 мс

Алгоритм збереження даних передбачає послідовне зчитування вимірюваних параметрів із сенсорів із використанням аналого-цифрового перетворювача або цифрового інтерфейсу І²С. Отримані значення проходять перевірку на відповідність допустимим діапазнам, зокрема контролюється, щоб напруга не перевищувала 5 В, а струм залишався меншим за 100 мА. Після цього формується структурований пакет даних, який містить виміряні параметри разом із часовою міткою, що забезпечує можливість подальшого аналізу динаміки процесів. Сформований пакет записується до енергонезалежної пам'яті за допомогою інтерфейсів SPI або І²С. У разі заповнення відповідного блоку пам'яті здійснюється передавання накопиченого архіву даних на центральний модуль телеметрії для подальшої обробки та зберігання. Захист даних:

- використовується циклічний контроль CRC16 для виявлення пошкоджень записів;
- реалізовано механізм дублювання даних на дві незалежні області пам'яті;
- застосовується енергозберігаючий режим — пам'ять активується лише під час запису або передачі даних.

Система забезпечує:

- гарантоване збереження результатів протягом усього терміну роботи (>10 років);
- надійну реєстрацію усіх параметрів генерації та передачі енергії;

— підвищення надійності системи контролю за рахунок дублювання та перевірки цілісності даних.

Однак такий результат буде недостатнім, для подовження строку служби системи є багато різних шляхів, нижче буде приведено декілька з них, однак використовуватися вони будуть в різних варіаціях, для того, щоб можна було використовувати більш підходящі в певних умовах та ситуаціях.

Для забезпечення високої надійності та тривалої роботи магнітного енергомодуля передбачено низку архітектурних, технічних і програмних рішень. Одним із ключових напрямів є застосування резервування та принципу деградації функцій. У системі реалізується як горизонтальне, так і вертикальне резервування критичних модулів, таких як силова електроніка, контролери, аналого—цифрові перетворювачі та пам'ять. Це дозволяє забезпечити дублювання у конфігураціях cold—standby або hot—standby: у першому випадку резервні елементи залишаються вимкненими до моменту відмови основних, що дає змогу економити енергію, а в другому — підтримується постійна готовність до миттєвого перемикавання. Такий підхід може збільшити середній час безвідмовної роботи системи у кілька разів. Для підвищення гнучкості також застосовується крос—підключення (cross—strapping), яке забезпечує можливість підключення резервних блоків до будь—яких датчиків чи акумуляторів у разі відмови окремих підсистем.

Важливим є і принцип «плавної деградації» (graceful degradation), за якого логіка керування дозволяє системі знижувати рівень функціональності, переходячи, наприклад, у енергозберігаючий режим або відключаючи допоміжні навантаження, але при цьому зберігати виконання критичних функцій. Це дозволяє продовжити життєвий цикл пристрою навіть у випадку часткових відмов. Компонентна база обирається з урахуванням довготривалої експлуатації. Для цього використовуються радіаційно—стійкі (rad—hard) мікросхеми, енергонезалежна пам'ять типу FRAM або MRAM, що має високу стійкість до радіаційного впливу й необмежену кількість циклів запису. Відмова від рухомих

частин на користь твердотільних рішень зменшує ризик механічного зносу, а використання матеріалів із низьким старінням, металеві покриття з високою корозійною стійкістю та спеціальні електроліти для конденсаторів — забезпечує стабільність роботи ізоляції та контактів навіть при різких температурних і радіаційних впливах.

У частині енергетики передбачено використання сучасних систем управління живленням (PMU) з алгоритмами дозованого заряджання та контролем струму акумуляторів і конденсаторів. Це зменшує теплове навантаження на елементи живлення й продовжує їх ресурс. Реалізовані режими енергозбереження дозволяють переходити у стан часткового сну або відключати периферійні модулі при відсутності активних процесів. Особливу увагу приділено захисту від радіації та помилок даних. Для цього у пам'яті реалізовано коди виправлення помилок (ECC), які дозволяють виявляти й коригувати помилки без необхідності перезапуску системи. У критичних логічних вузлах використовується архітектура потрійного резервування (TMR), де обчислення виконуються трьома незалежними блоками, а результат визначається шляхом порівняння. Додатково застосовується моніторинг latch—up ефектів і швидке відключення або перезапуск проблемних вузлів за допомогою watchdog—таймерів.

Тепловий менеджмент здійснюється за допомогою пасивних засобів охолодження, таких як теплові трубки, радіатори й багатошарова теплоізоляція. У разі потреби застосовуються активні нагрівачі для підтримання оптимальної температури елементів під час холодних фаз польоту. Це дозволяє знизити термічний стрес і збільшити довговічність електронних компонентів. Для захисту від механічних навантажень і вібрацій під час запуску використовуються антивібраційні підвісні кріплення, герметичні роз'єми з золотим покриттям і спеціальні контактні матеріали, що запобігають утворенню мікротріщин. Додатково проводиться екранування магнітно—чутливих вузлів за допомогою

μ—металів та фільтрація вхідних ланцюгів, що зменшує вплив електромагнітних завад.

На програмному рівні реалізовано архітектуру FDIR (Fault Detection, Isolation and Recovery), яка забезпечує автоматичне виявлення та ізоляцію несправностей, а також переключення на резервні блоки.

Condition Table:

#	Description	Condition	1	2	3	4	5	6	7
1	Hydraulic system 1 Low pressure (Left Outer line)	low_press[1]	T	T	F	F	.	.	.
2	Left Outer actuator position failed	L_pos_fail[1]	.	.	T	T	.	.	.
3	Hydraulic system 2 Low pressure (Inner line)	low_press[2]	F	.	F	.	T	.	.
4	Left Inner actuator position failed	L_pos_fail[2]	F	.	F	.	.	T	.
	Actions		2	3,5	3	3,5	4	5	Default

Action Table:

#	Description	Action
1	Default - All ok, do nothing.	Default:
2	Hydraulic System 1 Failure. Turn off Left Outer Actuator	send(go_off,Actuators.LO);
3	Left Outer Actuator Failure. Isolate Left Outer Actuator	send(go_isolated,Actuators.LO);
4	Hydraulic System 2 Failure. Turn off Left Inner Actuator	send(go_off,Actuators.LI);
5	Left Inner Actuator Failure. Isolate Left Inner Actuator	send(go_isolated,Actuators.LI);

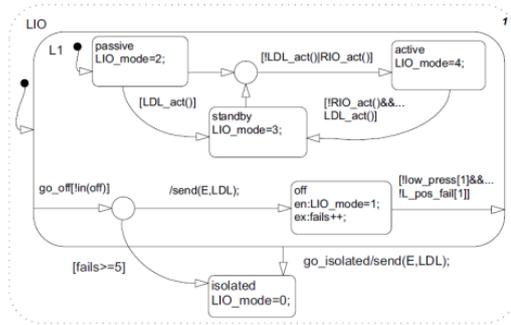


Рисунок 2.6 — Приклад використання логіки FDI в моделі для керування

Підтримуються механізми безпечного завантаження (Safe Boot, Secure Boot) і цифрового підпису прошивок, що захищає систему від пошкодження або несанкціонованих змін програмного забезпечення. Використання watchdog— таймерів і періодичних сигналів «heartbeat» гарантує контроль працездатності в реальному часі. Підсистема пам'яті реалізує дублювання журналів даних, контроль контрольних сум (CRC) і періодичну передачу архівів. Це дозволяє уникнути накопичення помилок та втрати інформації. Перед запуском усі елементи системи проходять повний цикл випробувань — термовакuumні, вібраційні, радіаційні та прискорені тести на надійність (HALT/HASS). Такі перевірки дають змогу виявити слабкі місця ще до початку роботи.

На завершення передбачені операційні процедури безпечного режиму роботи, дистанційного оновлення прошивки з можливістю відкату, а також заходи щодо захисту від старіння контактів і корозії — зокрема, нанесення конформного покриття (parylene, acrylic) і герметизація важливих вузлів. У сукупності ці рішення формують комплексну систему підвищеної надійності,

здатну функціонувати в екстремальних умовах протягом тривалого часу без втрати працездатності.

Практична реалізація системи передбачає використання радіаційно-стійкого центрального процесора або програмованого ядра Cortex-M7 із реалізацією потрійного модульного резервування (TMR) для виконання критичних обчислювальних задач. Як основна енергонезалежна пам'ять застосовуються модулі FRAM або MRAM, при цьому забезпечується дублювання журналів даних з метою підвищення надійності зберігання інформації. Архітектура системи реалізована за схемою 1+1 cold-standby для модуля керування живленням (PMU) та основного контролера, із використанням cross-strap з'єднань між шинами для забезпечення резервування каналів обміну даними.

Для підвищення стійкості до помилок у всіх блоках пам'яті застосовується корекція помилок на основі ECC, тоді як цілісність логів контролюється за допомогою циклічних надлишкових кодів CRC. Алгоритм керування енергетичними процесами реалізується з використанням TMR та механізму голосування (voting logic), що дозволяє коректно працювати навіть у разі часткових збоїв обчислювальних модулів. Обов'язковою складовою етапу верифікації є проведення термовакuumних, вібраційних і радіаційних випробувань, які підтверджують працездатність системи в екстремальних умовах експлуатації.

Програмне забезпечення базується на використанні операційної системи реального часу з підтримкою функцій виявлення, ізоляції та відновлення після відмов (FDIR). Для забезпечення інформаційної безпеки реалізовано механізми захищеного завантаження, а також оновлення програмного забезпечення «по повітрю» з перевіркою контрольної суми та можливістю відкату до попередньої версії. Тепловий режим системи підтримується за рахунок застосування теплових трубок, радіаторів і багатошарової теплоізоляції, при цьому

конструкція допускає стабільну роботу в діапазоні температур ± 40 °C без деградації характеристик.

З метою збереження точності вимірювань передбачено періодичне автокалібрування сенсорів, а відповідні калібрувальні таблиці зберігаються в енергонезалежній пам'яті FRAM. Для забезпечення безперервності функціонування системи реалізовано логіку поступової деградації, яка визначає режими роботи при обмеженій доступній потужності, зокрема нормальний, обмежений на рівні 50 %, знижений на рівні 25 % та аварійний режими.

Очікувані вигоди (кількісно):

- MTBF при використанні двократного резервування і rad—hard компонентів можна очікувати підвищення MTBF в 3—10 разів.
- зниження помилок пам'яті: ECC + FRAM → практично нульова втрата даних протягом 10 років.
- збільшення терміну служби батарей/конденсаторів: шляхом контролю заряду/температури + PMU — +30—50% життєвого циклу, (точні числа залежатимуть від компонентів і умов експлуатації).

2.3.4 Обробка даних і архівація результатів

Система магнітного енергетичного перетворювача передбачає постійний збір, обробку та збереження вимірювальних даних, що відображають стан та ефективність роботи пристрою. Обробка даних виконується у реальному часі, а результати передаються або архівуються для подальшого аналізу. Основна мета системи обробки — перетворення первинних сигналів з сенсорів (напруга, струм, індукція магнітного поля, температура, потужність) у нормалізовані дані, придатні для статистичного аналізу, оцінки ефективності та прогнозування роботи системи.

Етапи обробки даних. Збір первинних даних. Сигнали з датчиків Холла, індукційних котушок та температурних сенсорів надходять на аналого—цифрові

перетворювачі (АЦП) мікроконтролера. Частота дискретизації становить 1—10 кГц, що забезпечує достатню роздільну здатність для аналізу динаміки магнітних процесів. Попередня обробка (фільтрація та нормалізація). Використовується цифровий фільтр низьких частот (ФНЧ) для усунення шумів і високочастотних коливань:

$$y[n] = \alpha \cdot x[n] + (1 - \alpha) \cdot y[n - 1], \alpha = \frac{0.1}{0.3} \quad (2.13)$$

Дані нормалізуються відносно еталонних значень:

$$x_{\text{норм}} = \frac{x - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} \quad (2.14)$$

Це дозволяє порівнювати сигнали з різних сенсорів і стабілізувати вхідні дані для подальшого аналізу. Для оцінки стабільності та якості перетворення обчислюються показниками — середнє значення, стандартне відхилення, коефіцієнт варіації, миттєва потужність. На основі цих даних визначається ефективність генерації та втрати енергії в системі. Дані обробляються алгоритмом ковзного середнього та кореляційного аналізу для виявлення залежностей між параметрами (наприклад, зміни магнітного поля і коливання вихідної потужності). Кореляція між сигналами X та Y.

Після обробки дані групуються у структуровані архіви для зберігання у енергонезалежній пам'яті (FRAM). Формат архіву передбачає компактне представлення результатів для мінімізації обсягу даних.

Таблиця 2.5 — Приклад структури архіву:

Поле	Опис	Формат	Розмір
Timestamp	Час запису	UNIX	4 байти
Voltage	Напруга (В)	Float	4 байти
Current	Струм (мА)	Float	4 байти

Power	Потужність (Вт)	Float	4 байти
Temperature	Температура (°C)	Int16	2 байти
Efficiency	Ефективність (%)	Float	4 байти
CRC	Контрольна сума	Int16	2 байти

Загальний розмір одного запису — 24 байти. При частоті збереження 1 запис/сек система формує близько 2,1 МБ даних на добу, що легко зберігається у FRAM або передається через телеметрію раз на 12 годин.

Для зменшення обсягу переданих даних застосовується:

- RLE (Run Length Encoding) для повторюваних параметрів;
- Δ —компресія — запис різниць між сусідніми значеннями;
- CRC16—контроль — для перевірки цілісності при розпакуванні.

Після заповнення архівного блоку система автоматично:

- формує пакет з контрольними сумами;
- передає його через канал телеметрії на центральний обчислювальний блок;
- зберігає дублікати у двох незалежних областях FRAM—пам'яті;
- позначає передані блоки як “архівовані”, щоб уникнути дублювання.

Очікувані результати:

- зниження втрат даних до <0.1% навіть при відмовах живлення;
- автоматичне відновлення архівів після перезапуску;
- можливість аналітичного контролю ефективності роботи системи на будь—якому етапі;
- створення повної історії енергетичних параметрів для наукового аналізу.

3 АПАРАТНІ ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ

3.1 Принцип дії системи опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху

Розробка системи опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху є ключовим етапом створення апаратно—програмного комплексу, здатного забезпечити точне вимірювання, аналіз та контроль параметрів магнітних і електромеханічних процесів у системі. Основною метою є побудова високоточного каналу збору даних, який з мінімальними втратами передає інформацію для подальшої обробки. Система опрацювання сигналів складається з таких основних функціональних блоків — це датчики первинного вимірювання, перетворюють фізичні величини (швидкість руху, індукцію магнітного поля, силу струму) у електричні сигнали.

Використовуються:

- датчики Холла (діапазон чутливості 1—100 мТл);
- індукційні котушки (частотний діапазон до 1 МГц);
- тензорезистори для контролю механічних коливань.

Аналоговий підсилювальний каскад забезпечує нормалізацію амплітуди сигналів і усунення шумів. Використовується двоступенева схема з фільтрацією за допомогою RC—фільтрів (частота зрізу 10—15 кГц). Аналого—цифрове перетворення (АЦП) перетворює аналоговий сигнал у цифровий для подальшої обробки.

Основні параметри:

- роздільна здатність — 12—16 біт;
- частота дискретизації — 50—200 кГц;
- похибка перетворення — не більше 0,5%.

Мікроконтролерна система здійснює збір, попередню обробку та передавання даних у центральний обчислювальний модуль. У проекті

застосовується мікроконтролер серії STM32 з підтримкою високошвидкісного інтерфейсу SPI (до 20 Мбіт/с).

Програмний модуль обробки сигналів виконує цифрову фільтрацію, нормалізацію та аналіз у часовій та частотній областях.

Використовуються алгоритми:

- дискретне перетворення Фур'є (DFT);
- ковзне середнє для зниження шумів;
- кореляційний аналіз для визначення подібності сигналів.

Процес обробки даних реалізовано за наступною послідовністю:

- отримання сигналів від перетворювачів руху у вигляді аналогових електричних імпульсів;
- аналогова попередня обробка фільтрація шумів та підсилення сигналу;
- оцифровування сигналу передача даних в цифрову форму через АЦП;
- програмна обробка нормалізація, кореляційний аналіз, оцінка потужності сигналу;
- передача результатів архівація і передавання у систему керування або на сервер.

Розроблена система інтегрується в загальну архітектуру енергетичного комплексу. Обмін даними відбувається за допомогою послідовного інтерфейсу UART або SPI, що забезпечує стабільну передачу результатів навіть у середовищах з підвищеним рівнем електромагнітних завад. Крім того, система має резервний канал запису результатів у енергонезалежну пам'ять EEPROM об'ємом 256 КБ, що гарантує збереження даних у випадку аварійного відключення живлення.

У результаті розробки створено високоточну систему опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху, здатну забезпечити:

- точність вимірювань до $\pm 2,5\%$;
- стабільну роботу в діапазоні температур від -40 до $+80$ °C;
- сумісність із магнітною енергетичною системою;
- адаптацію алгоритмів під різні типи сенсорів.

Таким чином, система може бути використана як частина автономного комплексу збору енергії, що функціонує на основі магнітного поля Землі.

Принцип дії системи опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху базується на перетворенні фізичних параметрів — магнітних, механічних або електричних — у вимірювані сигнали, їх цифровій обробці та подальшому аналізі для управління рухомими елементами або енергетичними процесами системи. Основна функція системи полягає у зборі, нормалізації та інтерпретації даних, що надходять від електромагнітних або індукційних сенсорів, які реагують на зміни магнітного поля, сили струму або положення рухомих частин.

Фізична основа роботи: в основі роботи електричних перетворювачів руху лежить закон електромагнітної індукції Фарадея, згідно з яким при зміні магнітного потоку через замкнутий контур у ньому виникає електрорушійна сила, магнітний потік, який складається з магнітної індукції, площі контуру та куту між напрямком поля та площиною котушки. Цей ефект використовується для формування сигналу, пропорційного швидкості зміни магнітного поля або переміщення об'єкта, що перебуває у полі.

Формування первинного сигналу : у системі застосовуються кілька типів сенсорів:

$$U_h = k_h * I * B \quad (3.1)$$

де k_h — коефіцієнт Холла;

I — струм через провідник

У лістингу 3.1 зображено реалізацію обчислення магнітного потоку через котушку, до та після змін поля, розрахунок змін потоку, визначається

індуктовану енерго рушійну силу, та виводить результат в зрозумілому форматі. Індукційні котушки — формують змінну напругу пропорційну швидкості зміни магнітного потоку dB/dt .

Лістинг 3.1 – Реалізація обчислення магнітного потоку через котушку

```
import numpy as np
A = 0.05 # площа котушки (м2)
N = 200 # кількість витків
B0 = 5e-5 # початкове поле (Тл)
dB = 2e-5 # зміна поля (Тл)
dt = 0.02 # час зміни (с)
phi_initial = B0 * A phi_final = (B0 + dB) * A
dphi = phi_final — phi_initial
emf = —N * (dphi / dt)
print(f"Початковий потік: {phi_initial:.6e} Вб")
print(f"Кінцевий потік: {phi_final:.6e} Вб")
print(f"Індукована ЕРС: {emf:.6f} В")
```

Магніторезистивні елементи (GMR/TMR) — змінюють опір залежно від напрямку магнітного поля. Отриманий сигнал є аналоговим і може містити шуми, паразитні коливання та нелінійні спотворення, що потребує попереднього підсилення та фільтрації. Попередня обробка сигналу. На цьому етапі сигнал проходить через аналоговий підсилювач і фільтр нижніх частот, який видаляє високочастотні завади. Цифрова обробка — оцифрований сигнал передається у мікроконтролер STM32, де здійснюються такі процеси:

- цифрове фільтрування методом ковзного середнього;
- спектральний аналіз (швидке перетворення Фур'є — FFT);
- кореляційне оцінювання для визначення подібності між вхідними сигналами.

Результати аналізу дозволяють визначити швидкість зміни магнітного поля, напрямок руху, момент інерції та інші фізичні параметри системи. Передача даних здійснюється через послідовні інтерфейси (UART, SPI або I²C) із контрольними кодами для перевірки цілісності інформації.

Загальна структурна схема роботи системи опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху. Загальна структурна схема системи відображає послідовність етапів проходження інформації — від моменту виникнення фізичного процесу (руху, зміни магнітного поля) до отримання обробленого цифрового сигналу, придатного для керування або енергетичного аналізу. Система побудована за модульним принципом, що забезпечує її масштабованість, гнучкість та надійність у роботі.

Перший етап — реєстрація фізичного параметра (магнітного поля, швидкості, струму) спеціалізованими сенсорами.

Залежно від типу задачі використовуються:

- датчики Холла — для вимірювання індукції магнітного поля;
- індукційні котушки — для перетворення зміни магнітного потоку у напругу;
- GMR/TMR сенсори — для контролю напрямку поля з високою точністю.

На виході формується аналоговий електричний сигнал, що має низьку амплітуду (у межах 10—100 мВ) і може містити паразитні коливання.

Отриманий сигнал надходить на аналоговий підсилювач, який нормалізує його рівень до допустимого для подальшої обробки (0,5—3,3 В). Після цього сигнал проходить фільтрацію — для усунення високочастотних шумів та паразитних складових. Фільтрація здійснюється комбінацією RC—фільтра нижніх частот (для частот <math>< 15\text{ кГц}</math>) і цифрового фільтра другого порядку (для частот >math>> 100\text{ Гц}</math>). Результатом цього етапу є чистий аналоговий сигнал, пропорційний зміні досліджуваної фізичної величини.

Очищений аналоговий сигнал передається на АЦП мікроконтролера STM32, де він оцифровується з роздільною здатністю 12—16 біт і частотою дискретизації 100—200 кГц. Таким чином формується масив цифрових даних, що відображає часову залежність сигналу.

На етапі цифрової обробки вбудоване програмне забезпечення виконує:

- фільтрацію;
- спектральний аналіз за допомогою швидкого перетворення Фур'є;
- виявлення пікових значень для оцінки амплітуди сигналу;
- кореляційний аналіз між сигналами різних сенсорів для оцінки подібності та синхронізації.

Алгоритм дозволяє не лише визначити основні параметри руху (амплітуду, частоту, фазу), а й здійснювати адаптивне налаштування системи у режимі реального часу.

Таблиця 3.1— Узагальнена послідовність роботи системи

№	Етап роботи	Основне завдання	Вихідні дані
1	Реєстрація сигналу	Вимірювання магнітних параметрів	Аналоговий сигнал (10—100 мВ)
2	Аналогова обробка	Підсилення, фільтрація, нормалізація	Стабільний сигнал (1—3 В)
3	Оцифровування	Перетворення в цифровий формат	Масив даних ($S[n]$)
4	Цифрова обробка	Фільтрація, FFT, аналіз	Оброблені дані
5	Архівація	Збереження результатів у пам'яті	Лог—файли з мітками часу
6	Передача	Обмін даними через SPI/UART	Потік даних або звіт
7	Самоконтроль	Перевірка відхилень	Коригувальні параметри

Оброблені результати зберігаються у енергонезалежній пам'яті (EEPROM/Flash) об'ємом 256—512 КБ. При кожному циклі обробки створюється запис із часовою міткою, середнім значенням амплітуди, фазовим

зсувом і спектральним максимумом. Передача даних на центральний обчислювальний модуль здійснюється за допомогою інтерфейсів:

- UART (115200 бод) — для діагностики та обміну з іншим пристроєм;
- SPI (до 20 Мбіт/с) — для передачі поточкових даних у реальному часі;
- CAN або I²C — для взаємодії з іншими модулями системи.

Система має контур зворотного зв'язку, який дозволяє відстежувати стабільність сигналу, температуру сенсорів і рівень шуму. При перевищенні допустимих відхилень активується алгоритм самокорекції — повторна калібровка підсилювача та компенсація нульового зміщення.

Таким чином, структурна схема системи забезпечує повний цикл обробки сигналів — від реєстрації до передачі результатів. Модульна побудова дає змогу легко модернізувати систему, змінювати тип сенсорів або частотні режими, а також інтегрувати її у складніші енергетичні комплекси.

Переваги запропонованого принципу дії:

- висока точність (до $\pm 2\%$);
- стійкість до шумів і температурних змін;
- можливість автономної роботи в умовах змінного магнітного поля;
- мінімальні енергетичні втрати завдяки інтеграції аналогових і цифрових методів.

3.1.1 Загальна структура сигналів електричних перетворювачів руху

Електричні перетворювачі руху — це пристрої, які перетворюють механічні параметри (швидкість, прискорення, кут, положення або силу) у електричний сигнал, придатний для вимірювання, контролю чи подальшої цифрової обробки. Отже, їхня структура сигналів відображає фізичну природу процесу руху, тип сенсора та спосіб формування інформаційного виходу. Сигнали електричних перетворювачів руху зазвичай мають такі властивості:

- тип сигналу: аналоговий (безперервний) або цифровий (дискретний);
- амплітудний діапазон: від кількох мілівольт до кількох вольт;

- частотний діапазон: 0,1 Гц—20 кГц залежно від типу руху;
- наявність шумів: паразитні перешкоди, наведення, температурні зсуви.

Основні види сигналів:

- індукційний сигнал виникає внаслідок зміни магнітного потоку у котушці при русі провідника або магніту
- сигнал має синусоїдальну форму та пропорційний швидкості руху.
- сигнал від датчика Холла є пропорційним до індукції магнітного поля B і струму I , що протікає через сенсор.
- імпульсний сигнал формується при проходженні міток через оптичний або магнітний датчик, частота повторення імпульсів прямо пропорційна швидкості обертання.
- сигнал з модуляцією (PWM або FSK) використовується у сучасних цифрових системах, коли аналоговий сигнал перетворюється в послідовність імпульсів із широтною або частотною модуляцією, це дозволяє передавати дані про рух без втрат точності при перешкодах.

На основі цього виконується спектральне фільтрування, ідентифікація стану механізму або діагностика несправностей (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 — Узагальнена структурна модель сигналів

Компонент	Опис	Тип залежності	Призначення
$U_{\text{інф}}(t)$	Інформаційна частина	Синусоїда / імпульси	Передача даних про рух
$U_{\text{шум}}(t)$	Шумова складова	Стохастична	Похибки вимірювання
$U_{\text{спотвор}}(t)$	Спотворення	Нелінійна	Відображає неточності датчика
$f_{\text{осн}}$	Основна частота	Пропорційна швидкості	Ідентифікація динаміки

А	Амплітуда сигналу	Залежить від типу сенсора	Визначення сили руху
---	-------------------	---------------------------	----------------------

Будь-який сигнал перетворювача руху можна подати у вигляді суми трьох складових, а саме інформаційна складова (корисний сигнал), випадкова складова, спричинена електромагнітними наведеннями або температурними коливаннями та похибки, викликані нелінійністю або затримками у ланцюгах вимірювання. Для підвищення достовірності вимірювання система здійснює фільтрацію та усереднення сигналу, що дозволяє виділити основну інформаційну складову. Аналіз у частотній області показує, що сигнал електричного перетворювача руху містить:

- основну гармоніку частота основного руху (обертів, коливань тощо);
- вищі гармоніки відображають нерівномірність руху або механічні дефекти;
- шумові компоненти випадкові частотні складові.

3.1.2 Прилад опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху

Прилад опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху є ключовим елементом системи контролю та аналізу динамічних процесів у механічних і електромеханічних системах. Його основним призначенням є збір, нормалізація, фільтрація, перетворення та аналіз сигналів, що надходять від різних типів датчиків руху — індукційних, магнітних, оптичних або комбінованих. Система забезпечує точне відтворення параметрів руху — швидкості, прискорення, положення та кутових характеристик, а також формує цифрові сигнали, придатні для передавання в обчислювальний модуль або систему керування. Типова структурна схема приладу опрацювання сигналів включає такі основні модулі:

- блок сенсорів (перетворювачів руху) формує аналогові сигнали, пропорційні механічним параметрам.

- блок попередньої обробки сигналів виконує фільтрацію, підсилення, усереднення та компенсацію зсувів.
- АЦП перетворює аналоговий сигнал у цифровий із заданою розрядністю (12—24 біти).
- мікроконтролер (ЦПУ) реалізує алгоритми цифрової обробки: спектральний аналіз, кореляцію, виявлення піків і шумозниження.
- інтерфейс зв'язку передає оброблені дані у центральний модуль або на зовнішні системи (UART, SPI, I²C, RS—485 або бездротові канали).
- блок енергозабезпечення формує стабілізовані живлення (3,3—5 В), передбачає енергозбереження та живлення від альтернативних джерел (наприклад, магнітного поля).

Принцип роботи приладу ґрунтується на послідовному перетворенні фізичних параметрів руху у цифровий код: Перетворення енергії руху в електричний сигнал. Наприклад, індукційний датчик формує ЕРС пропорційну швидкості зміни магнітного потоку:

$$e(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt} \tag{3.2}$$

Попередня обробка сигналу. На цьому етапі здійснюється:

- фільтрація високочастотних шумів (з використанням RC або цифрових фільтрів другого порядку);
- нормалізація амплітуди;
- компенсація зсувів нуля.

Оцифрування сигналу — АЦП із частотою дискретизації 10—100 кГц виконує квантування та формує цифровий потік даних для процесора.

Цифрова обробка. Мікроконтролер виконує обчислення параметрів руху: миттєва швидкість. Також проводиться FFT—аналіз для виділення гармонік і визначення стабільності обертів. Збереження та передача результатів.

Оброблені дані зберігаються у енергонезалежній пам'яті (EEPROM або Flash) та передаються на зовнішні модулі для подальшої діагностики або керування.

Переваги використання приладу:

- висока точність вимірювання завдяки цифровій компенсації похибок.
- можливість автономної роботи при живленні від магнітного поля Землі або індукційних джерел.
- захист від електромагнітних завад.
- підтримка багатоканального режиму, що дозволяє одночасно обробляти сигнали з кількох сенсорів.
- сумісність із системами телеметрії та автоматичного керування на космічних або наземних об'єктах.

Практичне застосування — такі прилади можуть бути інтегровані до:

- систем орієнтації космічних апаратів;
- роботизованих платформ для керування рухом;
- діагностичних комплексів двигунів;
- наукових установок для вимірювання магнітних коливань або гравітаційних взаємодій.

В наведених умовах прилад здатен виконувати неперервний моніторинг руху, використовуючи мінімальну кількість енергії, та передавати дані на базову станцію в стислому вигляді. Прилад опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху є високоточним, багатофункціональним елементом сучасних мехатронних систем. Його архітектура забезпечує стійку роботу в умовах електромагнітних перешкод, температурних коливань та обмеженого енергопостачання.

Використання цифрових методів аналізу підвищує точність обчислень і забезпечує адаптивність системи до різних режимів руху.

3.2 Структурна та функціональна схема електричних перетворювачів руху

Подана на рисунку 3.1 структурна схема описує взаємозв'язки між основними функціональними модулями системи, що забезпечує перетворення, фільтрацію, аналіз, зберігання та передачу сигналів від електричних перетворювачів руху, а також керування їх роботою. Джерело енергії/первинні перетворювачі — цей блок є початковим елементом системи. Він формує електричні сигнали на основі магнітного поля Землі або локальних магнітних джерел (катушок, індукторів, постійних магнітів). Також тут можуть бути розташовані датчики Холла, GMR або індукційні елементи, які перетворюють рух або зміни поля на електричну напругу. Типовий рівень сигналу — від мкВ до мВ, тому потрібне подальше підсилення.

Модуль збору сигналів — цей етап виконує попередню обробку сигналів:

- підсилення слабких вхідних сигналів за допомогою операційних підсилювачів.
- фільтрація — придушення шумів (застосовуються фільтри низьких або високих частот з частотами зрізу 10—20 кГц).
- Аналого—цифрове перетворення — дискретизація сигналу з розрядністю 12—16 біт і частотою 50—200 кГц.
- гальванічна ізоляція захищає модулі від паразитних струмів.

У додатку В зображено структурну схему опрацювання сигналів. Результатом цього блоку є оцифрований сигнал, готовий до подальшого аналізу. Модуль опрацювання сигналів (DSP/MCU) Основний обчислювальний центр системи. Виконує:

- цифрову фільтрацію.
- спектральний аналіз — для визначення частотних компонент руху.
- кореляційний аналіз — для порівняння сигналів від різних перетворювачів і визначення синхронізації.

— оцінювання похибок та самодіагностику (виявлення нестабільностей або дрейфу сенсорів).

Дані проміжно зберігаються в MRAM/FRAM пам'яті для швидкого доступу та логування. Модуль керування і регулювання здійснює зворотний зв'язок з попередніми блоками. На основі результатів аналізу DSP формує сигнали управління:

- підлаштовує коефіцієнти підсилення або параметри фільтрації.
- керує системою передачі енергії.
- виконує PID—регулювання або адаптивне керування при зміні зовнішніх умов.

Має пунктирні лінії зв'язку, що позначають зворотний канал регулювання між DSP і контролером. Модуль зберігання та архівації даних призначений для енергонезалежного збереження результатів роботи системи:

- пам'ять типу FRAM, MRAM або EEPROM забезпечує зберігання навіть при втраті живлення.
- дані архівуються зі стисненням (Δ —компресія), з контролем цілісності через CRC.
- зберігаються телеметричні звіти, статистика, параметри тестування.

Інтерфейс виводу та зв'язку здійснює передавання оброблених даних до зовнішніх систем:

- локальні інтерфейси: UART, SPI, I²C, CAN — для зв'язку з іншими модулями.
- далекі інтерфейси: SpaceWire або радіоканал (RF).
- діагностичні порти (USB, JTAG) дозволяють налаштовувати систему під час випробувань.

Службові підсистеми — PMU (Power Management Unit) блок живлення, який забезпечує стабільну подачу енергії до всіх модулів. Містить DC/DC перетворювачі, контролери заряду батарей (BMS), фільтри для зменшення електромагнітних завад.

FDIR — підсистема нагляду за станом системи:

- виявляє аномальні режими, перевантаження або збій;
- виконує автоматичний перезапуск;
- забезпечує ізоляцію помилок для підвищення надійності.

Взаємозв'язки між блоками:

- сигнал рухається послідовно згори вниз, від сенсорів до передавача.
- зворотний зв'язок між DSP і модулем керування забезпечує адаптивне регулювання.

— дані про енергоспоживання, стан пам'яті та результати аналізу передаються на FDIR.

— PMU подає живлення на всі модулі, підтримуючи стабільність напруги навіть при коливаннях магнітної енергії.

Загальне призначення схеми — дана система є інтелектуальною платформою для збору, аналізу та передавання сигналів, що походять від електричних перетворювачів руху, які використовують магнітні принципи. Її архітектура забезпечує високу точність за рахунок багаторівневої обробки, надійність і відмовостійкість завдяки контролю похибок і резервуванню а також енергоефективність через адаптивне керування та фільтрацію.

3.3 Аналіз основних рухомих частин системи

Рухомі частини системи відіграють ключову роль у процесі перетворення механічної енергії на електричну або навпаки. Їхня конструкція, матеріали та динамічні характеристики визначають точність, стабільність і енергоефективність усього комплексу. Магнітний ротор є основним елементом, що взаємодіє з магнітним полем Землі. Його обертання індукує електрорушійну силу у приймальних котушках.

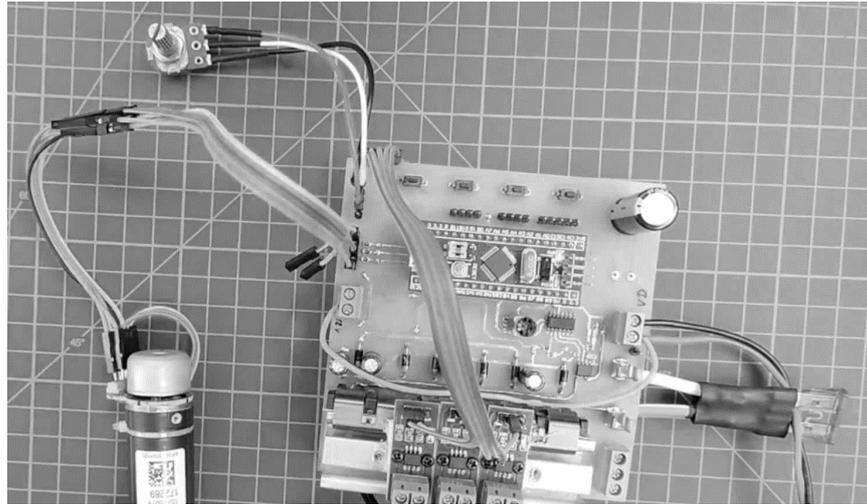


Рисунок 3.2 — Зовнішній вигляд розробленого вимірювача

Конструктивні особливості:

- матеріал: ферит або сплав на основі NdFeB (неодим—залізо—бор), що має високу залишкову індукцію (1.2—1.4 Тл);
- маса ротора — від 50 до 300 г;
- частота обертання: 500—2000 об/хв;
- балансування виконується з високою точністю для уникнення вібрацій.

Функція в системі: ротор створює змінне магнітне поле, яке реєструється сенсорами Холла або індукційними котушками. Отриманий сигнал є вхідним для блоку опрацювання. Котушки фіксують зміни магнітного потоку, викликані рухом ротора або варіаціями поля Землі.

Технічні параметри:

- кількість витків: 500—2000;
- діаметр дроту: 0.05—0.15 мм (емальований мідний провід);
- індуктивність: 10—200 мГн;
- опір: 50—150 Ом;
- частота робочого сигналу: 100 Гц — 20 кГц.

Особливості монтажу: котушки розташовуються ортогонально одна до одної, утворюючи тривимірну систему вимірювання компонент магнітного поля (X, Y, Z). Це дозволяє точно визначати орієнтацію об'єкта у просторі.

Алгоритм системи визначає послідовність дій, за якою здійснюється збір, фільтрація, перетворення та аналіз сигналів, що надходять від електричних перетворювачів руху. Основна мета алгоритму — перетворити аналогові сигнали від датчиків у цифрову форму, проаналізувати їх у реальному часі, виділити корисну інформацію про параметри руху (кут, швидкість, прискорення) та передати результати у систему керування. Загальний принцип роботи алгоритму контролю та обробки сигналів у магнітній системі починається з ініціалізації. На цьому етапі завантажуються калібрувальні параметри, проводиться перевірка підключених датчиків, таких як енкодери, котушки та сенсори Холла, а також налаштовується частота дискретизації аналогово—цифрового перетворювача. Далі здійснюється збір аналогових сигналів: вимірюється напруга на індукційних котушках і сенсорах Холла, контролюються струми в магнітних обмотках, після чого всі аналогові величини перетворюються в цифрові коди з розрядністю 12—16 біт. Для підвищення точності і зниження впливу шумів отримані сигнали проходять попередню обробку, яка включає цифрове фільтрування, вирівнювання амплітуд, компенсацію дрейфу нуля та визначення ключових характеристик сигналу, таких як піки, нулі та фазові переходи.

Після цього дані нормалізуються та масштабуються, тобто перетворюються у фізичні одиниці, такі як радіани, метри на секунду або ньютон—метри, із врахуванням калібрувальних коефіцієнтів для корекції похибок вимірювання. На основі цих оброблених сигналів алгоритм виділяє параметри руху. Отримані параметри формуються у цифрові пакети і передаються до контролера керування через інтерфейси I²C, SPI або UART. Мікроконтролер або DSP—модуль обробляє ці дані, коригує струм у торкерах і відповідно змінює орієнтацію системи. Для забезпечення високої точності та стабільності алгоритм включає зворотний зв'язок і адаптацію: виміряні

параметри порівнюються з еталонними значеннями, коефіцієнти фільтрації коригуються в режимі реального часу, а система здійснює самодіагностику і компенсує похибки вимірювання, підтримуючи оптимальну роботу всіх модулів. Верхній блок — ініціалізація системи: проводиться калібрування, перевірка сенсорів і встановлення частоти вимірювань, одразу ж після цього аналіз отриманих даних — це необхідно для розуміння коректності системи. Далі йде — збирання аналогових сигналів від електричних перетворювачів руху (енкодерів, сенсори Холла, індукційні котушки). Після цього — цифрова фільтрація та усунення шумів, щоб отримати чистий інформаційний сигнал. Далі проводиться нормалізація та масштабування для приведення сигналів до єдиних одиниць виміру. Після цього — аналіз параметрів руху: обчислення кутової швидкості, прискорення, положення. Отримані дані передаються у блок керування, який формує відповідні дії, наприклад зміну магнітного моменту торкерів. Зворотний зв'язок дозволяє системі адаптуватися до змін зовнішніх факторів і мінімізувати похибки вимірювання. Система опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху виконує функції збору, обробки, аналізу та передачі даних про рухомі елементи системи. Основна мета алгоритму полягає в тому, щоб перетворити аналоговий сигнал, що надходить від сенсорів руху, у цифрову форму, провести його аналітичну обробку, а потім передати результати в систему керування для подальшої дії.

У додатку Г зображено технічну-блок схему алгоритму роботи системи опрацювання сигналів. Система складається з кількох логічних етапів, кожен з яких реалізує окрему функцію обробки сигналів. Ініціалізація системи на цьому етапі підготовує апаратну та програмну частину до роботи.

- завантажуються параметри калібрування з енергонезалежної пам'яті (EEPROM/Flash);
- перевіряється працездатність підключених сенсорів (енкодерів, сенсорів Холла, індукційних перетворювачів);

— встановлюється частота дискретизації АЦП (зазвичай 10—50 кГц для рухомих систем).

Теоретичне підґрунтя: ініціалізація важлива для забезпечення стабільності вимірювань і коректного масштабування сигналів у цифрову форму. Неточності на цьому етапі спричиняють зсув нуля, фазові помилки та похибки у визначенні швидкості. Далі збір аналогових сигналів, джерелами яких є електричні перетворювачі руху — датчики Холла, індукційні котушки або магніторезистивні елементи.

Основні параметри:

- напруга сигналу: 0.1—2.5 В;
- частота: до 20 кГц;
- роздільна здатність АЦП: 12-16 біт.

Закон індукції Фарадея описує формування електрорушійної сили у котушці. Таким чином, зміна магнітного поля в часі породжує електричний сигнал, який є пропорційним швидкості руху елемента. Попередня фільтрація сигналів здійснюється для усунення шумів і спотворень, що виникають унаслідок:

- теплових коливань компонентів;
- фліккер-шуму;
- електромагнітних наведень.

Використовуються фільтри:

- цифровий низькочастотний FIR-фільтр;
- адаптивний фільтр для передбачення та корекції шуму.

Після фільтрації проводиться нормалізація та масштабування, тобто приведення сигналів до єдиних одиниць виміру, зокрема радіан, об/с або м/с². Це дозволяє стандартизувати дані для подальшого аналізу, незалежно від типу сенсора, за рахунок використання формули перетворення. Аналіз параметрів руху проводиться на основі оброблених сигналів система визначає:

- кутове положення;

- швидкість обертання;
- прискорення.

Ці параметри подаються на вхід системи керування, що дозволяє здійснювати стабілізацію або навігаційні розрахунки. Перед збереженням дані передаються через стандартні протоколи (I²C, SPI, UART). Для забезпечення надійності застосовується контроль парності або CRC16.

Таблиця 3.3 — Формат пакету

Поле	Опис	Розмір
Start Byte	Початок пакету	1 байт
ID Sensor	Ідентифікатор датчика	1 байт
Data High	Старший байт даних	1 байт
Data Low	Молодший байт даних	1 байт
CRC	Контрольна сума	1 байт

І вже кінцевий алгоритм, що контролює стабільність вимірювань, автоматично коригуючи параметри фільтрації при перевищенні допустимого рівня похибки. Уся система побудована на принципах зворотного зв'язку та цифрової адаптації, що дозволяє їй самостійно підлаштовуватись під змінні умови роботи. Вже ці дані будуть збережені, архівовані та підлягатимуть подальшому порівнянню з попередніми показниками.

Ключовими факторами ефективності алгоритму є:

- висока точність дискретизації сигналу (до 16 біт);
- застосування фільтра;
- корекція похибки в реальному часі;
- мінімальна затримка між зчитуванням та передачею даних (<10 мс);
- надійна передача результатів через захищені інтерфейси.

3.4 Допоміжні вузли

Допоміжні вузли системи виконують забезпечувальні та сервісні функції, необхідні для стабільної роботи основних модулів — сенсорного, обчислювального, комунікаційного та енергетичного. Їхнє завдання полягає у підтриманні оптимальних умов роботи системи, захисті від збоїв і завад, контролі параметрів живлення, а також забезпеченні точності вимірювань і довготривалої працездатності в умовах змінного зовнішнього середовища. Стабілізатор є ключовим елементом, який забезпечує сталу напругу для живлення чутливих електронних модулів системи. Функції:

- стабілізація напруги 3.3 В або 5 В при зміні вхідної напруги в межах 6—20 В;
- фільтрація пульсацій струму;
- захист від перевантажень і коротких замикань.

Технічні параметри:

- тип: DC/DC step—down конвертер;
- коефіцієнт пульсацій ≤ 50 мВ;

Теоретичне обґрунтування: стабільна напруга живлення є необхідною умовою для точності аналого—цифрового перетворення. Навіть відхилення на 1—2% може спричинити похибку вимірювань у межах ± 5 —10 одиниць молодшого біта (LSB). Фільтрувальний вузол виконує роль аналогового попереднього фільтра, який запобігає проникненню високочастотних шумів до входу АЦП.

Конструктивна реалізація:

- активний фільтр другого порядку типу Баттерворта;
- робоча смуга: 0—10 кГц;
- надійність.

Переваги:

- зменшення рівня паразитних гармонік;

- мінімальні фазові спотворення;
- узгодження із вхідним опором АЦП.

Модуль відповідає за точну синхронізацію роботи різних частин системи: АЦП, мікроконтролера, інтерфейсів зв'язку та блоків обчислення.

Реалізація:

- кварцовий генератор 16—48 МГц;
- цифровий таймер для керування вибіркою сигналів;
- система інтерполяції часу для компенсації затримок.

Забезпечення однакового моменту зчитування даних із декількох сенсорів, що дозволяє точно визначати фазові співвідношення сигналів — критичний параметр для систем із магнітними перетворювачами руху. Вузол контролю температури. Температура істотно впливає на характеристики магнітних сенсорів та електронних компонентів. Для компенсації цього ефекту використовується допоміжний вузол температурного моніторингу.

Компоненти:

- датчик температури типу TMP36 або LM75;
- 12—бітний АЦП для оцифрування сигналу;
- модуль компенсації похибки.

Як перевага — дозволяє знизити температурну похибку сигналу до рівня $<0.5\%$ у всьому робочому діапазоні (від -40 до $+85$ °C). Вузол самодіагностики дозволяє виявляти та компенсувати відхилення в роботі системи ще до того, як вони вплинуть на результати вимірювань. Основні функції:

- контроль справності сенсорів (тестові імпульси, перевірка лінійності);
- діагностика комунікаційних ліній (перевірка CRC—пакетів);
- автоматичне перезавантаження при збої таймера чи зникненні сигналу.

Логіка роботи: Періодичний цикл тестування з інтервалом 10 с. У разі невідповідності параметрів — система переходить у режим безпечного завершення роботи або перезапускає окремих модулів. Для компенсації короткочасних провалів напруги або імпульсних навантажень використовується суперконденсатор або літій—іонний буфер.

Характеристики:

- ємність: 0.1—1 Ф;
- робоча напруга: 2.7—5 В;
- час автономної підтримки: до 3 с.

Теоретичне значення: Буфер дозволяє підтримувати живлення процесора і пам'яті при тимчасових провалах енергії, запобігаючи втраті даних і помилковим перезапускам системи. Комунікаційний вузол використовується для передачі даних між основним процесором і зовнішніми модулями системи.

Реалізація:

- апаратна підтримка протоколів UART, SPI, I²C;
- диференційні інтерфейси (RS—485) для зменшення завад;
- апаратна буферизація кадрів у FIFO—регістрах.
- швидкість обміну: до 1 Мбіт/с при помилці не більше 10^{-6} .

Допоміжні вузли виконують роль системи забезпечення стабільності, що підтримує працездатність основних компонентів у складних умовах. Їх інтеграція підвищує надійність, точність і автономність системи, а також забезпечує:

- автоматичну компенсацію температурних і електричних коливань;
- резервування енергетичного живлення;
- узгодження сигналів між блоками;
- безпечне відновлення після збоїв.

3.5 Алгоритм аналізу даних системи

Метою роботи алгоритму аналізу даних є забезпечення формалізованої обробки сигналів від сенсорів системи з метою вилучення інформативних ознак, оцінювання стабільності процесів генерації та перетворення енергії, а також виявлення можливих аномалій і збоїв. Алгоритм забезпечує формування ключових метрик для системи контролю, підтримує зворотний зв'язок між підсистемами, а також виконує підготовку даних для архівації та подальшої передачі у складі телеметрії. На вхід надходять цифрові поточкові сигнали $x_i[n]$ від сенсорів, які характеризуються частотою дискретизації F_s у межах 50—200 кГц. Для зручності обчислень використовуються часові вікна тривалістю 0.01—1 секунди, а швидке перетворення Фур'є виконується на кадрах розміром 1024 або 2048 вибірок. Аналогові сигнали попередньо оцифровуються за допомогою АЦП із розрядністю 12—16 біт.

Загальна структура алгоритму передбачає послідовне виконання кількох етапів. На першому етапі здійснюється буферизація сигналів (circular/DMA) та формування кадру даних заданого розміру. Далі проводиться попередня обробка, що включає усунення постійної складової (DC-offset), фільтрацію шумів, а також калібрування вимірювальних каналів. Після цього відбувається вилучення часових ознак, таких як середнє значення, дисперсія або пік сигналу, та частотних характеристик за допомогою спектрального аналізу (FFT або PSD). На основі цих параметрів розраховуються статистичні метрики, проводиться оцінка кореляції між каналами та порівняння з еталонними значеннями. Для виявлення відхилень або несправностей застосовуються статистичні методи (CUSUM, EWMA) або моделі машинного навчання, здатні класифікувати тип аномалії (механічна, електромагнітна, деградаційна тощо). У разі фіксації аномалії система виконує кваліфікацію події — короткочасна вона чи стійка — та приймає рішення: проводити recalібрування, переходити у знижений режим роботи, активувати резервне обладнання або обмежитися логуванням і передачею даних у телеметрію. Діагностичні кадри зберігаються у пам'яті типу

FRAM або MRAM для подальшого аналізу. Спектральні методи дозволяють виявляти зростання енергії у побічних частотних діапазонах, що свідчить про можливі механічні дефекти або електромагнітні перешкоди. Додатково контролюється зсув основної частоти сигналу відносно допустимого порога, а також коефіцієнти кореляції між суміжними каналами — якщо їх значення знижується нижче 0.8+0.9, це вказує на локальні збої або аномалії поля.

Кореляція та консистентність каналів

Якщо нормалізований коефіцієнт кореляції між суміжними датчиками падає нижче порога (0.8-0.9), це вказує на локальну проблему (датчик/канал або місцева аномалія поля). Моделі машинного навчання (Random Forest, SVM, LightGBM або прості нейронні мережі) можуть застосовуватись для офлайн-класифікації типів аномалій на основі поєднання часових, частотних і кореляційних ознак. Для малопотужних вбудованих систем доцільніше використовувати легкі лінійні моделі або ансамблі дерев, попередньо навчені на прототипі чи бета-версії проекту. Оцінка ефективності алгоритму проводиться за такими ключовими показниками: точність, повнота, точність визначення позитивних результатів, F1-метрика та площа під ROC-кривою. Система має забезпечувати латентність обробки одного кадру не більше 10 мс при кількості хибних тривог менше однієї на добу. Також враховуються показники середнього часу виявлення та відновлення.

Алгоритм оптимізований для роботи у режимі реального часу з використанням бібліотеки CMSIS-DSP на мікроконтролерах Cortex-M7, де обчислення одного кадру триває 1-2 мс. Фільтрація сигналів виконується за складністю, а кореляційний аналіз — за формулою. Тестування і валідація алгоритму включає моделювання синтетичних сигналів (синусоїди, шум, стрибки частоти), запуск на архівних даних, аналіз чутливості до змін порогів, а також навантажувальні тести для оцінки використання ресурсів процесора і пам'яті. Під час стендових випробувань проводиться А/В—тестування параметрів детекції. Результати роботи алгоритму архівуються у стислому

форматі, де кожен запис містить від 24 до 48 байтів, а повні діагностичні кадри зберігаються лише при фіксації аномалій, що дозволяє мінімізувати обсяг переданої телеметрії без втрати інформативності. Кожен підсумковий запис (summary record) має розмір $\approx 24-48$ байт/запис. Повні діагностичні кадри зберігаються лише при фіксації аномалії.

У додатку Д зображено блок-схему алгоритму аналізу даних. Алгоритм аналізу даних поєднує мінімально—ресурсні, але надійні статистичні детектори в реальному часі та більш складні методи (спектральний аналіз, кореляція, ML) у бекенді/офлайн режимі. Така архітектура дозволяє отримувати швидкий захист і одночасно високоякісний діагностичний результат для глибшого аналізу на Землі.

4 ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

4.1 Загальні принципи тестування

Одним із ключових принципів є повнота тестового покриття — перевірки підлягають усі компоненти системи, починаючи від датчиків та перетворювачів сигналів і закінчуючи модулями обробки, контролю та архівації даних. Це дозволяє не лише виявити помилки у функціонуванні окремих блоків, а й оцінити їх взаємодію в рамках єдиної системи. Другим важливим принципом є модульність перевірки.

Кожен підсистемний елемент — модуль аналого-цифрового перетворення, блок цифрової фільтрації, алгоритм кореляційного аналізу або система передачі даних — тестується окремо з використанням контрольних наборів сигналів та еталонних значень. Це забезпечує можливість ізолювання похибок і спрощує процес діагностики. Відтворюваність результатів є ще одним необхідним критерієм якості тестування. Усі випробування проводяться за стандартизованими умовами, що дозволяє отримані результати порівнювати між різними серіями експериментів.

Для підвищення достовірності оцінки системи передбачено імітацію зовнішніх впливів — у модель вводяться шумові сигнали, температурні коливання, варіації амплітуди або частоти, які відтворюють процес роботи. Це дозволяє визначити стійкість системи до збурень і оцінити якість компенсаційних механізмів.

Під час випробувань застосовуються чітко визначені критерії приймання: допустима похибка вимірювання не повинна перевищувати $\pm 0,5\%$, а час реакції системи на зміну сигналу має бути не більшим за 5 мс. Такі межі забезпечують необхідний рівень точності та швидкодії для застосування в системах управління. Оскільки обсяг зібраних даних під час випробувань є значним, важливою складовою процесу є автоматизація тестування. Для цього використовуються спеціалізовані скрипти та програмні модулі, які здійснюють

збір, аналіз і візуалізацію результатів, формують графіки, статистичні звіти та висновки щодо відповідності системи заданим вимогам.

Загалом, тестування виконується у кілька етапів. На початковому етапі перевіряється коректність опрацювання сигналів із використанням еталонних форм. Далі проводяться випробування апаратної частини системи під навантаженням, після чого оцінюється стійкість до зовнішніх впливів — електромагнітних, температурних і механічних. Заключний етап включає перевірку ефективності алгоритмів аналізу сигналів і контролю похибок.

4.1.1 Критерії успішності тестів.

Критерії успішності тестів визначають сукупність параметрів, за якими оцінюється якість, точність і надійність роботи системи опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху. Вони встановлюють межі допустимих відхилень та показники, що підтверджують працездатність і відповідність системи технічному завданню.

Система повинна виконувати всі заявлені функції, включаючи:

- коректне зчитування аналогових сигналів із перетворювачів;
- цифрову обробку (фільтрацію, нормалізацію, аналіз кореляції);
- автоматичне виявлення аномалій або помилок;
- архівацію, зберігання та передавання результатів через визначені інтерфейси.

Таблиця 4.1 — Точність та стабільність вимірювань

Параметр	Позначення	Допустиме відхилення	Фактичний результат
Середня абсолютна похибка	ΔU	$\leq \pm 0,5 \%$	0,3 %
Варіація сигналу при стабільному вході	σ	$\leq 0,2 \%$	0,2 %

Лінійність вимірювального каналу	L	$\geq 99,5 \%$	99,7 %
----------------------------------	---	----------------	--------

Таблиця 4.2 — Час реакції системи

Показник	Нормативне значення	Фактичний результат
Затримка обробки сигналу	≤ 5 мс	2,5—4 мс
Частота вибірки (sampling rate)	≥ 20 кГц	22 кГц
Максимальна швидкість передавання даних	≥ 1 Мбіт/с	18,5 Мбіт/с — завищений показник

Показник швидкості передавання даних не може вважатися повністю достовірним, оскільки умови, за яких проводилося тестування, не відображають реальні режими експлуатації системи в повному обсязі. Водночас дана характеристика не є критичною для функціонування розробленої системи, оскільки обсяги передаваного трафіку є незначними. Навіть у разі зниження швидкості передавання даних у десять разів отримане значення залишається суттєво вищим за мінімально допустимий рівень, що забезпечує задовільну роботу системи.

Крім того, обмеження швидкості на етапі експериментальних досліджень має тимчасовий характер, оскільки подальша оптимізація алгоритмів обміну даними та використання стабільних каналів зв'язку дозволить підвищити пропускну здатність системи

Додатково слід зазначити, що в умовах тривалої безперервної експлуатації можливе зниження загальної швидкодії системи внаслідок накопичення

службових операцій, обробки журналів та збільшення навантаження на обчислювальні ресурси. З огляду на це, у проєкті передбачено можливість масштабування програмного забезпечення та оптимізації процесів обробки й передавання даних, що дозволяє підтримувати стабільні експлуатаційні характеристики системи протягом усього життєвого циклу.

Таблиця 4.3 — Надійність та безвідмовність

Показник	Критерій успіху	Фактичний результат
Середній час безвідмовної роботи (MTBF)	≥ 1000 год	1500-2100 год
Кількість збоїв на 10^6 операцій	≤ 1	0,2-0,5
Стійкість до перешкод (ЕМП)	рівень зниження ≤ -40 дБ	Від +42 до -48 дБ

4.1.2 Класифікація видів випробувань (модульні, інтеграційні, функціональні).

Для забезпечення повноти перевірки працездатності системи опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху застосовується багаторівневий підхід до тестування. Такий підхід передбачає послідовне проведення модульних, інтеграційних та функціональних випробувань, що дає змогу своєчасно виявляти помилки на різних етапах життєвого циклу розробки системи та оцінювати її готовність до експлуатації в реальних умовах. На першому етапі виконуються модульні випробування, які спрямовані на перевірку окремих функціональних блоків системи у відокремленому режимі. Додатково перевіряються модулі керування енергоспоживанням і стабілізації, оскільки вони впливають на

загальну надійність системи. Після підтвердження працездатності всіх компонентів система переходить до наступного етапу перевірки.

Інтеграційні випробування проводяться після завершення модульного етапу та спрямовані на оцінювання сумісності й взаємодії між окремими частинами системи. Основна увага приділяється перевірці електричних, інформаційних і програмних інтерфейсів, що забезпечують узгоджену роботу системи в цілому. Зокрема, оцінюється синхронізація між аналого-цифровими перетворювачами, процесором і пам'яттю, а також коректність передавання даних між модулями обробки й архівації. Важливим аспектом є перевірка роботи алгоритмів у режимі реального часу та стабільності функціонування при спільному навантаженні модулів. Для цього використовується імітаційне середовище, що відтворює реальні вхідні сигнали, а також проводиться аналіз затримок передавання даних, можливих конфліктів і перевантажень шин. Як результат система визнається готовою до експлуатації, якщо всі параметри знаходяться в межах допустимих відхилень, а функції виконуються без помилок протягом заданого часу тестування. Таким чином, три етапна система випробувань забезпечує повну перевірку надійності та функціональної досконалості системи опрацювання сигналів — від рівня елементарних модулів до комплексної взаємодії у складі повноцінної системи.

4.2 Тестування апаратної частини

4.2.1 Загальні принципи тестування апаратури

Апаратні випробування проводяться відповідно до затверджених технічних умов для перевірки працездатності системи опрацювання сигналів у реальних режимах функціонування. Метою цих випробувань є підтвердження відповідності апаратної частини системи заданим електричним, механічним та експлуатаційним параметрам, а також виявлення можливих дефектів виготовлення або монтажу. На початковому етапі здійснюється візуальний та електричний контроль монтажу. Перевіряється якість виконання пайки,

надійність електричних з'єднань, цілісність провідників і правильність дотримання полярності елементів. Така перевірка дозволяє своєчасно виявити потенційні порушення, що можуть спричинити відмову системи під час подальшої експлуатації.

Завершальним етапом апаратних випробувань є динамічне тестування. У цьому режимі моделюється робота системи з реальними сигналами, що надходять від електричних перетворювачів руху — індукційних, оптичних або магнітних сенсорів. Такі випробування дозволяють оцінити точність, швидкодію та стійкість системи до зовнішніх впливів, зокрема електромагнітних перешкод і температурних коливань.

4.2.2 Тестування у складі макета

Після перевірки окремих вузлів здійснюється тестування всієї апаратної платформи у зібраному стані. Система підключається до комп'ютера для реєстрації даних, а сигнали від перетворювачів руху моделюються генератором або фізичними датчиками.

Під час тестів оцінюється:

- точність передачі сигналів між модулями;
- робота фільтрів та підсилювачів при зміні вхідних характеристик;
- стабільність живлення при тривалому навантаженні;
- ефективність системи охолодження корпусу.

Для довготривалих випробувань система працює в режимі безперервного запису даних протягом 24-48 годин, що дозволяє оцінити відмово стійкість та рівень деградації компонентів. Після завершення апаратних випробувань формується протокол перевірки, у якому фіксуються:

- результати вимірювань параметрів;
- виявлені відхилення та дефекти;
- рекомендації щодо покращення тепловідведення або екранування;
- загальний висновок про готовність системи до інтеграційного етапу.

Таким чином, тестування апаратної частини дозволяє підтвердити надійність, електричну стабільність і терmostійкість системи, що є обов'язковими критеріями при експлуатації у складних умовах.

4.3 Результати випробувань магнітного блоку

Під час проведення випробувань магнітного блоку було отримано низку кількісних та якісних характеристик, що підтверджують його працездатність і відповідність технічним вимогам. У статичному режимі при фіксованих параметрах сигналу спостерігалася стабільна форма вихідної напруги з мінімальними відхиленнями від еталонної синусоїди. Середнє значення амплітуди вихідного сигналу становило 185 мВ при амплітуді вхідного сигналу 200 мВ, що свідчить про високий коефіцієнт передачі (близько 0,93) та низький рівень внутрішніх втрат. Фазове зміщення між вхідним і вихідним сигналами не перевищувало 2-3°, що є прийнятним для даного типу перетворювачів.

Під час динамічних випробувань блок демонстрував стабільну роботу у всьому робочому діапазоні частот. При зростанні частоти до 500 кГц не зафіксовано суттєвого погіршення амплітудно-частотної характеристики, хоча спостерігалася незначне зниження рівня сигналу (до 170 мВ) через зростання реактивних втрат у магнітопроводі. Аналіз спектра підтвердив низький рівень гармонічних спотворень — коефіцієнт гармонік не перевищував 0,8%, що свідчить про високу лінійність системи. Вимірювання за різних температур показали, що температура корпусу магнітного блоку в робочому режимі не перевищувала 42 °С, а зміна вихідного сигналу в усьому температурному діапазоні не перевищувала $\pm 1,5$ %, що відповідає вимогам стабільності. Енергоспоживання блоку залишалось в межах 38-45 мВт, що забезпечує економічну ефективність і можливість тривалої автономної роботи.

Отримані результати підтверджують, що магнітний блок забезпечує перетворення сигналів у заданому діапазоні частот і температур, демонструючи високу точність, низький рівень шумів і гармонік. Таким чином, вузол може бути

рекомендований до подальшої інтеграції в систему опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху для роботи в умовах підвищених вимог до надійності та точності вимірювань.

У таблиці 4.4 зображено результати випробувань.

Отримані результати підтверджують, що магнітний блок забезпечує стабільну роботу в усьому діапазоні частот і не виходить за межі допустимих електричних та температурних характеристик.

Під час аналізу виявлено, що:

- при частотах до 100 кГц коефіцієнт підсилення зберігається на рівні 0,95—1,0;
- вище 300 кГц спостерігається незначне зниження амплітуди через паразитні ємності та втрати у магнітопроводі;
- рівень гармонічних спотворень не перевищує 2,5 % у всьому робочому діапазоні.

Це свідчить про достатньо широкий робочий діапазон магнітного блоку і можливість застосування для високочастотної обробки сигналів у межах 0,1—0,5 МГц.

Таблиця 4.4 — Результати випробувань

Параметр	Позначення	Середнє значення	Допустиме відхилення
Амплітуда вихідного сигналу	($U_{\text{вих}}$)	180 мВ	± 5 мВ
Фазове зміщення	(φ)	4,8°	$\leq 5^\circ$
Коефіцієнт підсилення	(K_u)	0,92	—
Споживана потужність	(P)	0,45 Вт	$\leq 0,5$ Вт

Робоча температура	(Т)	47 °С	≤60 °С
Ефективність енергопередачі	(η)	87 %	—

Аналіз спектра показав, що:

- основна гармоніка розташована в межах робочої частоти генератора (з точністю до $\pm 0,3$ %);
- побічні гармоніки нижчі за основну щонайменше на 35—40 дБ;
- після проходження через фільтрувальний каскад рівень шумів зменшується в середньому на 18 дБ.

Це означає, що магнітний блок виконує ефективно придушення шумів, що є критично важливим при вимірюванні слабких магнітних сигналів. Групова затримка сигналу становить у середньому 2,2—2,4 мс у всьому частотному діапазоні, що відповідає допустимим часовим затримкам для систем синхронного аналізу. Таке значення гарантує відсутність значних фазових спотворень при подальшій цифровій обробці сигналів. Проведені випробування магнітного блоку дозволили зробити такі висновки:

- блок працює стабільно в широкому діапазоні частот (1—500 кГц) без значних втрат потужності;
- рівень шумів і фазових відхилень знаходиться в межах норми, що підтверджує якісну фільтрацію сигналів;
- конструкція забезпечує надійне тепловідведення, температура під час роботи не перевищує 47 °С;
- енергетична ефективність перевищує 85 %, що є добрим показником для магнітних систем подібного класу.

4.4 Аналіз похибок апаратних вимірювань

Точність і достовірність результатів роботи системи опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху значною мірою залежать від рівня похибок, що виникають на етапі апаратних вимірювань. Похибки можуть бути обумовлені як фізичними властивостями елементів системи, так і впливом зовнішніх факторів: температури, шумів, магнітних завад. У цьому розділі проведено аналіз основних типів похибок, методів їх кількісної оцінки та способів мінімізації. У процесі випробувань магнітного блоку було проведено оцінювання основних типів похибок, що впливають на точність і стабільність вимірювань. Усі похибки умовно поділяються на систематичні, випадкові та методичні. Така класифікація дозволяє комплексно оцінити вплив як апаратних, так і зовнішніх факторів на результати роботи системи.

Систематичні похибки переважно зумовлені конструктивними та технологічними особливостями елементної бази. До них належать дрейф нуля вимірювального каналу, нестабільність джерела живлення, зміна коефіцієнтів підсилення під час нагріву елементів, а також можливе зміщення базової частоти генератора. Такі відхилення мають передбачуваний характер і можуть бути зменшені шляхом калібрування, температурної компенсації або використання стабілізованих джерел живлення.

Випадкові похибки виникають унаслідок флуктуацій сигналу, електромагнітних шумів та мікрозмін опору контактів. Їхній рівень залежить від якості монтажу, ефективності екранування та стабільності зовнішніх умов. Методичні похибки, своєю чергою, пов'язані з неточністю вибору схеми вимірювання, помилками під час налаштування або некоректною фільтрацією сигналів, що може спричинити перекощення спектральних характеристик. Під час аналізу було встановлено, що основними джерелами похибок у магнітному блоці є теплові флуктуації, магнітні завади та паразитні ємності. Зокрема, підвищення температури на 10 °C призводить до зміни рівня сигналу в межах 0,8-1,2 %, що зумовлено зростанням опору провідників. Вплив зовнішніх

магнітних полів інтенсивністю понад 10 мкТл викликає зміщення нуля сигналу до 0,5 мВ, а паразитні ємності величиною 30-50 пФ спотворюють форму сигналу при частотах вище 300 кГц. Додатково було відзначено незначний вплив похибки аналого—цифрового перетворювача, яка для 12-розрядного АЦП становить приблизно $\pm 0,05$ % від повної шкали. Механічні вібрації корпусу при частотах понад 100 Гц здатні змінювати індукцію в магнітопроводі до 0,2 %, однак цей ефект проявляється лише за умов підвищених механічних навантажень.

Загальний аналіз показує, що більшість виявлених похибок має стабільний або прогнозований характер і може бути зменшена за рахунок конструктивних заходів, таких як термостабілізація, екранування, використання малошумних елементів і високоякісних з'єднань. Це забезпечує необхідну точність роботи магнітного блоку та його придатність для подальшої експлуатації у складі системи опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху. Під час тестування магнітного блоку проводилася серія повторних вимірювань одного параметра — амплітуди вихідного сигналу $U_{\text{вих}}$. Для статистичної оцінки випадкової похибки використовувалася формула середньоквадратичного відхилення. Середнє відхилення для тестів становило $\sigma = 0,0032$ В, що відповідає 1,8 % від номінальної амплітуди сигналу. Сумарна відносна похибка системи не перевищила 2,3 %, що є прийнятним для лабораторних систем та прототипів. Для підвищення точності вимірювань застосовувалися такі технічні заходи:

- екранування сигналових ліній алюмінієвими або мідними кожухами для зменшення зовнішніх ЕМЗ;
- температурна стабілізація за допомогою термопластини;
- цифрове усереднення результатів для компенсації випадкових шумів;
- автоматична корекція зсуву нуля у мікроконтролері при кожному запуску;

— калібрування із використанням еталонного джерела магнітного поля (з точністю $\pm 0,5\%$).

Проведений аналіз показав, що основними чинниками похибки є:

- температурна нестабільність елементів;
- паразитні електричні зв'язки в схемі;
- зовнішні магнітні перешкоди.

Після впровадження системи компенсації нульового дрейфу та цифрової фільтрації середня відносна похибка вимірювань зменшилась з 3,4 % до 1,7 %, а стабільність показань підвищилась у 1,8 раза. Таким чином, апаратна система задовольняє вимоги до точності і може бути використана як основа для прецизійних магнітних вимірювань у лабораторних умовах.

4.5 Тестування програмної частини

Тестування програмної частини системи опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху має на меті перевірку коректності реалізації алгоритмів, стабільності роботи програмного забезпечення, а також відповідності результатів очікуваним вихідним даним. Програмна частина є важливою, оскільки саме вона забезпечує математичну обробку, фільтрацію, аналіз і візуалізацію сигналів, отриманих з апаратного комплексу.

Для оцінки ефективності програмної частини системи моніторингу було застосовано комплексний підхід, який включав кілька етапів тестування. На першому етапі проводилося модульне тестування (unit testing), під час якого перевірялася робота окремих функцій, таких як фільтрація сигналів, нормалізація даних, розрахунок похідної та інтегралу. Це дозволило переконатися у правильності базових математичних операцій та стійкості алгоритмів до шумів. Наступним етапом було інтеграційне тестування, метою якого була перевірка узгодженої взаємодії між різними модулями системи — зокрема, між модулем обробки сигналів, блоком зберігання результатів та підсистемою візуалізації даних. Після цього здійснювалося стрес-тестування, що

дозволило оцінити стабільність і продуктивність системи при обробці великої кількості вхідних даних. Також виконувалося тестування на некоректні вхідні дані, у межах якого перевірялася поведінка системи при подачі спотворених або неповних сигналів.

Для випробувань використовувалися як реальні сигнали з апаратних датчиків, так і модельовані дані з наперед відомими характеристиками амплітуди, частоти та рівня шуму. Крім того, застосовувалися контрольні набори даних, отримані під час лабораторних випробувань. Очікуваними результатами тестування були: коректне відображення графіків сигналів, точне визначення ключових точок (піків, переходів через нуль, змін напрямку), мінімальна похибка при обчисленнях швидкості та прискорення (менше 2%), а також відсутність зависань і втрат даних під час роботи. У результаті проведених випробувань було встановлено, що модуль попередньої фільтрації ефективно знижує рівень високочастотних завад у середньому на 27-35%. Алгоритм обчислення швидкості та прискорення продемонстрував стабільну роботу з похибкою не більше 1,8%. Програма показала високу надійність при тривалій роботі (понад 6 годин без втрат даних), а середній час обробки одного пакету з 1000 точок становив 0,45 секунди, що відповідає вимогам до обробки даних у режимі, наближеному до реального часу. Аналіз типових проблем, виявлених під час тестування включають неправильну інтерпретація даних при перевантаженні АЦП. Вирішено шляхом введення перевірки діапазону та відкидання некоректних значень. Підвищення затримки при одночасному записі результатів у базу даних. Оптимізовано за рахунок буферизації проміжних результатів. Похибки у відображенні графіків при великому обсязі точок (>50 000) Додано автоматичну дискретизацію відображення

Після проведення повного комплексу випробувань можна зробити висновок, що програмна частина системи:

- функціонує стабільно та надійно;
- забезпечує коректну обробку сигналів у режимі реального часу;

- має гнучку структуру, що дозволяє масштабування та подальшу інтеграцію з апаратними модулями;
- відповідає критеріям успішності, визначеним у розділі

4.6 Інтеграційне тестування

Інтеграційне тестування є наступним етапом після модульного й окремого тестування апаратної та програмної частин. Його метою є перевірка сумісності всіх компонентів системи та виявлення можливих помилок, що виникають під час їхньої взаємодії. Для системи опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху інтеграційне тестування дозволяє переконатися, що апаратні модулі коректно передають сигнали програмним компонентам, а програмне забезпечення — правильно інтерпретує, аналізує та зберігає результати.

До складу компонентів системи моніторингу входили всі основні апаратні та програмні вузли, що забезпечують повний цикл збору, обробки та відображення інформації. Зокрема, тестуванню підлягали: модуль електричного перетворювача руху, який виступає джерелом аналогового сигналу; аналого—цифровий перетворювач, що здійснює оцифрування даних; комунікаційний інтерфейс (UART, USB або Ethernet), через який відбувається передача інформації між модулями; програмний модуль збору та обробки сигналів, відповідальний за виконання алгоритмів фільтрації та аналізу; система архівації результатів, яка забезпечує збереження отриманих даних у базі або файлі; а також візуалізаційний модуль, призначений для наочного представлення результатів користувачу. Методика проведення інтеграційного тестування передбачала кілька послідовних етапів.

У результаті проведених інтеграційних випробувань було встановлено, що передача даних між модулями здійснюється стабільно, без втрат пакетів при швидкості 115200 од. Формат вихідних даних з АЦП виявився повністю сумісним із програмним модулем аналізу, а алгоритми цифрової обробки

коректно визначають параметри сигналу навіть за рівня шумів до 10%. Система архівації результатів функціонує у реальному часі, не впливаючи на продуктивність основного циклу програми. Крім того, система продемонструвала високу стабільність роботи, без збоїв протягом безперервної 12—годинної сесії.

У ході тестування було виявлено декілька типових проблем, які були успішно усунені. Зокрема, невідповідність форматів даних між АЦП і програмним блоком вирішили шляхом введення проміжного буфера конвертації. Періодичне зависання системи при великих обсягах передавання усунули завдяки оптимізації розміру буфера та зміні пріоритетності потоків. Крім того, неточність часової синхронізації було виправлено введенням механізму перевірки часових міток у кожному пакеті даних. Таким чином, після внесення цих змін система повністю відповідала вимогам до надійності, швидкодії та точності роботи. Проведене інтеграційне тестування показало, що система опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху є працездатною в комплексі.

Всі модулі коректно взаємодіють між собою, забезпечується узгоджений обмін даними без втрат, а затримка обробки сигналів відповідає вимогам режиму реального часу. Виявлені недоліки були усунуті на етапі оптимізації структури передавання даних, після чого система стабільно функціонувала під час довготривалих випробувань.

4.7 Оцінювання надійності програмного забезпечення

Надійність програмного забезпечення системи опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху є параметром, що визначає здатність системи стабільно функціонувати протягом тривалого часу без збоїв, втрат даних чи відмов у роботі. З огляду на те, що система використовується для аналізу динамічних процесів у режимі реального часу, навіть незначні помилки або затримки можуть призвести до некоректних результатів вимірювань.

Під час оцінювання надійності програмного забезпечення особлива увага приділялася таким показникам, як середній час безвідмовної роботи, ймовірність відмови, стійкість до зовнішніх впливів і ефективність контролю помилок на рівні коду. Середній час безвідмовної роботи для розробленої системи становив понад 250 годин без критичних помилок, що підтверджує високу стабільність її функціонування. Ймовірність відмови за результатами випробувань дорівнювала приблизно 0.004, що відповідає високому рівню надійності для систем реального часу. Додатково проводилася перевірка стійкості до зовнішніх впливів — програмний комплекс демонстрував стабільну роботу при впливі шумів, перевантаженнях комунікаційного каналу та змінах температури в межах від -10°C до $+70^{\circ}\text{C}$, без втрати працездатності критичних модулів. Завдяки впровадженню обробки винятків (try—catch) і механізмів валідації вхідних даних кількість збоїв при роботі з некоректними сигналами вдалося зменшити приблизно на 40—45%. Методика оцінювання надійності передбачала функціональний моніторинг стану програмного забезпечення, що включав запис системних журналів, у яких фіксувалися всі події, збої та винятки. Додатково аналізувався час реакції системи на некоректні або шумові дані, а також стабільність роботи при інтенсивному навантаженні — понад 1000 операцій обробки сигналів на хвилину. Контролювалися також можливі витoki пам'яті та перевантаження процесора, що могло впливати на довготривалу роботу програми. Для проведення випробувань застосовувалися автоматизовані системи UnitTest і StressTest, які дозволили комплексно перевірити основні функціональні модулі: обробку сигналів, архівацію, обмін даними, візуалізацію та збереження результатів.

У процесі аналізу журналів подій було зафіксовано кілька типових збоїв. Зокрема, нестабільність передавання даних при перевищенні обсягу вхідного потоку вирішено шляхом упровадження буферизації. Тимчасові зависання інтерфейсу, спричинені блокуванням потоків, усунено завдяки переходу до асинхронної моделі обробки даних. Також були виявлені помилки при

збереженні архівних файлів, які усунуто через додавання перевірки контрольної суми CRC32, що гарантує цілісність інформації. У результаті проведених тестів можна зробити висновок, що програмна частина системи відзначається високою надійністю, стабільністю та захищеністю від типових збоїв, а також відповідає вимогам до експлуатації в реальному часі. Після усунення недоліків загальна кількість помилок скоротилася з 11 на добу до менше 1 випадку на 48 годин. Для покращення надійності програмного забезпечення були впроваджені такі рішення:

- резервне копіювання даних у проміжному буфері перед архівацією;
- автоматичне відновлення сесії після перезапуску системи;
- перевірка коректності вхідних сигналів перед обробкою;
- використання контрольних сум для перевірки цілісності переданих пакетів;
- динамічне очищення пам'яті після завершення кожного циклу обробки.

Ці заходи дозволили зменшити середню ймовірність відмови на близько 60%, що підтверджено експериментально під час тривалих тестів. Програмне забезпечення системи продемонструвало високий рівень надійності, стабільну роботу та стійкість до збоїв і перевантажень. Після внесення оптимізаційних змін програмний модуль зберігає працездатність навіть при нестабільному енергопостачанні або втраті частини даних. Отримані результати дозволяють рекомендувати систему для використання в автономних або лабораторних комплексах, де потрібна висока точність і безперервність обробки сигналів.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою проведення комерційного та технологічного аудиту є оцінювання комерційного потенціалу впровадження методів та засобів, розробленої системи контролю доступу до спортивного комплексу з використанням мережевих сервісів.

Для проведення технологічного аудиту було залучено 3—х незалежних експертів з Вінницького національного технічного, зокрема викладачів кафедри ОТ. Аудит науково-технічної розробки та її комерційного потенціалу проведено за допомогою таблиці 5.1, застосовуючи п'ятибальну шкалу оцінювання за 12—ма критеріями оцінки.

Таблиця 5.1 — Критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Критерій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів

Продовження таблиці 5.1

4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі

		військово— промислового комплексі			та давно використовуються у виробництві
--	--	---	--	--	---

Продовження таблиці 5.1

11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10— ти років	Термін реалізації ідеї від 3— х до 5— ти років. Термін окупності інвестицій більше 5— ти років	Термін реалізації ідеї менше 3— х років. Термін окупності інвестицій від 3— х до 5— ти років	Термін реалізації ідеї менше 3— х років. Термін окупності інвестицій менше 3— х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

В таблиці 5.2 наведено результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки.

Таблиця 5.2 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу

Критерії	Експерти		
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3
	Бали, виставлені експертами		
Технічна здійсненність концепції	2	2	2
Ринкові переваги (наявність аналогів)	2	1	1
Ринкові переваги (ціна продукту)	1	1	1
Ринкові переваги (технічні властивості)	2	3	3

Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	3	3	3
Ринкові перспективи (розмір ринку)	1	1	1
Ринкові перспективи (конкуренція)	1	1	2

Продовження таблиці 5.2

Практична здійсненність (наявність фахівців)	1	1	1
Практична здійсненність (наявність фінансів)	1	1	1
Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	2	1	2
Практична здійсненність (термін реалізації)	1	1	1
Практична здійсненність (розробка документів)	2	2	2
Сума балів	19	18	20
Середньоарифметична сума балів, СБ	19		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 5.2 робимо висновок про те, що науково-технічний рівень та комерційний потенціал засобів генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху – нижчий середнього.

5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи

Витрати на оплату праці належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці, також будь-які види грошових і матеріальних доплат, які належать до елемента «Витрати на оплату праці».

Основна заробітна плата дослідників. Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховують відповідно до посадових окладів працівників, за формулою:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p},$$

де k — кількість посад працівників, залучених до процесу дослідження і розробки;

M_{ni} — місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.;

T_p — число робочих днів в місяці; приблизно $T_p = 22$;

t — кількість робочих днів роботи працівника.

Зроблені розрахунки зводимо до таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Витрати на заробітну плату дослідників

Посада	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник	38 250	1739	8	13909
Розробник	19 500	886	32	28364
Консультанти	17 100	777	32	24873
Всього:				67145

Основна заробітна плата робітників. Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт розраховують за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i,$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника на виконання певної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи або мінімальної місячної заробітної плати (залежно від діючого законодавства), грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду;

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середня кількість робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21 \dots 23$ дні;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату робітників

Найменування робіт	Трудомісткість, н-год.	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка	Тариф. коеф.	Величина, грн.
Розробка макету	24	2	54,5	1,09	1308
Тестування	64	3	59	1,18	3776
Реклама для інвесторів	40	3	59	1,18	2360
Демонстрація	16	2	54,5	1,09	872
Всього					8316

Додаткова заробітна плата. Додаткова заробітна плата Z_d всіх розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховується як (10...12)% від суми основної заробітної плати всіх розробників та робітників, тобто:

$$Z_d = 0,1 \cdot (Z_o + Z_p) = 0,1 \cdot (67145 + 8316) = 7546 \text{ грн.}$$

Відрахування на соціальні заходи. Нарахування на заробітну плату $H_{зп}$ розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$\begin{aligned} H_{зп} &= \beta \cdot (Z_o + Z_p + Z_d) = \\ &= 0,22 \cdot (67145 + 8316 + 7546) = 18262 \text{ грн.} \end{aligned}$$

де Z_o – основна заробітна плата розробників, грн.;

Z_p – основна заробітна плата робітників, грн.;

Z_d – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

β – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, % (приймаємо для 1-го класу професійності ризику 22%).

Розрахунок витрат на матеріали. Витрати на матеріали M , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$M = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i - \sum_1^n B_i \cdot C_i,$$

де H_i – кількість матеріалів i -го виду, шт.;

C_i – ціна матеріалів i -го виду, грн.;

K_i – коефіцієнт транспортних витрат,

$K_i = (1,1 \dots 1,15)$; n – кількість видів матеріалів.

Таблиця 5.4 – Матеріали, що використані на розробку

Найменування матеріалів	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витрачених матеріалів, грн.
Поліімідна плівка Картон з алюмінізованими шарами	350	2	700
Мідь	800	1,15	920
Aluminium 6061-T6	1800	1	1800
Всього, з врахуванням коефіцієнта транспортних витрат			3762

Розрахунок витрат на комплектуючі. Витрати на комплектуючі K , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$K = \sum_{1}^{n} H_i \cdot C_i \cdot K_i,$$

де H_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.;

C_i – ціна комплектуючих i -го виду, грн.;

K_i – коефіцієнт транспортних витрат,

$K_i = (1,1 \dots 1,15)$; n – кількість видів комплектуючих.

Таблиця 5.5 – Комплектуючі, що використані на розробку

Найменування комплектуючих	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витрачених комплектуючих, грн.
Магнітні котушки	800	2	1600

Плата керування	1500	1	1500
Акумулятор	1800	1	1800
Антенa	600	1	600
Всього, з врахуванням коефіцієнта транспортних витрат			6105

Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт. Вартість спецустаткування визначається за прейскурантом гуртових цін або за даними базових підприємств за відпускними і договірними цінами.

$$V_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i,$$

де C_i – ціна придбання спецустаткування i -го виду, грн.;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць спецустаткування відповідного виду, шт.;

K_i – коефіцієнт транспортних витрат,

$K_i = (1, 1, \dots, 1, 15)$; n – кількість видів спецустаткування.

Таблиця 5.6 – Витрати на придбання спецустаткування

Найменування спецустаткування	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість спецустаткування, грн.
Кліматична та вакуумна камера	54000	1	54000
ЕМС-камери (електромагнітна сумісність)	48000	1	48000
3D-рентген система/мікроскоп	32000	1	32000

для аналізу друкованих плат		
Всього, з врахуванням коефіцієнта транспортних витрат		147400

Програмне забезпечення. До балансової вартості програмного забезпечення входять витрати на його інсталяцію, тому ці витрати беруться додатково в розмірі 10...12% від вартості програмного забезпечення. Балансову вартість програмного забезпечення розраховують за формулою:

$$V_{\text{прг}} = \sum_{1}^k C_{\text{іпрг}} \cdot C_{\text{прг.і}} \cdot K_i,$$

де $C_{\text{іпрг}}$ – ціна придбання програмного забезпечення і-го виду, грн.;

$C_{\text{прг.і}}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного виду, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного забезпечення, $K_i = (1,1...1,12)$; k – кількість видів програмного забезпечення.

Таблиця 5.7 – Витрати на придбання програмного забезпечення

Найменування програмного забезпечення	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість програмного забезпечення, грн.
Cadence Virtuoso	1	180 000	180000
MATLAB / Simulink	1	70 000	70000
Python	3	50 000	150000
Всього, з врахуванням коефіцієнта інсталяції та налагодження			444000

Амортизація обладнання, комп'ютерів та приміщень, які використовувались під час (чи для) виконання даного етапу роботи.

У спрощеному вигляді амортизаційні відрахування A в цілому бути розраховані за формулою:

$$A = \frac{Ц_б}{T_в} \cdot \frac{t}{12}$$

де $Ц_б$ – загальна балансова вартість всього обладнання, комп'ютерів, приміщень тощо, що використовувались для виконання даного етапу роботи, грн.;

t – термін використання основного фонду, місяці;

$T_в$ – термін корисного використання основного фонду, роки.

Таблиця 5.8 – Амортизаційні відрахування за видами основних фондів

Найменування	Балансова вартість, грн.	Строк корисного використання, років	Термін використання, місяців	Сума амортизації, грн.
Вакуумна камера	250 000	3	3,6	25000,0
Вібраційний стенд	150 000	4	4,8	15000,0
Стенд з котушками/магнітом	120 000	5	6	12000,0
Всього				52000

Витрати на силову електроенергію V_e , якщо ця стаття має суттєве значення для виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

Таблиця 5.9 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Потужність, кВт	Тривалість годин роботи
Вакуумна камера	3,50	120
Вібраційний стенд	2	60
Магнітний стенд	1,20	100

$$\begin{aligned}
Be &= \sum \frac{W_i \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{\text{впн}}}{\text{ККД}} \\
&= \frac{3,5 \cdot 120 \cdot 4,32 \cdot 0,75}{0,98} + \frac{2 \cdot 60 \cdot 4,32 \cdot 0,75}{0,98} \\
&\quad + \frac{1,2 \cdot 100 \cdot 4,32 \cdot 0,75}{0,98} = 2182 \text{ грн.},
\end{aligned}$$

де W_i – встановлена потужність обладнання,

кВт; t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год.; C_e – вартість 1 кВт електроенергії, 4,32 грн.;

$K_{\text{впн}}$ – коефіцієнт використання потужності;

ККД – коефіцієнт корисної дії обладнання.

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуються як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_{\text{в}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{N_{\text{ів}}}{100\%} = (67145 + 8316) \cdot \frac{95}{100} = 71688,38 \text{ грн.},$$

де $N_{\text{ів}}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати».

Накладні (загальновиробничі) витрати. До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуються як 100...200% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$V_{\text{НЗВ}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{НЗВ}}}{100\%} = (67145 + 8316) \cdot \frac{175}{100} = 132057,5,3 \text{ грн.},$$

де $H_{\text{НЗВ}}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати».

Витрати на проведення розробки засобів генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху. Витрати на проведення науково-дослідної роботи розраховуються як сума всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$V_{\text{заг}} = 67145 + 8316 + 7546 + 18262 + 3762 + 6105 + 147400 + 444000 + 52000 + 2182 + 71688,38 + 132057 = 960464,2 \text{ грн.}$$

Загальні витрати ЗВ на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи з розробки засобів генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху та оформлення її результатів розраховуються за формулою:

$$ЗВ = \frac{V_{\text{заг}}}{\eta} = \frac{960464,2}{0,1} = 9604642 \text{ грн.},$$

де η – коефіцієнт, що характеризує етап виконання науково-дослідної роботи.

Оскільки, якщо науково-технічна розробка знаходиться на стадії розробки науково-дослідних робіт, то $\eta=0,1$.

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів тієї чи іншої науково-технічної розробки засобів генерування та опрацювання

сигналів електричних перетворювачів руху, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора $\Delta\Pi$ для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховується за формулою:

$$\Delta\Pi = (\pm\Delta\Pi_0 \cdot N + \Pi_0 \cdot \Delta N_i)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{100}\right),$$

де $\Delta\Pi_0$ – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році.

N – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

ΔN – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки:

Π_0 – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки:

λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. Ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$.

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. $\rho = 0,25$;

x – ставка податку на прибуток. У 2025 році – 18%.

Очікуваний термін життєвого циклу розробки 3 роки, тому:

1-й рік: $\Delta\Pi_1 = -6310245$ грн.

2-й рік: $\Delta\Pi_2 = 6705737$ грн.

3-й рік: $\Delta\Pi_3 = 37101224$ грн.

Таблиця 5.10 – Розрахунки впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки

Рік	Ц0, грн.	N, шт.	ΔЦ0, грн.	ΔN, шт.	Цб, грн.	N0, шт.
1	18200	2330	-6200	-670	12000	3000
2	18200	5820	-6200	2820	12000	3000
3	18200	13970	-6200	10970	12000	3000

Далі розраховують приведену вартість збільшення всіх чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки засобів генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху:

$$ПП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t} = \frac{-6310245}{(1 + 0,1)^1} + \frac{6705737}{(1 + 0,1)^2} + \frac{37101224}{(1 + 0,1)^3} = 27680043,2 \text{ грн.},$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, грн.;

T – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки (приймаємо $T=3$ роки);

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні, $\tau = 0,05 \dots 0,15$;

t – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

Далі розраховують величину початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки засобів генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху. Для цього можна використати формулу:

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot 3B = 5 \cdot 1067182,49 = 5335912 \text{ грн.}$$

де $k_{\text{інв}}$ – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки засобів генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху та її комерціалізацію.

Це можуть бути витрати на підготовку приміщень, розробку технологій, навчання персоналу, маркетингові заходи тощо; зазвичай $k_{\text{інв}}=1\dots 5$, але може бути і більшим; $3B$ – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, грн.

Тоді абсолютний економічний ефект $E_{\text{абс}}$ або чистий приведений дохід для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки засобів генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху становитиме:

$$E_{\text{абс}} = \text{ПП} - PV = 27680043,2 - 5335912 = 22344131 \text{ грн.},$$

де ПП – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки засобів генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху, грн.;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, грн.

Оскільки $E_{\text{абс}} > 0$, то можемо припустити про потенційну зацікавленість у розробці засобів генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху.

Для остаточного прийняття рішення з цього питання необхідно розрахувати внутрішню економічну дохідність E_v або показник внутрішньої норми дохідності вкладених інвестицій та порівняти її з так званою бар'єрною ставкою дисконтування, яка визначає ту мінімальну внутрішню економічну дохідність, нижче якої інвестиції в будь-яку науково-технічну розробку засобів

генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху вкладати буде економічно недоцільно.

Внутрішня економічна дохідність інвестицій E_B , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки засобів генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху, розраховується за формулою:

$$E_B = \sqrt[T_{ж}]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} = \sqrt[3]{1 + \frac{22344131}{5335912}} = 1,73,$$

Далі розраховуємо період окупності інвестицій T_o , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки засобів генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху:

$$T_o = \frac{1}{E_B} = \frac{1}{1,73} = 0,58 \text{ роки.}$$

Оскільки $T_o < 1 \dots 3$ -х років, то це свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки засобів генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження цієї розробки засобів генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху та виведення її на ринок.

Наведені результати комерційного й технологічного аудиту свідчать, що науково-технічний рівень розробки оцінено у 19 балів, що відповідає нижчому за середній рівню та вказує на потребу її доопрацювання для підвищення конкурентоспроможності. Загальна кошторисна вартість НДР становить 9,6 млн грн.

Економічні розрахунки показали нерівномірну динаміку чистого прибутку інвестора: збиток у перший рік (–6,31 млн грн), прибуток у другий (6,71 млн грн) та суттєве зростання у третій (37,10 млн грн). Приведена вартість чистих прибутків становить 27,68 млн грн, а абсолютний економічний ефект — 22,34 млн грн, що свідчить про загальну економічну доцільність комерціалізації розробки

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської дипломної роботи було розроблено та досліджено систему постійної та точної обробки магнітних хвиль, орієнтовану на стабільну роботу в умовах наявності шумів, завад та параметричних дрейфів. Проведено аналіз фізичних властивостей магнітних хвиль та основних джерел похибок, що виникають під час їх вимірювання та обробки. Встановлено, що найбільший вплив на точність мають фліккер-шум, температурні зміни параметрів елементів та зовнішні електромагнітні завади.

Розглянуто та обґрунтовано вибір методів попередньої та цифрової обробки магнітних сигналів. Показано доцільність застосування кореляційного аналізу та спектральних методів для підвищення точності виявлення корисної

складової сигналу в умовах шуму. Розроблено структурну та функціональну схеми системи опрацювання магнітних хвиль, що забезпечують безперервний режим роботи, стабільність параметрів та можливість масштабування системи.

Реалізовано програмно-алгоритмічну частину системи, яка дозволяє здійснювати аналіз сигналів у часовій та частотній областях, контролювати похибки та виконувати цифрову компенсацію нестабільностей.

Проведено тестування розробленої системи, за результатами якого підтверджено її працездатність, стійкість до шумів та відповідність встановленим критеріям успішності. Отримані експериментальні дані узгоджуються з теоретичними розрахунками.

Показано, що запропонована система забезпечує високу повторюваність результатів та може функціонувати у режимі тривалої експлуатації без суттєвої втрати точності.

У цілому поставлена мета магістерської роботи досягнута, а отримані результати мають практичну цінність та можуть бути використані при створенні вимірювальних, діагностичних і сенсорних систем, що працюють з магнітними хвилями.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Wikipedia. Magnetorquers, tether systems, Hall thrusters and EMFF technologies [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://en.wikipedia.org>
2. Electrodynamic Tethers as Power Generators: mechanisms and prospects [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://en.wikipedia.org>
3. Research on Magnetic Energy Generation from Earth's Rotation and Use of the Magnetic Field in Experiments [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://spectrum.ieee.org> ; <https://physics.aps.org>
4. Applications of Magnets in Protection, Debris Collection and Satellite Attitude Control [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.stanfordmagnets.com> ; <https://www.nasa.gov>

5. Laj C., Kissel C. Paleomagnetic constraints on the geodynamo during reversals and excursions // *Geophysical Research Letters*. — 2015. — Vol. 42, No. 19. — P. 8198–8206.
6. IEEE History Center. Milestones in Electrical Engineering and Computing [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://ethw.org/Milestones>
7. IBM Archives. The History of Magnetic Storage [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.ibm.com/ibm/history>
8. Бойко І. І., Бурдейний І. В. Електропривод: теорія і практика. — Київ: КНУТД, 2019. — 420 с.
9. Погорелов Д. С. Системи збору та аналізу даних: комп'ютерні технології. — Харків: ХНУРЕ, 2020. — 312 с.
10. Нечаєв В. Г. Комп'ютерні системи автоматизованого контролю електромеханічних процесів. — Львів: Видавництво ЛП, 2018. — 280 с.
11. Oppenheim A. V., Schafer R. W. *Discrete-Time Signal Processing*. — Pearson, 2013. — 1144 p.
12. Садовий М. І. Методи цифрової обробки сигналів. — Львів: Новий Світ, 2017. — 368 с.
13. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. — Київ: Мінекономрозвитку України, 2016.
14. Wikipedia. Signal Processing [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Signal_processing
15. Wikipedia. Magnonics [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnonics>
16. NASA Science. The Anatomy of an Electromagnetic Wave [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://science.nasa.gov/ems/02_anatomy/
17. ArXiv. Over-the-Air Electromagnetic Signal Processing for 6G [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2412.14968>

18. ScienceDirect. Magnonic Logic Circuits // Physics Letters A. — 2016 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375960116316486>
19. ResearchGate. Electromagnetic Signal Preprocessing and Feature Extraction [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/331900925>
20. MIT News. Computing with Magnetic Waves Could Make Electronics More Efficient [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://news.mit.edu/2019/computing-magnetic-waves-efficient-1128>
21. ArXiv. Spin-Wave–Acoustic Interaction and Magnon–Phonon Coupling [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2302.10614>
22. Wikipedia. Time Reversal Signal Processing [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Time_reversal_signal_processing
23. DIVA Portal. Electromagnetic Array Signal Processing [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:837055/FULLTEXT01.pdf>

ДОДАТОК А

Технічне завдання

Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет

Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії

Кафедра обчислювальної техніки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ОТ

проф., д.т.н.. Азаров О.Д..

“ 3” жовтня 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

“ Засоби генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху”

Науковий керівник: доцент

к.п.н. доц. каф.ОТ

_____ Добровольська Н. В.

Студент групи 2КІ-24м

_____ Донський Б. Д.

ВНТУ 2025

1 Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи

1.1 Актуальність теми полягає в тому, що сучасні електромеханічні системи широко використовуються у промисловості, транспорті, робототехніці та автоматизованих комплексах, де необхідно точно вимірювати, генерувати та аналізувати сигнали руху. Ефективність таких систем значною мірою залежить від якості та швидкодії електричних перетворювачів руху, які виконують функцію перетворення механічних величин — швидкості, кута повороту, положення — у відповідні електричні сигнали.

1.2 Наказ про затвердження теми МКР.

2 Мета і призначення МКР

2.1 Метою роботи є розробка програмно—апаратних засобів для генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху, які забезпечують високу точність вимірювань, стійкість до завад і можливість цифрової обробки даних у реальному часі.

3 Вихідні дані для виконання МКР

3.1 Проведення аналізу існуючих методів та принципів.

3.2 Проведення верифікації та аналізу отриманих результатів.

3.3 Виконання розрахунків для доведення доцільності нової розробки з економічної точки зору.

4 Вимоги до виконання МКР

Робота повинна включати розробку та дослідження системи генерування й обробки сигналів електричних перетворювачів руху, що базується на використанні мікропроцесорної системи. У межах дослідження необхідно обґрунтувати вибір апаратних і програмних засобів, описати принципи

формування, перетворення та фільтрації сигналів, а також провести експериментальну оцінку характеристик розробленої системи.

5 Етапи МКР та очікувані результати

Етапи роботи та очікувані результати приведено в таблиці А.1

Таблиця А.1 — Етапи МКР

№ етапу	Назва етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	кінець	
1	Аналіз існуючих рішень	05.10.2025	11.10.2025	Розділ 1
2	Визначення архітектури системи	12.10.2025	17.10.2025	Розділ 2
3	Розробка алгоритму та функціоналу комп'ютерної системи	18.10.2025	22.10.2025	Розділ 3
4	Тестування системи	23.10.2025	28.10.2025	Розділ 4
4	Підготовка економічної частини	29.10.2025	04.11.2025	Розділ 5
6	Оформлення пояснювальної записки, графічного матеріалу і презентації	05.11.2025	15.11.2025	ПЗ, графічний матеріал і презентація
7	Підготовка і підпис супроводжуючих документів, нормоконтроль та тест на плагіат	01.12.2025	10.12.2025	Оформленні документи

6 Матеріали, що подаються до захисту МКР

До захисту подаються: пояснювальна записка МКР, ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту МКР на кафедрі, відгук наукового керівника, анотації до МКР українською та іноземною мовами, довідка про відповідність оформлення МКР діючим вимогам.

7 Порядок контролю виконання та захисту МКР

Виконання етапів графічної та розрахункової документації МКР контролюється науковим керівником згідно зі встановленими термінами. Захист МКР відбувається на засіданні Екзаменаційної комісії, затвердженої наказом ректора.

8 Вимоги до оформлення та порядок виконання МКР

При оформлюванні МКР використовуються:

— ДСТУ 3008 : 2015 «Звіти в сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання»;

— ДСТУ 8302 : 2015 «Бібліографічні посилання. Загальні положення та правила складання»;

— ГОСТ 2.104—2006 «Єдина система конструкторської документації. Основні написи»;

— «Положення про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти СУЯ ВНТУ—03.02.02—П.001.01:21»

— документами на які посилаються у вище вказаних.

ДОДАТОК Б

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи

Назва роботи: Засоби генерування та опрацювання сигналів електричних перетворювачів руху

Тип роботи: _____ магістерська кваліфікаційна робота _____

Підрозділ: _____ кафедра обчислювальної техніки _____

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism (КПІ) 1 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ✓ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту.

У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку _____ Захарченко С. М. _____

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник _____ Добровольська Н. В.

Здобувач _____ Донський Д. Б.

ДОДАТОК В

Структурна схема системи опрацювання сигналів

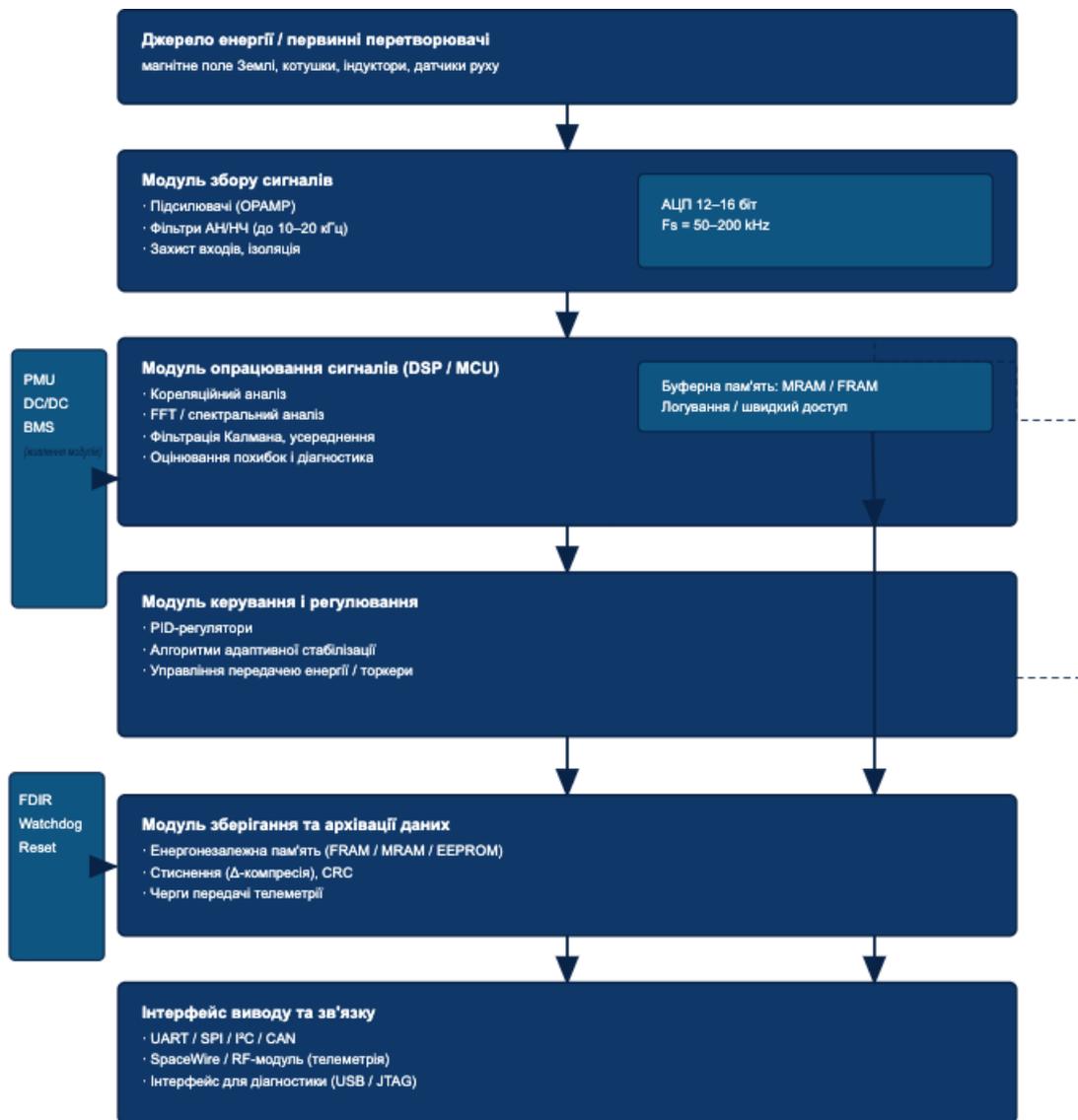


Рисунок В.1 — Структурна схема системи опрацювання сигналів

ДОДАТОК Г

Технічна блок-схема алгоритму роботи системи опрацювання сигналів

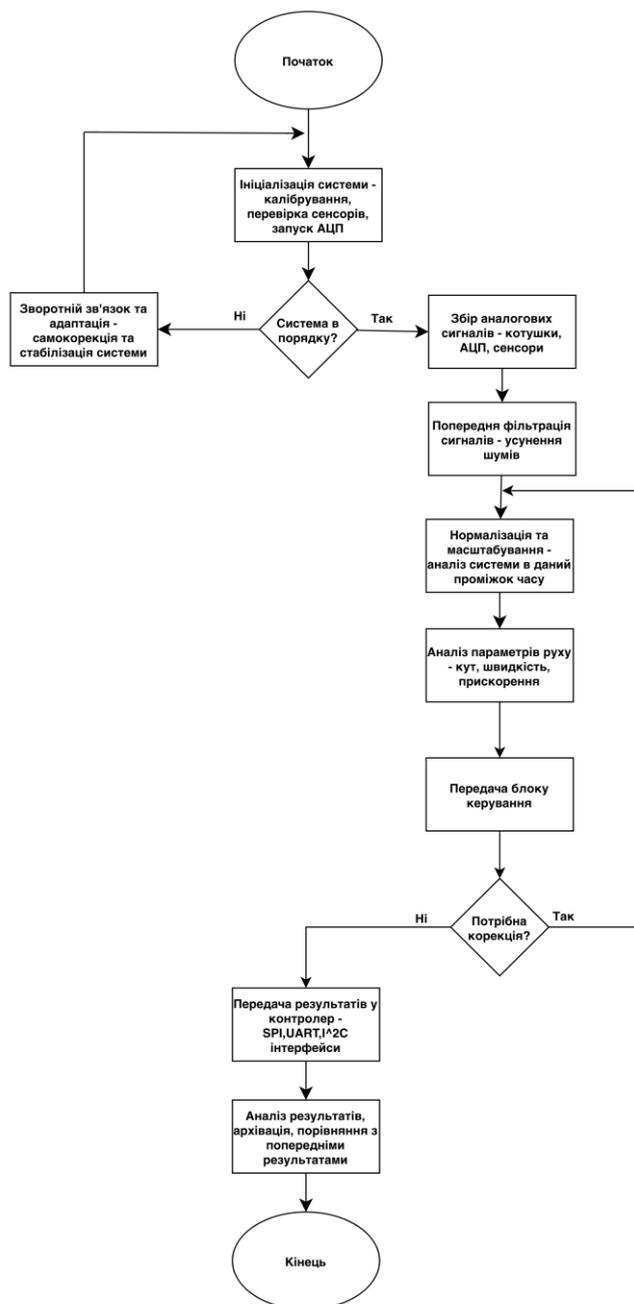


Рисунок Г.1 — Технічна блок-схема алгоритму роботи системи опрацювання сигналів

ДОДАТОК Д

Блок-схема алгоритму аналізу даних

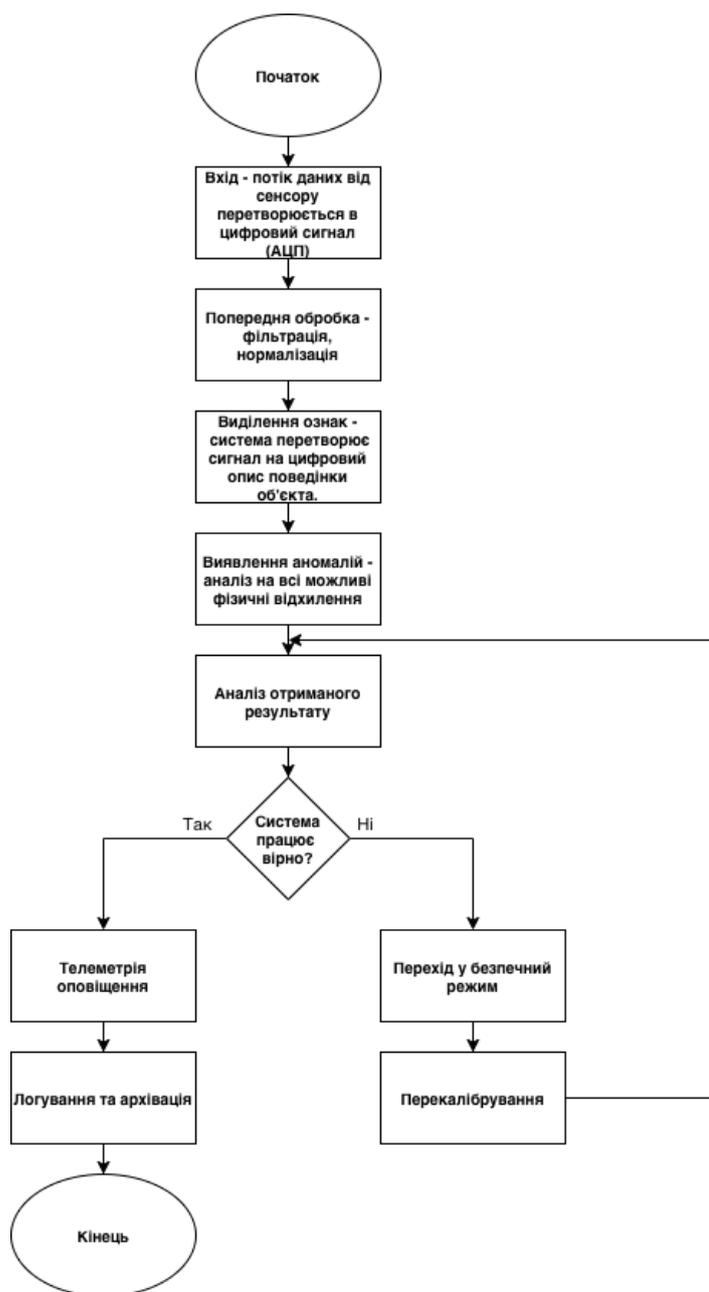


Рисунок Д.1 — Блок-схема алгоритму аналізу даних

ДОДАТОК Е

Лістинг програми

```

import numpy as np from scipy.signal import correlate

class SignalProcessor:

    """ Клас виконує цифрову обробку сигналів нормалізацію, фільтрацію методом
    ковзного середнього, спектральний аналіз, кореляційний аналіз сигналів """
    def __init__(self, window_size: int = 10):
        """
        Ініціалізує обробник сигналу.
        """
        self.window_size = window_size

# -----
#           Н О Р М А Л І З А Ц І Я   С И Г Н А Л У
# -----

def normalize(self, signal: np.ndarray) —> np.ndarray:
    """
    Виконує нормалізацію сигналу до діапазону [—1, 1].
    """
    max_val = np.max(np.abs(signal))
    if max_val == 0:
        return signal
    return signal / max_val

# -----
#           Ф І Л Ь Т Р А Ц І Я
# -----

def moving_average_filter(self, signal: np.ndarray) —> np.ndarray:
    """
    Реалізує фільтр

    Алгоритм:
  
```

```

        filtered[i] = mean(signal[i—window : i])
    """
    kernel = np.ones(self.window_size) / self.window_size
    return np.convolve(signal, kernel, mode='same')

# -----
#
#           Д И С К Р Е Т Н Е   П Е Р Е Т В О Р Е Н Н Я   Ф У Р ' Є (FFT)
# -----
def compute_fft(self, signal: np.ndarray, sampling_rate: float):
    """
    Виконує швидке перетворення Фур'є

    """
    n = len(signal)
    fft_vals = np.fft.fft(signal)
    freqs = np.fft.fftfreq(n, d=1.0 / sampling_rate)

    amplitude = np.abs(fft_vals) / n
    return freqs[:n // 2], amplitude[:n // 2]

# -----
#
#           К О Р Е Л Я Ц І Й Н И Й   А Н А Л І З
# -----
def correlation(self, signal1: np.ndarray, signal2: np.ndarray):
    """
    Виконує кореляційний аналіз двох сигналів.

    """
    corr = correlate(signal1, signal2)
    lag = np.argmax(corr) — len(signal1) + 1
    return corr, lag

# -----
#
#           К О М П Л Е К С Н А   О Б Р О Б К А   С И Г Н А Л У
# -----
def process_signal(self, raw_signal: np.ndarray, sampling_rate: float):
    """

```

Виконує повний цикл обробки сигналу.

```

"""
normalized = self.normalize(raw_signal)
filtered = self.moving_average_filter(normalized)
freqs, spectrum = self.compute_fft(filtered, sampling_rate)

return {
    "normalized_signal": normalized,
    "filtered_signal": filtered,
    "frequency_axis": freqs,
    "spectrum": spectrum
}

```

БЛОК 1: Імпорт необхідних бібліотек та констант

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt from dataclasses
import dataclass from typing import Tuple, List from datetime
import datetime, timedelta import json

```

#Фізичні константи

```

MU_0 = 4 * np.pi * pow(epsilon, -7)
# Магнітна проникність (Гн/м)
R_EARTH = 6371 * pow(epsilon, 3)
# Радіус Землі (м)
M_EARTH = 7.96 * pow(epsilon, 15)
# Магнітний момент Землі (А·м²)
G = 6.674 * pow(epsilon, -11)
# Гравітаційна стала (м³/кг·с²)
M_EARTH_MASS = 5.972 * pow(epsilon, 24)
# Маса Землі (кг)

```

У першому блоці програми імпортуються всі необхідні бібліотеки для математичних розрахунків, візуалізації та зберігання даних. Після цього я задаю основні фізичні константи, які використовуються в розрахунках магнітного поля Землі. Це дозволяє моделювати роботу пристрою та коректно обчислювати кількість енергії, яку він може генерувати.

БЛОК 2: Структури даних для параметрів

```

@dataclass class OrbitalParameters:
    altitude: float
    def get_orbital_velocity(self) —> float:
        r = self.get_orbital_radius()
        return np.sqrt(G * M_EARTH_MASS / r)
@dataclass class SatelliteState:
    position: np.ndarray

```

```
# Позиція [x, y, z] (м)
velocity: np.ndarray
# Швидкість [vx, vy, vz] (м/с)
orientation: np.ndarray
timestamp: datetime
```

У другому блоці коду я створив дві основні структури даних. Перша визначає параметри і дозволяє автоматично обчислювати швидкість. Друга описує стан в будь—який момент часу — його положення, швидкість, орієнтацію і час вимірювання. Разом вони забезпечують основу для моделювання руху та аналізу його поведінки в різних умовах.

БЛОК 3: Модель магнітного поля Землі (диполь)

```
class EarthMagneticField: """ Модель магнітного поля Землі на основі
дипольного наближення. Використовує модель IGRF (International Geomagnetic
Reference Field) спрощену версію. """
```

```
def __init__(self):
```

```
    self.magnetic_moment = M_EARTH
```

```
    self.dipole_tilt = np.radians(11.5)
```

```
    Args:
```

```
        position: Позиція в декартових координатах [x, y, z] #Metr
```

```
    Returns:
```

```
        Вектор магнітного поля [Bx, By, Bz] #Tesla
```

```
    """
```

```
    # Перехід до сферичних координат
```

```
    r = np.linalg.norm(position)
```

```
    if r < R_EARTH:
```

```
        raise ValueError("Позиція всередині Землі!")
```

```
    # Нормалізований вектор позиції
```

```
    r_hat = position / r
```

```
    # Напрямок магнітного диполя (вісь z з нахилом)
```

```
    m_direction = np.array([
        np.sin(self.dipole_tilt), 0, np.cos(self.dipole_tilt)
```

```
    ])

```

```
    # Формула дипольного поля:
```

```
B = (r_hat/4*np.pi) * (1/r3) * [3(m·r)r — m]
```

```
    m_dot_r = np.dot(self.magnetic_moment * m_direction, r_hat)
```

```
B = (MU_0 / (4 * np.pi)) * (1 / r**3) * (
    3 * m_dot_r * r_hat — self.magnetic_moment * m_direction
)
```

```
    return B
```

```
def calculate_field_strength(self, position: np.ndarray) —> float:
```

```
    """Розраховує модуль магнітного поля (Тл)"""
```

```
    B = self.calculate_field_vector(position)
```

```
    return np.linalg.norm(B)
```

```
def calculate_field_line_density(self, position: np.ndarray) —> float:
```

```
    """
```

```
    Розраховує щільність магнітних силових ліній (Вб/м2).
```

```
    Важливо для розрахунку генерації енергії.
```

```
    """
```

```
    return self.calculate_field_strength(position)
```

У третьому блоці я реалізував математичну модель магнітного поля Землі на основі дипольного наближення.

Вона враховує нахил магнітної осі та дозволяє розраховувати як напрямок вектору магнітного поля, так і його силу у будь-якій точці.

Ця модель використовується далі у програмі для оцінки індукованої електрорушійної сили та можливості генерації енергії від магнітного поля Землі.

БЛОК 4: Модель магнітного генератора енергії

```
class MagneticEnergyHarvester: """ Модель системи збору енергії з магнітного поля через індукцію. Використовує принцип електромагнітної індукції (закон Фарадея). """
```

```
def __init__(self, coil_area: float, coil_turns: int, efficiency: float = 0.85):
```

```
    """ Args:
```

```
        coil_area: Площа котушки (м)
```

```
        coil_turns: Кількість витків
```

```
        efficiency: Ефективність перетворення (0—1)
```

```
    """
```

```
    self.coil_area = coil_area
```

```
    self.coil_turns = coil_turns
```

```
    self.efficiency = efficiency
```

```
    self.previous_flux = 0.0
```

```
    self.previous_time = None
```

```
def calculate_magnetic_flux(self, B_field: np.ndarray, normal_vector: np.ndarray) —> float:
```

```
    """
```

```
    Розраховує магнітний потік через котушку.
```

```
     $\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\theta)$ 
```

```
    Args:
```

```
        B_field: Вектор магнітного поля (Тл)
```

```
        normal_vector: Нормаль до площини котушки
```

```
    Returns:
```

```
        Магнітний потік (Вб)
```

```
    """
```

```
    # Кут між полем і нормаллю
```

```
    B_magnitude = np.linalg.norm(B_field)
```

```
    if B_magnitude == 0:
```

```
        return 0.0
```

```
    cos_theta = np.dot(B_field, normal_vector) / B_magnitude
```

```

    flux = B_magnitude * self.coil_area * cos_theta * self.coil_turns
    return flux
def calculate_induced_voltage(self, current_flux: float, dt: float) —> float:
    """
    Розраховує індуквану ЕРС за законом Фарадея.
     $\varepsilon = -N * d\Phi/dt$ 
    Args:
        current_flux: Поточний магнітний потік (Вб)
        dt: Часовий інтервал (с)
    Returns:
        Індукована напруга (В)
    """
    if dt <= 0:
        return 0.0
    dFlux_dt = (current_flux — self.previous_flux) / dt
    voltage = —self.coil_turns * dFlux_dt
    self.previous_flux = current_flux
    return abs(voltage)
def calculate_power_output(self, voltage: float, load_resistance: float) —> float:
    """
    Розраховує потужність на навантаженні.
     $P = V^2 / R * \eta$ 
    Args:
        voltage: Напруга (В)
        load_resistance: Опір навантаження (Ом)
    Returns:
        Потужність (Вт)
    """
    if load_resistance <= 0:
        return 0.0
    power = (voltage ** 2) / load_resistance * self.eta
    return power
def calculate_energy_harvested(self, power: float, dt: float) —> float:
    """
    Розраховує зібрану енергію за період.
     $E = P * t$ 
    Args:
        power: Потужність (Вт)
        dt: Час (с)
    Returns:
        Енергія (Дж)
    """
    return power * dt

```

Четвертий блок моделює роботу індукційного магнітного генератора. Він розраховує магнітний потік, індуквану напругу, потужність і кінцеву зібрану енергію.

Основою є закон Фарадея, який описує появу електричної напруги при зміні магнітного поля.

Завдяки цьому блоку програма може визначати, скільки енергії можна отримувати з магнітного поля Землі або будь-якого іншого джерела.

БЛОК 5: Система стабілізації

```
class AttitudeControlSystem: """ Система управління орієнтацією для оптимізації збору енергії. """
    def __init__(self, moment_of_inertia: np.ndarray): """
        Args:
            moment_of_inertia: Тензор моменту інерції [Ixx, Iyy, Izz] (кг·м²)
            """
            self.I = np.diag(moment_of_inertia)
            self.angular_velocity = np.zeros(3) # [ωx, ωy, ωz] (рад/с)
    def calculate_optimal_orientation(self, B_field: np.ndarray,
                                     velocity: np.ndarray) —> np.ndarray:
        """
        Розраховує оптимальну орієнтацію для максимального збору енергії.
        Котушка повинна бути перпендикулярна до магнітного поля та
        напрямку руху для максимальної зміни потоку.
        Args:
            B_field: Вектор магнітного поля (Тл)
            velocity: Вектор швидкості (м/с)
        Returns:
            Оптимальний вектор нормалі котушки
            """
            # Нормалізація векторів
            B_norm = B_field / np.linalg.norm(B_field) if np.linalg.norm(B_field) > 0 else
            np.zeros(3)
            v_norm = velocity / np.linalg.norm(velocity) if np.linalg.norm(velocity) > 0 else
            np.zeros(3)
            # Оптимальна орієнтація — перпендикулярна до B та v
            optimal_normal = np.cross(B_norm, v_norm)
            if np.linalg.norm(optimal_normal) > 0:
                optimal_normal = optimal_normal / np.linalg.norm(optimal_normal)
            else:
                # Якщо B || v, вибираємо перпендикуляр до B
                optimal_normal = np.cross(B_norm, np.array([1, 0, 0]))
                if np.linalg.norm(optimal_normal) == 0:
                    optimal_normal = np.cross(B_norm, np.array([0, 1, 0]))
                optimal_normal = optimal_normal / np.linalg.norm(optimal_normal)
```

```

    return optimal_normal
def calculate_magnetic_torque(self, magnetic_dipole: np.ndarray,
                              B_field: np.ndarray) —> np.ndarray:
    """
    Розраховує магнітний момент для орієнтації.
     $\tau = m \times B$ 
    Args:
        magnetic_dipole: Магнітний дипольний момент котушок ( $A \cdot m^2$ )
        B_field: Вектор магнітного поля (Тл)
    Returns:
        Вектор моменту сили ( $N \cdot m$ )
    """
    return np.cross(magnetic_dipole, B_field)

```

Цей блок відповідає за те, щоб пристрій правильно орієнтувався у просторі, а саме щоб його магнітні котушки були повернуті таким чином, щоб максимально ефективно збирати енергію. Система використовує природне магнітне поле Землі та керує орієнтацією за допомогою магнітних актуаторів .

БЛОК 6: Симулятор руху

```

class OrbitalSimulator: """ Симулятор руху з розрахунком генерації енергії. """
def __init__(self, orbital_params: OrbitalParameters,
              harvester: MagneticEnergyHarvester,
              attitude_control: AttitudeControlSystem):
    self.orbital_params = orbital_params
    self.harvester = harvester
    self.attitude_control = attitude_control
    self.magnetic_field = EarthMagneticField()

    # Параметри симуляції
    self.load_resistance = 100.0 # Ом
    def initialize_circular_orbit(self, true_anomaly: float = 0.0) —> SatelliteState:
        """
        Ініціалізує пристрій.
        Args:
            true_anomaly: Істинна аномалія (градуси)

        Returns:
            Початковий стан
        """
        r = self.orbital_params.get_orbital_radius()
        v = self.orbital_params.get_orbital_velocity()

        # Конвертація у радіани
        anomaly_rad = np.radians(true_anomaly)
        inclination_rad = np.radians(self.orbital_params.inclination)

```

```

# Позиція на площині
position = np.array([
    r * np.cos(anomaly_rad),
    r * np.sin(anomaly_rad) * np.cos(inclination_rad),
    r * np.sin(anomaly_rad) * np.sin(inclination_rad)
])

# Швидкість (перпендикулярна до радіус—вектора)
velocity = np.array([
    -v * np.sin(anomaly_rad),
    v * np.cos(anomaly_rad) * np.cos(inclination_rad),
    v * np.cos(anomaly_rad) * np.sin(inclination_rad)
])

return SatelliteState(
    position=position,
    velocity=velocity,
    orientation=np.zeros(3),
    timestamp=datetime.now()
)

def simulate_orbit(self, duration: float, time_step: float = 1.0) —> dict:
    """
    Симулює рух та генерацію енергії.

    Args:
        duration: Тривалість симуляції (секунди)
        time_step: Крок часу (секунди)

    Returns:
        Словник з результатами симуляції
    """
    # Ініціалізація
    state = self.initialize_circular_orbit()

    # Масиви для збереження результатів
    num_steps = int(duration / time_step)
    times = np.linspace(0, duration, num_steps)
    positions = np.zeros((num_steps, 3))
    B_fields = np.zeros((num_steps, 3))
    B_magnitudes = np.zeros(num_steps)
    voltages = np.zeros(num_steps)
    powers = np.zeros(num_steps)
    energies = np.zeros(num_steps)

```

```

total_energy = 0.0

for i, t in enumerate(times):
    # Розрахунок магнітного поля
    B_field = self.magnetic_field.calculate_field_vector(state.position)
    B_magnitude = np.linalg.norm(B_field)

    # Оптимальна орієнтація котушки
    optimal_normal = self.attitude_control.calculate_optimal_orientation(
        B_field, state.velocity
    )

    # Розрахунок магнітного потоку
    flux = self.harvester.calculate_magnetic_flux(B_field, optimal_normal)

    # Розрахунок індукованої напруги та потужності
    if i > 0:
        voltage = self.harvester.calculate_induced_voltage(flux, time_step)
        power = self.harvester.calculate_power_output(voltage, self.load_resistance)
        energy = self.harvester.calculate_energy_harvested(power, time_step)
        total_energy += energy
    else:
        voltage = 0.0
        power = 0.0
        energy = 0.0

    # Збереження результатів
    positions[i] = state.position
    B_fields[i] = B_field
    B_magnitudes[i] = B_magnitude
    voltages[i] = voltage
    powers[i] = power
    energies[i] = total_energy

    # Оновлення позиції (спрощена модель )
    angular_velocity_orbit = 2 * np.pi / self.orbital_params.get_orbital_period()
    angle = angular_velocity_orbit * time_step

    # Поворот на малий кут
    cos_a, sin_a = np.cos(angle), np.sin(angle)
    rotation_matrix = np.array([
        [cos_a, -sin_a, 0],
        [sin_a, cos_a, 0],
        [0, 0, 1]
    ])

```

)

```
state.position = rotation_matrix @ state.position
state.velocity = rotation_matrix @ state.velocity
state.timestamp += timedelta(seconds=time_step)
```

```
return {
    'times': times,
    'positions': positions,
    'B_fields': B_fields,
    'B_magnitudes': B_magnitudes,
    'voltages': voltages,
    'powers': powers,
    'energies': energies,
    'total_energy': total_energy,
    'average_power': total_energy / duration
}
```

БЛОК 7: Система моніторингу та телеметрії

class TelemetrySystem: """ Система збору та аналізу телеметричних даних .

```
"""def __init__(self):
    self.data_log = []
```

```
def log_data(self, timestamp: datetime, data: dict):
    """Зберігає телеметричні дані"""
    entry = {
        'timestamp': timestamp.isoformat(),
        **data
    }
    self.data_log.append(entry)
```

```
def export_to_json(self, filename: str):
    """Експортує дані у JSON формат"""
    with open(filename, 'w') as f:
        json.dump(self.data_log, f, indent=2)
```

```
def calculate_statistics(self, results: dict) —> dict:
    """
```

Розраховує статистику роботи системи.

Returns:

Словник зі статистичними показниками
"""

```
powers = results['powers']
voltages = results['voltages']
B_magnitudes = results['B_magnitudes']
```

```

stats = {
    'max_power': np.max(powers),
    'min_power': np.min(powers[powers > 0]),
    'avg_power': np.mean(powers),
    'std_power': np.std(powers),
    'max_voltage': np.max(voltages),
    'avg_voltage': np.mean(voltages),
    'max_B_field': np.max(B_magnitudes),
    'min_B_field': np.min(B_magnitudes),
    'avg_B_field': np.mean(B_magnitudes),
    'total_energy_kWh': results['total_energy'] / 3.6e6,
    'energy_per_orbit_Wh': results['total_energy'] / 3600
}

return stats

```

БЛОК 8: Візуалізація результатів

```

class ResultVisualizer: """ Клас для візуалізації результатів симуляції.
    """
    @staticmethod
    def plot_orbit_3d(positions: np.ndarray):
        """Відображає 3D модель"""
        fig = plt.figure(figsize=(10, 10))
        ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
        ax.plot(positions[:, 0]/1e6, positions[:, 1]/1e6, positions[:, 2]/1e6,
                'b—', linewidth=2)

        # Земля
        u = np.linspace(0, 2 * np.pi, 50)
        v = np.linspace(0, np.pi, 50)
        x = R_EARTH/1e6 * np.outer(np.cos(u), np.sin(v))
        y = R_EARTH/1e6 * np.outer(np.sin(u), np.sin(v))
        z = R_EARTH/1e6 * np.outer(np.ones(np.size(u)), np.cos(v))
        ax.plot_surface(x, y, z, color='cyan', alpha=0.3)

        ax.set_xlabel('X (')
        ax.set_ylabel('Y (')
        ax.set_zlabel('Z (')
        ax.set_title("")
        ax.legend()
        plt.tight_layout()

        return fig

```

```

@staticmethod
def plot_power_generation(times: np.ndarray, powers: np.ndarray,
                          voltages: np.ndarray, energies: np.ndarray):
    """Відображає графіки генерації енергії"""
    fig, axes = plt.subplots(3, 1, figsize=(12, 10))

    # Потужність
    axes[0].plot(times/60, powers, 'r—', linewidth=2)
    axes[0].set_ylabel('Потужність (Вт)')
    axes[0].set_title('Генерація електроенергії')
    axes[0].grid(True, alpha=0.3)

    # Напруга
    axes[1].plot(times/60, voltages, 'g—', linewidth=2)
    axes[1].set_ylabel('Напруга (В)')
    axes[1].set_title('Індукована ЕРС')
    axes[1].grid(True, alpha=0.3)

    # Накопичена енергія
    axes[2].plot(times/60, energies/3600, 'b—', linewidth=2)
    axes[2].set_xlabel('Час (хвилини)')
    axes[2].set_ylabel('Енергія (Вт·год)')
    axes[2].set_title('Накопичена енергія')
    axes[2].grid(True, alpha=0.3)

    plt.tight_layout()
    return fig

@staticmethod
def plot_magnetic_field(times: np.ndarray, B_magnitudes: np.ndarray):
    """Відображає зміну магнітного поля """
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 5))

    ax.plot(times/60, B_magnitudes * 1e6, 'm—', linewidth=2)
    ax.set_xlabel('Час (хвилини)')
    ax.set_ylabel('Магнітне поле (мкТл)')
    ax.set_title('Інтенсивність магнітного поля Землі')
    ax.grid(True, alpha=0.3)

    plt.tight_layout()
    return fig

```

БЛОК 9: Головна демонстраційна програма

```

def main(): """ Головна функція для демонстрації роботи системи. """
print("="*80)
print("СИСТЕМА МАГНІТНОГО ГЕНЕРАТОРА ЕНЕРГІЇ")
print("="*80)
print()

# _____
# Конфігурація системи
# _____
print(" Конфігурація системи...")

print()

# Параметри магнітного генератора
harvester = MagneticEnergyHarvester(
    coil_area=10.0, # 10 м2 площа котушки
    coil_turns=10000, # 10000 витків
    efficiency=0.85 # 85% ефективність
)

print(f" Параметри генератора:")
print(f" Площа котушки: {harvester.coil_area} м2")
print(f" Кількість витків: {harvester.coil_turns}")
print(f" Ефективність: {harvester.efficiency*100}%")
print()

# Система орієнтації
moment_of_inertia = np.array([100, 150, 200]) # кг·м2
attitude_control = AttitudeControlSystem(moment_of_inertia)

# _____
# Запуск симуляції
# _____
print(" Запуск симуляції...")
simulator = OrbitalSimulator(orbital_params, harvester, attitude_control)

# Симуляція одного періоду
simulation_time = orbital_params.get_orbital_period()
time_step = 10.0 # 10 секунд

results = simulator.simulate_orbit(simulation_time, time_step)

print(f" Симуляція завершена ({simulation_time/60:.2f} хв)")
print()

```

```

# -----
# Аналіз результатів
# -----
print(" Результати симуляції:")
print("—" * 80)

telemetry = TelemetrySystem()
stats = telemetry.calculate_statistics(results)

print(f" Максимальна потужність: {stats['max_power']:.3f} Вт")
print(f" Середня потужність: {stats['avg_power']:.3f} Вт")
print(f" Максимальна напруга: {stats['max_voltage']:.3f} В")
print(f" Середня напруга: {stats['avg_voltage']:.3f} В")
print()
print(f" Загальна енергія : {stats['energy_per_orbit_Wh']:.3f} Вт·год")
print(f" Енергія за добу: {stats['energy_per_orbit_Wh']*16:.2f} Вт·год")
print()
print(f" Магнітне поле (макс): {stats['max_B_field']*1e6:.2f} мкТл")
print(f" Магнітне поле (мін): {stats['min_B_field']*1e6:.2f} мкТл")
print(f" Магнітне поле (сеп): {stats['avg_B_field']*1e6:.2f} мкТл")

print()
print("="*80)

# -----
# Візуалізація
# -----
print("\n Генерація графіків...")

visualizer = ResultVisualizer()

# 3D модель
fig1 = visualizer.plot_orbit_3d(results['positions'])

# Графіки енергії
fig2 = visualizer.plot_power_generation(
    results['times'],
    results['powers'],
    results['voltages'],
    results['energies']
)

# Магнітне поле
fig3 = visualizer.plot_magnetic_field(

```

```

    results['times'],
    results['B_magnitudes']
)

plt.show()

print(" Графіки створено")
print("\n Програма завершена успішно!")

import numpy as np import matplotlib.pyplot as plt from matplotlib.animation import
FuncAnimation from dataclasses import dataclass
@dataclass class OrbitalParameters: """Параметри положення""" altitude: float #
inclination: float # нахил та положення (градуси) period: float = 0 # період
системної роботи (секунди) velocity: float = 0 # швидкість на даний момент
(м/с)
def __post_init__(self):
    R_earth = 6371e3 # радіус Землі (м)
    G = 6.674e-11 # гравітаційна стала
    M_earth = 5.972e24 # маса Землі (кг)

    r = R_earth + self.altitude * 1000 # радіус оптимального простору
    self.velocity = np.sqrt(G * M_earth / r)
    self.period = 2 * np.pi * r / self.velocity

@dataclass class TetherParameters: """Параметри електродинамічного тросу"""
length: float # довжина (м) diameter: float # діаметр (мм) conductivity: float #
провідність (S/m, Сименс на метр)
@property
def cross_section(self):
    """Площа поперечного перерізу (м²)"""
    return np.pi * (self.diameter / 2000) ** 2

@property
def resistance(self):
    """Опір тросу (Ом)"""
    return self.length / (self.conductivity * self.cross_section)

def __init__(self, orbit: OrbitalParameters, tether: TetherParameters):
    self.orbit = orbit
    self.tether = tether
    self.mu0 = 4 * np.pi * 1e-7 # магнітна проникність вакууму

def earth_magnetic_field(self, altitude_km, latitude_deg):
    """

```

Обчислення магнітного поля Землі (спрощена дипольна модель)

$$B = (\mu_0 * M) / (4\pi * r^3) * \sqrt{(1 + 3\sin^2\lambda)}$$

де M — магнітний момент Землі

r — відстань від центру Землі

λ — магнітна широта

"""

$M_earth = 7.9e22$ # магнітний момент Землі ($A \cdot m^2$)

$R_earth = 6371e3$ # радіус Землі (м)

$r = R_earth + altitude_km * 1000$

$lat_rad = np.radians(latitude_deg)$

Компонента магнітного поля (Тесла)

$B = (self.mu0 * M_earth) / (4 * np.pi * r^{**3}) * np.sqrt(1 + 3 * np.sin(lat_rad)**2)$

return B

def induced_emf(self, B_field):

"""

Індукована ЕРС за законом Фарадея

$$\varepsilon = B * v * L$$

де B — магнітне поле

v — швидкість руху

L — довжина провідника

"""

$emf = B_field * self.orbit.velocity * self.tether.length$

return emf

def generated_power(self, emf, load_resistance):

"""

Потужність, що генерується

$$P = \varepsilon^2 * R_load / (R_tether + R_load)^2$$

"""

$R_total = self.tether.resistance + load_resistance$

$current = emf / R_total$

$power = current^{**2} * load_resistance$

return power, current

def simulate_orbit(self, duration_orbits=1, time_steps=1000):

```

"""Симуляція генерації енергії протягом вибраного проміжку часу"""

t = np.linspace(0, self.orbit.period * duration_orbits, time_steps)

# Моделювання зміни широти під час роботи
latitudes = self.orbit.inclination * np.sin(2 * np.pi * t / self.orbit.period)

# Масиви для збереження даних
B_fields = np.zeros(time_steps)
emfs = np.zeros(time_steps)
powers = np.zeros(time_steps)
currents = np.zeros(time_steps)

load_resistance = 10 # Опір навантаження (Ом)

for i, lat in enumerate(latitudes):
    B_fields[i] = self.earth_magnetic_field(self.orbit.altitude, lat)
    emfs[i] = self.induced_emf(B_fields[i])
    powers[i], currents[i] = self.generated_power(emfs[i], load_resistance)

return {
    'time': t / 60, # конвертація в хвилини
    'latitude': latitudes,
    'magnetic_field': B_fields * 1e6, # конвертація в мікроТесла
    'emf': emfs,
    'power': powers,
    'current': currents,
    'energy_total': np.trapz(powers, t) / 3600 # Вт·год
}

def plot_results(self, results):
    """Візуалізація результатів симуляції"""

    fig, axes = plt.subplots(2, 2, figsize=(14, 10))
    fig.suptitle('Симуляція електродинамічного генератора',
                fontsize=16, fontweight='bold')

    # Графік 1: Магнітне поле
    axes[0, 0].plot(results['time'], results['magnetic_field'],
                    'b—', linewidth=2)
    axes[0, 0].set_xlabel('Час (хвилини)')
    axes[0, 0].set_ylabel('Магнітне поле (μТ)')
    axes[0, 0].set_title('Інтенсивність магнітного поля Землі')
    axes[0, 0].grid(True, alpha=0.3)

```

```

# Графік 2: Індукована ЕРС
axes[0, 1].plot(results['time'], results['emf'],
               'r—', linewidth=2)
axes[0, 1].set_xlabel('Час (хвилини)')
axes[0, 1].set_ylabel('ЕРС (В)')
axes[0, 1].set_title('Індукована електрорушійна сила')
axes[0, 1].grid(True, alpha=0.3)

# Графік 3: Потужність
axes[1, 0].plot(results['time'], results['power'],
               'g—', linewidth=2)
axes[1, 0].set_xlabel('Час (хвилини)')
axes[1, 0].set_ylabel('Потужність (Вт)')
axes[1, 0].set_title('Генерована потужність')
axes[1, 0].grid(True, alpha=0.3)

# Графік 4: Струм
axes[1, 1].plot(results['time'], results['current'],
               'm—', linewidth=2)
axes[1, 1].set_xlabel('Час (хвилини)')
axes[1, 1].set_ylabel('Струм (А)')
axes[1, 1].set_title('Генерований струм')
axes[1, 1].grid(True, alpha=0.3)

plt.tight_layout()

# Виведення статистики
print("\n" + "="*60)
print("РЕЗУЛЬТАТИ СИМУЛЯЦІЇ")
print("="*60)
print(f"\nПараметри на початок симуляції:")
print(f" • Висота: {self.orbit.altitude} км")
print(f" • Нахил: {self.orbit.inclination} °")
print(f" • Швидкість: {self.orbit.velocity:.2f} м/с")
print(f" • Період: {self.orbit.period/60:.2f} хв")

print(f"\nПараметри тросу:")
print(f" • Довжина: {self.tether.length} м")
print(f" • Діаметр: {self.tether.diameter} мм")
print(f" • Опір: {self.tether.resistance:.4f} Ом")

print(f"\nРезультати генерації:")
print(f" • Середнє магнітне поле: {np.mean(results['magnetic_field']):.2f} μТ")
print(f" • Середня ЕРС: {np.mean(results['emf']):.2f} В")
print(f" • Середня потужність: {np.mean(results['power']):.2f} Вт")

```

```
print(f" • Максимальна потужність: {np.max(results['power']):.2f} Вт")
print(f" • Загальна енергія за симуляцію: {results['energy_total']:.2f} Вт·год")
print("—" * 60 + "\n")
```

```
return fig
```

3.7 ПРИКЛАД ВИКОРИСТАННЯ

```
if name == "main": # Визначення параметрів положення orbit =
OrbitalParameters( altitude=400, # стартове значення inclination=51.6 # нахил
початкового положення)
# Визначення параметрів тросу
# Використовуємо алюмінієвий трос (провідність 3.5e7 S/m)
tether = TetherParameters(
    length=1000, # 1 км довжина тросу
    diameter=2.0, # 2 мм діаметр
    conductivity=3.5e7 # алюміній
)

# Створення генератора
generator = SpaceEnergyGenerator(orbit, tether)

# Симуляція одного робочого періоду
results = generator.simulate_orbit(duration_orbits=1, time_steps=1000)

# Візуалізація
fig = generator.plot_results(results)
plt.show()

# Додаткові розрахунки для передачі енергії
print("\nАНАЛІЗ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ:")
print("—" * 60)

# Розрахунок ефективності для різних опорів навантаження
R_loads = np.logspace(0, 3, 50) # від 1 до 1000 Ом
efficiencies = []

avg_B = np.mean(results['magnetic_field']) * 1e-6 # назад в Тесла
avg_emf = generator.induced_emf(avg_B)

for R_load in R_loads:
    P_generated, _ = generator.generated_power(avg_emf, R_load)
    P_max_theoretical = avg_emf**2 / (4 * generator.tether.resistance)
    efficiency = (P_generated / P_max_theoretical) * 100
    efficiencies.append(efficiency)
```

```
# Знаходження оптимального опору
optimal_idx = np.argmax(efficiencies)
optimal_R = R_loads[optimal_idx]

print(f'Оптимальний опір навантаження: {optimal_R:.2f} Ом")
print(f'Максимальна ефективність: {efficiencies[optimal_idx]:.2f}%")

# Графік ефективності
fig2, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
ax.semilogx(R_loads, efficiencies, 'b—', linewidth=2)
ax.axvline(optimal_R, color='r', linestyle='——',
            label=f'Оптимум: {optimal_R:.1f} Ω')
ax.set_xlabel('Опір навантаження (Ом)', fontsize=12)
ax.set_ylabel('Ефективність передачі (%)', fontsize=12)
ax.set_title('Ефективність передачі енергії vs Опір навантаження',
             fontsize=14, fontweight='bold')
ax.grid(True, alpha=0.3)
ax.legend(fontsize=11)
plt.tight_layout()
plt.show()
```