

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра електромеханіки

«До захисту допущено»

в. о. Завідувач кафедри

М. А. Коваленко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електричні машини і апарати»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: **Розробка безконтактних двигунів тороїдальної та конічної
конструкції. Програмне забезпечення для керування двигунами**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕМ-21

Маркевич Євгеній Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник: д.р.ф., ст. викладач кф. електромеханіки, Ігнатюк Є. С.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент: доц. кафедри АЕМС-ЕП. к.т.н., доц., Пушкар М. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 р.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра електромеханіки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма – «Електричні машини і апарати»

ЗАТВЕРДЖУЮ

в. о. Завідувач кафедри

_____ М. А. Коваленко

(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Маркевичу Євгенію Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **Розробка безконтактних двигунів тороїдальної та конічної конструкції. Програмне забезпечення для керування двигунами**

керівник роботи _____ Ігнатюк Євген Станіславович, ст. викладач _____ ,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «25» Травня 2026 р. № 1885-с

2. Термін подання студентом роботи: 08.06.2026

3. Вихідні дані до роботи: безконтактний двигун постійного струму аксіальної (тороїдної) конструкції з беззалізним статором та двома дисковими роторами; напруга живлення $U_{\text{ж}} = 24 \text{ В}$; число фаз $m = 3$ (з'єднання — зірка); номінальна

частота обертання $n = 2000$ об/хв; число котушок статора $N_s = 9$; число полюсів $2p = 12$; постійні магніти NdFeB марки N38; бездатчикова (sensorless) комутація; широтно-імпульсне керування з частотою 16 кГц.

4. Зміст роботи: вступ; аналітичний огляд безконтактних двигунів тороїдної (аксіальної) конструкції та методів їх керування; електромагнітний розрахунок двигуна тороїдної конструкції; розробка апаратної частини системи керування; експериментальні дослідження; висновки.

5. Перелік графічного матеріалу: презентація за матеріалами дипломної роботи та доповідь.

6. Дата видачі завдання: 1 жовтня

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів	Примітка
1	Аналітичний огляд БДПС тороїдної (аксіальної) конструкції та методів їх керування	10.01.2026	Виконано
2	Електромагнітний розрахунок двигуна тороїдної конструкції	20.03.2026	Виконано
3	Розробка апаратної частини системи керування	30.04.2026	Виконано
4	Експериментальні дослідження двигуна на стенді	15.05.2026	Виконано
5	Порівняння розрахункових та експериментальних даних, аналіз результатів	25.05.2026	Виконано
6	Оформлення дипломної роботи та презентації	06.06.2026	Виконано

Студент

(підпис)

Маркевич Є. В.

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Ігнатюк Є. С.

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: ___ сторінок, ___ рисунків, ___ таблиць, ___ джерел.

Об'єкт дослідження — двигуни постійного струму тороїдальної та конічної конструкцій, розроблені на кафедрі електромеханіки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Мета роботи — дослідження особливостей роботи двигунів постійного струму тороїдальної та конічної конструкцій і розроблення програмного забезпечення для їх керування з використанням мікроконтролерного модуля та мобільного терміналу оператора.

У роботі виконано аналіз методів моніторингу та керування безконтактними двигунами постійного струму нестандартних конструкцій, зокрема аналізу спектру струму статора (MCSA), теплового контролю та контролю пускових режимів [3, 6, 7]. Обґрунтовано вибір контрольованих параметрів. Виконано розрахунок номінальних та граничних значень параметрів моніторингу з урахуванням класу нагрівостійкості ізоляції обмоток. Розроблено структуру системи керування, що складається з мікроконтролерного модуля збору та первинної обробки сигналів і мобільного терміналу оператора, з'єднаних бездротовим каналом Bluetooth Low Energy. Проведено експериментальні дослідження пускових і усталених режимів роботи двигунів обох конструкцій на лабораторному стенді.

Розроблений апаратно-програмний комплекс є універсальною платформою, що в рамках даної роботи використана як засіб керування та моніторингу, проте здатна слугувати основою для побудови систем автоматичного регулювання, координованої комутації двигунів, активного захисту та віддаленого моніторингу електромеханічних установок.

Ключові слова: безконтактний двигун постійного струму, BLDC, тороїдальна конструкція, конічна конструкція, програмне забезпечення, керування, ESP32-S3, Flutter, Bluetooth Low Energy, мікроконтролер.

ABSTRACT

Thesis: ____ pages, ____ figures, ____ tables, ____ references.

The subject of the study — is DC motors of toroidal and conical designs, developed at the Department of Electromechanics, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

The aim of the thesis — is to investigate the operational characteristics of DC motors of toroidal and conical designs and to develop software for their control using a microcontroller module and a mobile operator terminal.

The work analyses methods for monitoring and controlling non-contact DC motors of non-standard designs, in particular the analysis of the stator current spectrum (MCSA), thermal monitoring and control of starting modes [3, 6, 7]. The selection of controlled parameters is justified. Calculations of the nominal and limit values of monitoring parameters have been performed, taking into account the heat resistance class of the winding insulation. A control system architecture has been developed, consisting of a microcontroller module for signal acquisition and primary processing and a mobile operator terminal, connected via a Bluetooth Low Energy wireless channel. Experimental studies of the starting and steady-state operating modes of motors of both designs have been carried out on a laboratory test bench.

The hardware and software system developed is a universal platform which, within the scope of this work, has been used as a means of control and monitoring; however, it is capable of serving as a basis for the development of systems for automatic control, coordinated motor switching, active protection and remote monitoring of electromechanical installations.

Keywords: brushless DC motor, BLDC, toroidal design, conical design, software, control, ESP32-S3, Flutter, Bluetooth Low Energy, microcontroller.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
ABSTRACT	6
ЗМІСТ	7
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БЕЗКОНТАКТНИХ ДВИГУНІВ.....	13
1.1. Безконтактний двигун постійного струму як об'єкт технічного моніторингу.....	13
1.2. Особливості конструкції двигунів аксіальної та конічної конструкцій ...	14
1.3. Класифікація методів неруйнівного контролю технічного стану	18
1.4. Аналіз спектру струму статора (MCSA) як метод контролю	20
1.5. Тепловий контроль обмоток та клас нагрівостійкості ізоляції	21
1.6. Контроль пускових режимів	22
1.7. Постановка задач дослідження	23
Висновки до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2 ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МОНІТОРИНГУ ДОСЛІДЖУВАНИХ ДВИГУНІВ.....	25
2.1. Електромагнітний розрахунок безконтактного двигуна тороїдальної конструкції	25
2.2. Електромагнітний розрахунок безконтактного двигуна конічної конструкції	28
2.3. Порівняльний аналіз номінальних та розрахункових характеристик об'єктів дослідження	30

2.4. Обґрунтування вибору контрольованих параметрів системи моніторингу	31
2.5. Розрахунок граничних теплових режимів з урахуванням класу ізоляції. 31	
2.6. Розрахунок порогових значень струмового захисту і пускових кратностей	33
2.7. Розрахунок інтервалів вимірювання та обробки сигналів.....	34
2.8. Розрахунок похибки каналів вимірювання.....	34
Висновки до розділу 2	35
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ	
МОНІТОРИНГУ	36
3.1. Структурна схема системи моніторингу	36
3.2. Модуль збору та первинної обробки сигналів	37
3.3. Канали вимірювання струму, напруги, температури і частоти обертання	39
3.4. Бездротовий канал передачі даних	40
3.5. Мобільний термінал оператора.....	42
3.6. Алгоритм автоматичного формування висновку моніторингу	53
3.7. Реалізація журналу подій та збереження історії вимірювань.....	59
3.8. Універсальність розробленої апаратно-програмної платформи	60
Висновки до розділу 3	60
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА	
РОБОТИ СИСТЕМИ.....	62
4.1. Опис лабораторного стенду та методики випробувань	62
4.2. Дослідження пускових режимів двигуна тороїдальної конструкції.....	64
4.3. Дослідження пускових режимів двигуна конічної конструкції	66
4.4. Аналіз температурного режиму під навантаженням	67

4.5. Порівняльний аналіз показників моніторингу двох конструкцій	68
4.6. Порівняльний аналіз показників моніторингу двох конструкцій	70
4.7. Оцінка ефективності розробленої системи керування	71
Висновки до розділу 4	72
ВИСНОВКИ	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БДПС	— безконтактний двигун постійного струму
BLDC	— Brushless Direct Current (motor)
BLE	— Bluetooth Low Energy
ДПФ	— дискретне перетворення Фур'є
ЕРС	— електрорушійна сила
ESC	— Electronic Speed Controller
GATT	— Generic Attribute Profile
GPIO	— General Purpose Input/Output
I²C	— Inter-Integrated Circuit
IEC	— International Electrotechnical Commission
MCSA	— Motor Current Signature Analysis
МК	— мікроконтролер
NTC	— Negative Temperature Coefficient
ПЗ	— програмне забезпечення
АЦП	— аналого-цифровий перетворювач
ШИМ	— широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Електричні машини нестандартних конструкцій — тороїдальної (аксіальної) та конічної — набувають усе ширшого поширення в сучасних системах автоматики, робототехніці, транспортних і медичних застосуваннях. Їх конструктивні переваги — компактність, висока питома потужність, простота виготовлення методами 3D-друку [18] — роблять їх привабливими об'єктами для лабораторних досліджень і дослідно-конструкторських розробок.

Водночас нестандартна геометрія магнітного ланцюга і відсутність вбудованих датчиків положення ротора ускладнюють розробку систем керування і знижують спостережуваність технічного стану машини в процесі роботи. Це обумовлює актуальність дослідження режимних особливостей двигунів тороїдальної та конічної конструкцій і розроблення відповідного програмного забезпечення для їх керування.

Метою дипломної роботи є дослідження особливостей роботи безконтактних двигунів постійного струму тороїдальної та конічної конструкцій і розроблення програмного забезпечення для їх автоматизованого керування з використанням вбудованого мікроконтролерного модуля і мобільного терміналу оператора.

Для досягнення мети вирішуються такі задачі: аналіз конструктивних особливостей та режимів роботи двигунів тороїдальної та конічної конструкцій; вибір і розрахунок контрольованих параметрів та порогів захисту; розробка апаратної і програмної частин системи керування; проведення експериментальних досліджень пускових та усталених режимів на лабораторному стенді.

Об'єкт дослідження — безконтактні двигуни постійного струму тороїдальної та конічної конструкцій. Предмет дослідження — режими роботи, параметри моніторингу та програмне забезпечення для керування цими двигунами.

Методи дослідження: аналіз спектру струму статора (MCSA), тепловий моніторинг, контроль пускових режимів, реалізація вбудованого програмного забезпечення мікроконтролера та мобільного застосунку.

Практична цінність роботи полягає у реалізованому апаратно-програмному комплексі для дослідження і керування двигунами нестандартних конструкцій, придатному для подальшого використання у лабораторній практиці кафедри електромеханіки КПІ.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БЕЗКОНТАКТНИХ ДВИГУНІВ

1.1. Безконтактний двигун постійного струму як об'єкт технічного моніторингу

Безконтактні двигуни постійного струму (БДПС), відомі також під міжнародною аббревіатурою BLDC (Brushless Direct Current), є важливим класом електричних машин [1], що знайшли широке застосування в промисловій автоматизації, транспортних системах, медичному обладнанні та відновлювальній енергетиці. На відміну від колекторних двигунів, у БДПС механічні щітки замінені електронним комутатором на базі силових напівпровідникових ключів, що суттєво підвищує надійність, ресурс та ефективність перетворення електричної енергії.

Принцип дії БДПС ґрунтується на взаємодії обертового магнітного поля статора, що формується послідовною комутацією фазних обмоток, з полем ротора, утвореним постійними магнітами. Оскільки ротор БДПС не містить обмоток та колекторно-щіткового вузла, основними механізмами відмов є: деградація магнітних властивостей постійних магнітів ротора, теплове старіння ізоляції фазних обмоток статора, механічний знос підшипників, а також порушення роботи системи керування та силової електроніки.

З точки зору моніторингу технічного стану БДПС є складним електромеханічним об'єктом, у якому одночасно протікають електромагнітні, теплові та механічні процеси, тісно взаємопов'язані між собою. Зміна будь-якого з режимних параметрів — струму споживання, напруги живлення, температури обмоток, частоти обертання — несе інформацію про поточний технічний стан машини. Це обумовлює актуальність побудови систем безперервного параметричного моніторингу, здатних у реальному часі відстежувати ключові контрольовані параметри і формувати попереджувальні сигнали при виході їх за встановлені межі.

Важливою особливістю БДПС як об'єкта моніторингу є відсутність або мінімальна кількість вбудованих давачів у бюджетних і прототипних конструкціях. Обидва двигуни, що досліджуються в даній роботі, є безсенсорними відносно положення ротора (без давачів Холла), а двигун тороїдальної конструкції додатково оснащений лише одним давачем температури NTC безпосередньо в обмотці статора. Це визначає вимогу розробки компактних зовнішніх засобів збору вимірювальних даних на базі широко доступних вимірювальних модулів.

Враховуючи сферу застосування досліджуваних двигунів — лабораторний стенд і потенційне впровадження у мобільні або малогабаритні установки — система керування повинна бути компактною, автономною, здатною до бездротової передачі даних і придатною до роботи в польових умовах без стаціонарного робочого місця оператора.

1.2. Особливості конструкції двигунів аксіальної та конічної конструкцій

Тороїдальна та конічна конструкції є різновидами БДПС з нетрадиційною геометрією магнітного ланцюга, що відрізняє їх від класичних радіальних машин і накладає специфічні особливості на процеси моніторингу технічного стану та керування.

Двигун тороїдальної (аксіальної) конструкції (рис. 1.1), є дисковим БДПС з аксіальним [16] напрямком магнітного потоку. Ротор містить 24 постійних магніти NdFeB N38 розмірами $30 \times 5 \times 10$ мм, розташованих по 2 на кожний із 12 магнітних полюсів (6 пар полюсів), у конфігурації стекування для підвищення щільності магнітної індукції. Статор налічує 6 котушок, намотаних дротом діаметром 0,5 мм (по 8 м на котушку), з'єднаних у трифазну систему. Активна довжина — 85 мм при зовнішньому діаметрі 140 мм і внутрішньому 67 мм, величина повітряного зазору — 1 мм. Номінальні електричні параметри: 24 В, 250 Вт, номінальна частота обертання 2400 об/хв (максимальна — 3400 об/хв). Опір фази — 1,07 Ом. Клас нагрівостійкості ізоляції — В (130 °C). Корпус

виготовлений із PETG-пластику [19]. Попередньо визначений ККД — близько 63,7%.

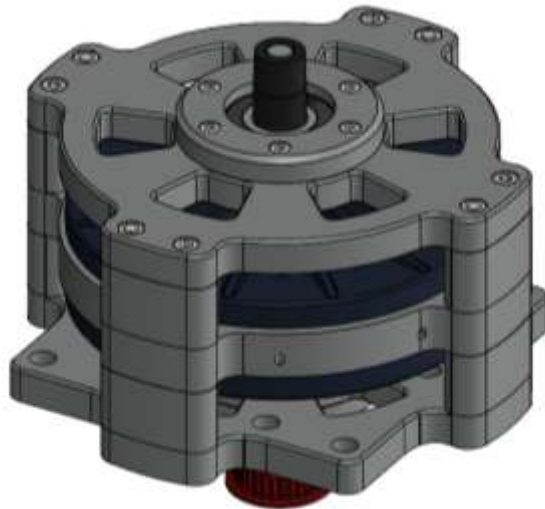


Рисунок 1.1 — Конструкція тороїдного двигуна

З точки зору моніторингу технічного стану тороїдальна конструкція характеризується підвищеною чутливістю теплового режиму до умов охолодження: дискова геометрія і PETG-корпус обмежують природну конвекцію, тому температура обмотки є критично важливим контрольованим параметром. Відсутність датчиків Холла вимагає застосування зовнішнього датчика частоти обертання. Пусковий струм досягає 15 А при номінальному робочому струмі 10–15 А, що вказує на незначний пусковий коефіцієнт і виправдовує безпосереднє вимірювання струму як основного режимного параметра.

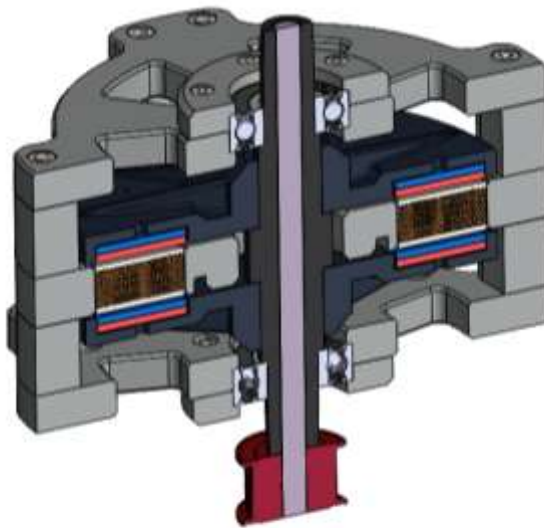


Рисунок 1.2 — Конструкція тороїдного двигуна в розрізі

Двигун конічної конструкції (рис. 1.3), відрізняється конічною формою активної зони: зовнішній діаметр — 120 мм при внутрішньому 110,20/124,62 мм (конічний перетин), кут конуса — 16° . Статор містить 18 зубців із 60 витками дроту 0,5 мм на кожному. Ротор несе 12 магнітів NdFeB N38 розмірами $50 \times 10 \times 5$ мм (6 пар полюсів). Номінальні параметри: 24 В, 50 Вт, 2000 об/хв (максимальна — 3000 об/хв). Опір фази при 20°C — 4,74 Ом (при 80°C — 5,88 Ом). Клас ізоляції — В. Виміряний ККД — 57,7 %.

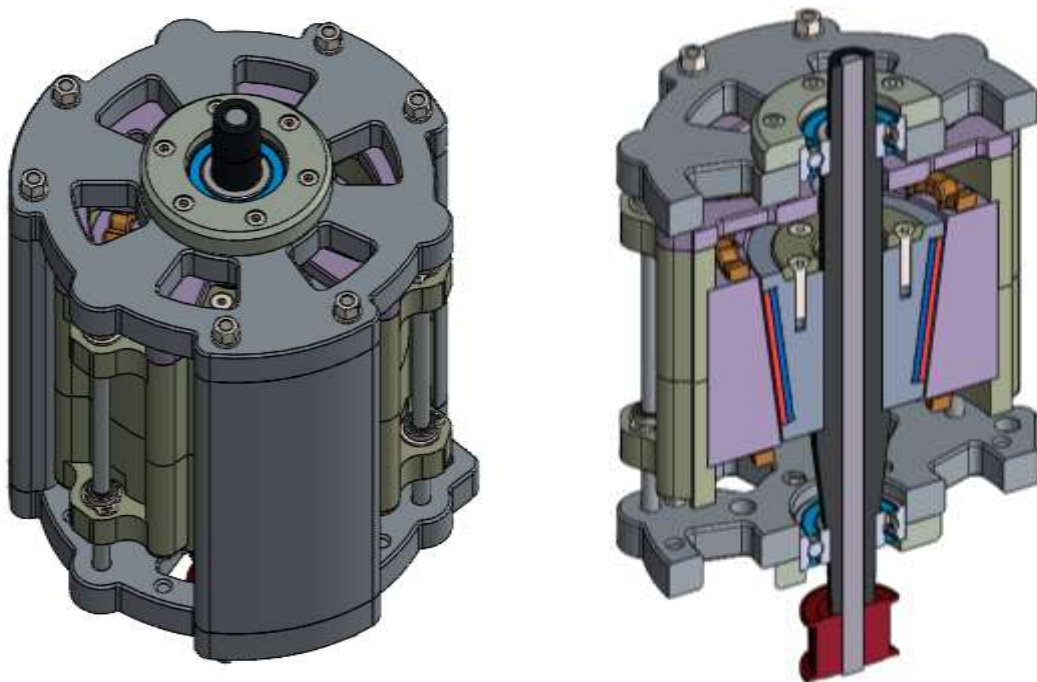


Рисунок 1.3 — Конструкція конічного двигуна

Конічна конструкція з її значно меншою потужністю (50 Вт проти 250 Вт) і вищим опором фази (4,74 Ом проти 1,07 Ом) забезпечує суттєво менший робочий струм — 2 А номінально проти 10–15 А. Це змінює вимоги до вимірювання: необхідна вища точність АЦП і менший діапазон вимірювання по струму. Пусковий коефіцієнт — 1,25 (м'який пуск). Відсутність будь-яких давачів положення і температури в конічному двигуні робить зовнішній вимірювальний комплекс єдиним засобом контролю його стану.

Порівняльна характеристика обох двигунів як об'єктів дослідження та керування наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 — Порівняльна характеристика двигунів тороїдальної та конічної конструкцій

Параметр	Тороїдна машина	Конічна машина
Тип двигуна	БДПС, 3 фази	БДПС, 3 фази
Матеріал корпусу / магнітів	PETG / NdFeB N38	PETG / NdFeB N38
Кількість пар полюсів	6 (24 магніти по 2 стеком)	6 (12 магнітів)
Напруга живлення, В	24	24
Номінальний струм, А	10–15	2
Пусковий струм, А	15	2,5
Номінальна потужність, Вт	250	50
Ном. частота обертання, об/хв	2400	2000
Макс. частота обертання, об/хв	3400	3000
Опір фази при 20 °С, Ом	1,07	4,74
Клас нагрівостійкості ізоляції	В (130 °С)	В (130 °С)
ККД, %	63,7	57,7

Параметр	Тороїдна машина	Конічна машина
Давач температури	NTC 10 кОм в обмотці статора	Зовнішній NTC на корпусі
Давачі положення ротора	Відсутні	Відсутні
Роль у стенді	Привід	Генераторне навантаження

Розміщення обох двигунів на стенді у конфігурації «привід — генераторне навантаження» дозволяє проводити комплексні випробування в режимі динамічного навантаження з одночасним знімом параметрів керування з обох машин через єдиний вимірювальний канал.

1.3. Класифікація методів неруйнівного контролю технічного стану

Методи контролю технічного стану електричних машин поділяються на дві основні категорії: руйнівні (випробування до відмови) та неруйнівні (контроль у процесі нормальної експлуатації). У промислових умовах переважно застосовується неруйнівний контроль як єдиний практично прийнятний підхід, що не вимагає виведення машини з роботи.

Неруйнівні методи класифікуються за фізичним принципом виявлення несправностей на три основні групи: електричні, теплові та механічні. Кожна група охоплює кілька специфічних методів, що відрізняються за чутливістю, складністю реалізації та типами виявлених дефектів.

Електричні методи засновані на аналізі параметрів електричного ланцюга машини: вимірюванні й аналізі форми та спектра струму споживання, контролі напруги і потужності, вимірюванні опору ізоляції, аналізі часткових розрядів. Перевагою електричних методів є можливість реалізації без механічного доступу до машини — через давачі в силовому ланцюзі. Серед них для БДПС найбільшого поширення набув аналіз спектра струму статора (Motor Current Signature Analysis, MCSA), який дозволяє виявляти дефекти обмоток, деградацію магнітів, порушення симетрії фаз та ексцентриситет ротора.

Теплові методи засновані на вимірюванні температури вузлів машини і побудові теплових моделей. Контроль температури обмотки є найбільш прямим способом оцінювання теплового стану ізоляції. Реалізуються як за допомогою контактних датчиків (NTC, PT100, термопари), так і безконтактної інфрачервоної термографії. Остання вимагає спеціалізованого обладнання і не завжди придатна в польових умовах, тому для вбудованих систем контролю зазвичай застосовуються контактні датчики.

Механічні методи включають вібраційний аналіз і акустичну емісію. Вібраційний аналіз дозволяє виявляти дефекти підшипників, статичний і динамічний дисбаланс ротора, механічні резонанси. Для малогабаритних БДПС із полімерним корпусом цей метод є менш інформативним через складність інтерпретації та нежорсткість конструкції, тому в даній роботі не застосовується.

Для задач автоматизованого дистанційного контролю технічного стану БДПС на базі мікроконтролерного обладнання найбільш практичними є: MCSA (аналіз струму статора), тепловий контроль за датчиками NTC та контроль частоти обертання за датчиком Холла. Саме ці методи покладено в основу розроблюваної системи.

Таблиця 1.2 — Класифікація методів неруйнівного контролю технічного стану БДПС

Група методів	Основний контрольований параметр	Виявлювані дефекти	Переваги	Недоліки
Електричні	Струм, напруга, спектр струму статора (MCSA)	Міжвиткові замикання, деградація магнітів, несиметрія фаз, ексцентриситет ротора	Не потребують механічного доступу до двигуна, проводяться в режимі онлайн (без зупинки), легко автоматизуються	Потребують спеціалізованої апаратної частини та цифрової обробки сигналів
Теплові	Температура обмоток та корпусу	Перегрів, теплове старіння ізоляції, тривалі перевантаження	Простота апаратної реалізації, висока пряма інформативність щодо стану та ресурсу ізоляції	Велика теплова інерція, не дозволяють безпосередньо та швидко локалізувати першопричину несправності
Механічні	Вібрація, акустичні сигнали (емісія)	Знос підшипників, статичний та динамічний дисбаланс ротора, механічні резонанси	Висока чутливість саме до механічних пошкоджень на ранніх стадіях розвитку дефекту	Необхідність жорсткого кріплення додаткових давачів, складність інтерпретації для полімерних конструкцій

1.4. Аналіз спектру струму статора (MCSA) як метод контролю

Motor Current Signature Analysis (MCSA) — метод контролю технічного стану електричних машин, що ґрунтується на аналізі спектра струму статора з метою виявлення характерних гармонічних складових, пов'язаних із конкретними несправностями. Метод є неінвазивним: для реалізації достатньо встановити давач струму в силовому колі без розбирання машини.

Теоретична основа MCSA полягає в тому, що будь-який механічний або електромагнітний дефект машини модулює струм статора на певних

характеристичних частотах. Для трифазного БДПС з числом пар полюсів p і частотою обертання n (об/хв) основна електрична частота комутації:

$$f_e = p \cdot n / 60 \quad (1.1)$$

де f_e — електрична частота комутації, Гц; p — кількість пар полюсів; n — частота обертання, об/хв.

Для тороїдального двигуна при номінальному режимі:

$$f_e = 6 \cdot 2400 / 60 = 240 \text{ Гц.}$$

Для конічного двигуна:

$$f_e = 6 \cdot 2000 / 60 = 200 \text{ Гц.}$$

В умовах нормальної роботи спектр струму статора БДПС містить основну гармоніку на частоті f_e та вищі гармоніки, зумовлені ШІМ-комутацією. При виникненні міжвиткового замикання в обмотці статора у спектрі з'являються бічні смуги на частотах $(f_e \pm k \cdot f_{meh})$, де f_{meh} — механічна частота обертання. При порушенні магнітної симетрії ротора (деградація або відлом магніту) виникають гармоніки, кратні частоті полюсів.

Для практичної реалізації MCSA в системі, що розробляється, спектральний аналіз виконується шляхом оцифровування миттєвих значень струму фази модулем INA226 з частотою дискретизації не менше 1 кГц, накопичення масиву відліків і обчислення дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) на мобільному терміналі. Довжина вікна аналізу встановлюється в 200 мс (200 відліків при 1 кГц), що забезпечує роздільну здатність по частоті 5 Гц — достатньо для ідентифікації основних інформативних гармонік.

1.5. Тепловий контроль обмоток та клас нагрівостійкості ізоляції

Тепловий стан ізоляції обмоток є ключовим показником технічного ресурсу [4] будь-якої електричної машини. Між температурою ізоляції і швидкістю її старіння існує залежність Монтзингера: підвищення робочої температури на 10 °С вдвічі пришвидшує теплове старіння і вдвічі скорочує очікуваний ресурс ізоляції.

Міжнародний стандарт IEC 60085 встановлює класи нагрівостійкості ізоляційних матеріалів на основі максимально допустимої тривалої робочої температури. Для електричних машин найбільш поширені класи: А (105 °C), Е (120 °C), В (130 °C), F (155 °C), Н (180 °C). Обидва досліджуваних двигуни — тороїдальний і конічний — мають клас нагрівостійкості В з граничною робочою температурою 130 °C.

При організації теплового захисту для класу В зазвичай виділяють три зони: нормальний режим (до 100 °C), зона попередження (100–120 °C) і аварійна зона (вище 120 °C, з граничною температурою класу 130 °C). Важливо враховувати, що датчик NTC вимірює температуру лише в точці встановлення, яка може відрізнятись від максимальної температури «гарячої точки» обмотки.

Для тороїдального двигуна використовується штатний датчик NTC 10 кОм, вмонтований безпосередньо в обмотку статора. Для конічного двигуна вбудованого датчика немає — тепловий контроль реалізується через зовнішній датчик NTC на корпусі.

Тепловий захист у розроблюваній системі реалізується за триступінчастою схемою. Перший ступінь (70 °C) — зменшення заданої потужності і виведення попередження. Другий ступінь (75 °C) — звукове та візуальне сповіщення оператора з записом події в журнал. Третій ступінь (80 °C) — аварійне відключення двигуна і блокування пуску до зниження температури нижче 70 °C.

1.6. Контроль пускових режимів

Пусковий режим безконтактного двигуна є найбільш інформативним з точки зору контролю технічного стану: у перші секунди після подачі живлення струм проходить через характерний максимум, тривалість і величина якого відображають електромагнітний та механічний стан машини. Аналіз пускового струму дозволяє виявляти підвищений опір фазних обмоток (через теплове старіння або підвищену температуру), зниження струмового максимуму при деградації постійних магнітів, збільшення часу розгону при механічних навантаженнях або тертях, а також порушення симетрії фаз.

Для реалізації функції реєстрації пускового профілю система керування маркує початок пускового вікна тривалістю 3 секунди при кожній команді START і підвищує частоту вибірки до 20 Гц протягом цього вікна, зберігаючи профіль у внутрішньому буфері мікроконтролера для подальшої передачі на мобільний термінал.

Базовий профіль пускового струму записується при першому пуску двигуна після обслуговування і зберігається як еталон. При наступних пусках поточний профіль порівнюється з еталоном за декількома параметрами: максимальне значення пускового струму, час розгону до 90 % від сталого значення частоти обертання, площа під кривою пускового струму (інтеграл). Суттєве відхилення будь-якого з цих параметрів від еталону є ознакою деградації.

1.7. Постановка задач дослідження

На основі аналізу стану питання і конструктивних особливостей досліджуваних двигунів сформульовані такі задачі дослідження.

По-перше, виконати аналіз режимів роботи двигунів тороїдальної та конічної конструкцій, встановити їх характеристичні параметри і порогові значення для організації системи захисту і керування.

По-друге, розробити апаратну частину системи: вимірювальний модуль на базі ESP32-S3 з каналами струму, напруги, температури і частоти обертання.

Третє, розробити програмне забезпечення мікроконтролера: вимірювальний цикл, алгоритм формування контрольного висновку, BLE-стек з передачею телеметрії.

Четверте, розробити мобільний застосунок на базі Flutter для візуалізації телеметрії, керування двигуном і ведення журналу подій.

П'яте, провести експериментальні дослідження пускових і усталених режимів обох двигунів на лабораторному стенді і верифікувати розроблену систему.

Висновки до розділу 1

1. У результаті порівняльного аналізу двох конструкцій встановлено, що тороїдальний і конічний двигуни є машинами класу нагрівостійкості ізоляції В (130 °С) з полімерним корпусом та обмеженою природною конвекцією і не мають давачів положення ротора, проте працюють у принципово різних струмових діапазонах — 10–15 А для тороїдального і близько 2 А для конічного, — що задає різні вимоги до меж і роздільної здатності вимірювальних каналів системи керування.

2. Обґрунтовано набір із трьох методів контролю технічного стану, придатних для реалізації на мікроконтролерному обладнанні: аналіз спектру струму статора (MCSA) дає інформацію про електромагнітну симетрію та стан магнітної системи, тепловий контроль за давачем NTC забезпечує захист ізоляції від перегріву відповідно до класу В, а аналіз пускових режимів дозволяє виявляти деградацію за зміною пускового струму і часу розгону. Саме ці методи покладено в основу розроблюваної системи як такі, що не потребують додаткового лабораторного обладнання.

3. На основі аналізу сформульовано перелік із п'яти задач дослідження (визначення характеристичних параметрів і порогів, розробка апаратного модуля на ESP32-S3, програмного забезпечення мікроконтролера і мобільного застосунку, експериментальна верифікація), вирішення яких у сукупності забезпечує досягнення мети роботи — створення автоматизованої системи керування і моніторингу двигунів нестандартних конструкцій.

РОЗДІЛ 2 ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МОНІТОРИНГУ ДОСЛІДЖУВАНИХ ДВИГУНІВ

2.1. Електромагнітний розрахунок безконтактного двигуна тороїдальної конструкції

Для побудови ефективної автоматизованої системи керування та технічного моніторингу безконтактних двигунів постійного струму нестандартних конструкцій необхідне повне теоретичне обґрунтування їхніх електромеханічних характеристик. У цьому розділі наведено електромагнітні та конструктивні розрахунки двох об'єктів дослідження, визначено номінальні й граничні параметри, які є базою для алгоритмів моніторингу та спрацювання захистів.

Двигун тороїдальної конструкції (аксіальний постійний магнітний синхронний двигун з беззалізним статором) розраховується на основі геометричних параметрів активної зони та магнітних характеристик матеріалу NdFeB N38. Машина містить два ротори із загальною кількістю магнітів $N_m = 12$ на один ротор (всього 24 магніти в конфігурації стекування полюсів) та дев'ять зубцевих котушок статора ($N_s = 9$). Число пар полюсів:

$$p = N_m/2 = 12/2 = 6 \quad (2.1)$$

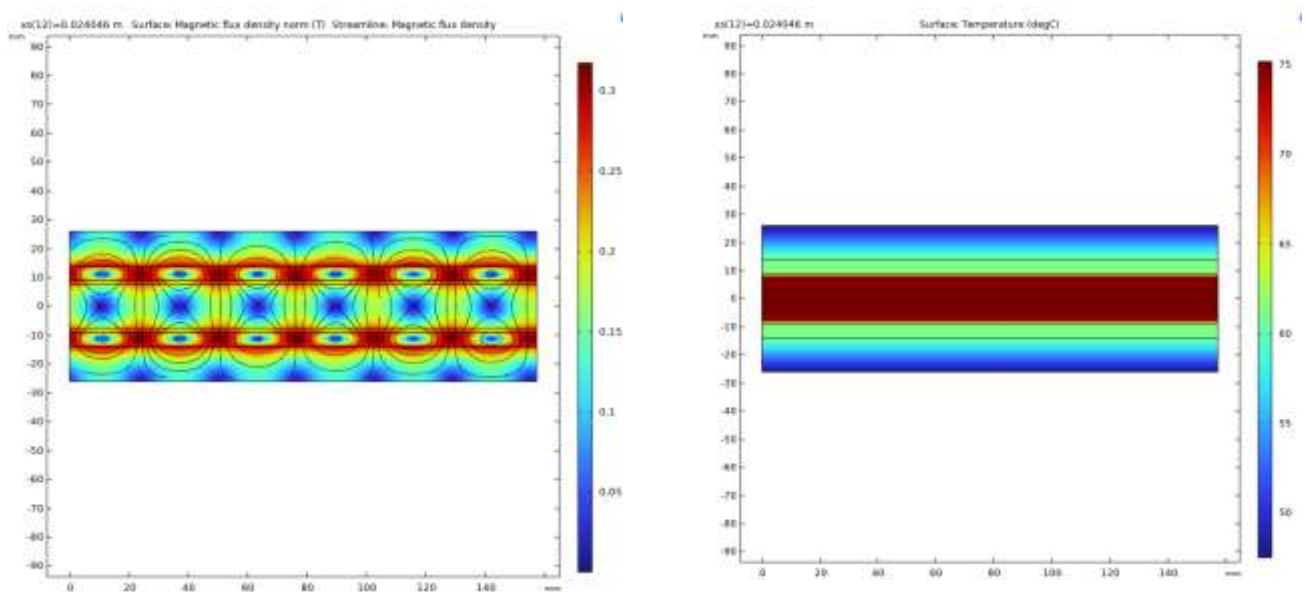


Рисунок 2.2 — Результати моделювання магнітного поля тороїдного двигуна в COMSOL Multiphysics

Число пазів (катушок) на полюс і фазу:

$$q = N_s / (2 \cdot p \cdot m) = 9 / (12 \cdot 3) = 0,25 \quad (2.2)$$

Значення $q < 1$ вказує на дробово-пазову зосереджену обмотку. Кількість катушок на одну фазу:

$$N_{\text{кот.фаза}} = N_s / m = 9 / 3 = 3 \quad (2.3)$$

При номінальній частоті обертання $n = 2400$ об/хв механічна кутова швидкість ротора:

$$\omega_m = \pi \cdot n / 30 = \pi \cdot 2400 / 30 = 251,33 \text{ рад/с} \quad (2.4)$$

Електрична кутова швидкість та частота комутації фаз:

$$\omega_e = p \cdot \omega_m = 6 \cdot 251,33 = 1507,96 \text{ рад/с} \quad (2.5)$$

$$f_e = p \cdot n / 60 = 6 \cdot 2400 / 60 = 240 \text{ Гц} \quad (2.6)$$

Геометричні розміри активної зони: внутрішній радіус $R_{in} = 35,5$ мм, ширина магніту $L_a = 30$ мм. Зовнішній радіус:

$$R_{out} = R_{in} + L_a = 35,5 + 30 = 65,5 \text{ мм} \quad (2.7)$$

Середній радіус активної зони:

$$R_{avg} = ((R_{in} + R_{out})) / 2 = ((35,5 + 65,5)) / 2 = 50,5 \text{ мм} = 0,0505 \text{ м} \quad (2.8)$$

Повний немагнітний проміжок між двома роторами ($h_{\text{ротор}} = 11,8$ мм, $\delta = 0,8$ мм):

$$g = h_{\text{ротор}} + 2 \cdot \delta = 11,8 + 2 \cdot 0,8 = 13,4 \text{ мм} \quad (2.9)$$

Коефіцієнт проникності магнітного кола для двох послідовних магнітів $h_{\text{маг}} = 5$ мм:

$$P_c = 2 \cdot h_{\text{маг}} / g = 2 \cdot 5 / 13,4 = 0,746 \quad (2.10)$$

Робоча індукція магніту NdFeB N38 ($B_r = 1,24$ Тл, $\mu_r = 1,05$) без урахування розсіяння:

$$B_{\delta 0} = B_r \cdot P_c / (P_c + \mu_r) = 1,24 \cdot 0,746 / (0,746 + 1,05) = 0,515 \text{ Тл} \quad (2.11)$$

З урахуванням коефіцієнта крайового розсіяння $K_l = 0,5$ ефективна магнітна індукція в зазорі:

$$B_{(\delta)} = K_l \cdot B_{\delta 0} = 0,5 \cdot 0,515 = 0,258 \text{ Тл} \quad (2.12)$$

Магнітний потік на один полюс (площа магніту $A_m = 30 \cdot 10 = 300 \text{ мм}^2$):

$$\Phi_{\delta} = B_{(\delta)} \cdot A_m = 0,258 \cdot 300 \cdot 10^{-6} = 77,28 \text{ мкВб} \quad (2.13)$$

Постійна ЕРС однієї котушки при $N = 95$ витках:

$$K_{e.\text{кот}} = N \cdot p \cdot \Phi_{\delta} = 95 \cdot 6 \cdot 77,28 \cdot 10^{-6} = 0,044 \text{ В} \cdot \text{с/рад} \quad (2.14)$$

Стала ЕРС фази ($k_{w1} = 0,866$, три котушки послідовно):

$$K_{e\phi} = N_{(\text{кот.фаза})} k_{(w1)} K_{e.\text{кот}} = 3 \cdot 0,866 \cdot 0,044 = 0,114 \text{ В} \cdot \text{с/рад} \quad (2.15)$$

Опір однієї жили котушки ($L = 7,8 \text{ м}$, $A_w b = 0,196 \text{ мм}^2$):

$$R_{\text{жила}} = \rho \cdot L / A_{wb} = 0,0175 \cdot 7,8 / 0,196 = 0,685 \text{ Ом} \quad (2.16)$$

Котушка намотана у дві жили паралельно:

$$R_{\text{кот}} = R_{\text{жила}} / 2 = 0,685 / 2 = 0,342 \text{ Ом} \quad (2.17)$$

Повний опір фази при 20°C (три котушки послідовно):

$$R_{\phi} = 3 \cdot R_{\text{кот}} = 3 \cdot 0,342 = 1,027 \text{ Ом} \quad (2.18)$$

(Виміряне значення — $1,07 \text{ Ом}$.)

При нагріванні до 80°C ($\alpha = 0,004^\circ \text{C}^{-1}$):

$$R_{\phi 80} = R_{\phi} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20)] = 1,027 \cdot [1 + 0,004 \cdot 60] = 1,274 \text{ Ом} \quad (2.19)$$

Постійна моменту:

$$K_T = K_{e\phi} = 0,114 \text{ Н} \cdot \text{м/А} \quad (2.20)$$

Максимальний момент при $I_{max} = 15 \text{ А}$:

$$T_{max} = K_T \cdot I_{max} = 0,114 \cdot 15 = 1,717 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.21)$$

Втрати в міді трьох фаз при $I = 3 \text{ А}$:

$$P_{Cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{\phi 80} = 3 \cdot 3^2 \cdot 1,274 = 34,4 \text{ Вт} \quad (2.22)$$

При $P_{mex} = 60,54 \text{ Вт}$ розрахунковий ККД:

$$\eta = P_{mex} / (P_{mex} + P_{Cu}) = 60,54 / (60,54 + 34,4) = 63,77 \% \quad (2.23)$$

2.2. Електромагнітний розрахунок безконтактного двигуна конічної конструкції

Двигун конічної конструкції характеризується нахилом активної зони під кутом 16° відносно осі обертання. Машина має $N_p = 12$, $p = 6$, $N_s = 18$. Номінальні параметри: $P = 300$ Вт, $n = 3000$ об/хв, $U = 24$ В.

Механічна кутова швидкість:

$$\omega_m = \pi \cdot n / 30 = \pi \cdot 3000 / 30 = 314,16 \text{ рад/с} \quad (2.24)$$

Електрична частота комутації:

$$f_e = p \cdot n / 60 = 6 \cdot 3000 / 60 = 300 \text{ Гц} \quad (2.25)$$

Необхідний номінальний крутний момент:

$$T = P / \omega_m = 300 / 314,16 = 0,9549 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.26)$$

Число пазів на полюс і фазу:

$$q = N_s / (2 \cdot p \cdot m) = 18 / (12 \cdot 3) = 0,5 \quad (2.27)$$

Аналіз пульсацій моменту через найменше спільне кратне:

$$\text{НСК}(N_s, N_p) = \text{НСК}(18, 12) = 36 \quad (2.28)$$

36 рівних пульсацій за оберт забезпечують плавний хід ротора.

Вертикальна проекція скосу трапецієподібного паза

($L_{\text{СК}} = 3,64$ мм, кут 60°):

$$h_{\text{СК}} = L_{\text{СК}} \cdot \cos(60^\circ) = 3,64 \cdot 0,5 = 1,82 \text{ мм} \quad (2.29)$$

Висота робочої частини паза ($H = 8,8$ мм):

$$h_{\text{роб}} = H - h_{\text{СК}} = 8,8 - 1,82 = 6,98 \text{ мм} \quad (2.30)$$

Ширина паза у верхній точині робочої зони

($b_d = 8,23$ мм, нахил стінок $\alpha = 3^\circ$):

$$b_{\text{верх}} = b_d - 2 \cdot h_{\text{роб}} \cdot \tan(3^\circ) = 8,23 - 2 \cdot 6,98 \cdot 0,05241 = 7,498 \text{ мм} \quad (2.31)$$

Корисна площа паза (трапеція):

$$S_{\text{паза}} = (b_d + b_{\text{верх}}) \cdot h_{\text{роб}} / 2 = (8,23 + 7,498) \cdot 6,98 / 2 = 54,89 \text{ мм}^2 \quad (2.32)$$

Коефіцієнт заповнення паза ($N = 60$ пров., A_w . ізол = $0,246 \text{ мм}^2$):

$$k_y = (N_{\text{пров}} \cdot A_{w.\text{ізол}}) / S_{\text{паза}} = (60 \cdot 0,246) / 54,89 = 26,89\% \quad (2.33)$$

Значення $k_y \ll 70\%$ підтверджує технологічну надійність укладки.

Еквівалентний магнітний зазор ($h_{\text{пл}} = 1,5\text{мм}$, $\delta = 1\text{ мм}$):

$$\delta_{\text{екв}} = h_{\text{пл}} + \delta = 1,5 + 1 = 2,5\text{ мм} \quad (2.34)$$

Ефективна магнітна індукція в зазорі ($B_{\delta 0} = 0,813\text{Тл}$, $K_l = 0,7$):

$$B_{\delta} = K_l \cdot B_{\delta 0} = 0,7 \cdot 0,813 = 0,569\text{ Тл} \quad (2.35)$$

Обмотковий коефіцієнт ($\beta = 0,667$):

$$k_{og} = k_p \cdot k_d = \sin(\beta \cdot 90^\circ) \cdot 1,0 = \sin(60^\circ) = 0,866 \quad (2.36)$$

Константа ЕРС котушки ($L_a = 0,05\text{ м}$, $R_{avg} = 0,0315\text{ м}$):

$$\begin{aligned} K_{e.\text{кот}} &= 2 \cdot N \cdot B_{\delta} \cdot L_a \cdot R_{avg} = \\ &= 2 \cdot 60 \cdot 0,569 \cdot 0,05 \cdot 0,0315 = 0,10758\text{ В}\cdot\text{с/рад} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Константа ЕРС фази (паралельні групи котушок):

$$K_{e\phi} = k_{og} \cdot K_{e.\text{кот}} = 0,866 \cdot 0,10758 = 0,09316\text{ В}\cdot\text{с/рад} \quad (2.38)$$

Опір котушки при 20°C ($L = 7,2\text{ м}$, $A_w b = 0,196\text{мм}^2$):

$$R_{\text{кот}} = \rho \cdot L / A_w b = 0,0175 \cdot 7,2 / 0,196 = 0,643\text{ Ом} \quad (2.39)$$

Повний опір фази при 80°C ($R_{\phi} = 3,793\text{Ом}$,):

$$R_{\phi 80} = R_{\phi} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20)] = 3,793 \cdot [1 + 0,004 \cdot 60] = 4,703\text{ Ом} \quad (2.40)$$

Зворотна ЕРС при номінальних обертах:

$$E_{\phi} = K_{e\phi} \cdot \omega_m = 0,09316 \cdot 314,16 = 29,27\text{ В} \quad (2.41)$$

Втрати в міді при $I = 1,5\text{ А}$:

$$P_{Cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{\phi 80} = 3 \cdot 1,5^2 \cdot 4,703 = 31,74\text{ Вт} \quad (2.42)$$

Мотор-константа:

$$K_m = K_T / \sqrt{R_{\phi}} = 0,0932 / \sqrt{3,793} = 0,048\text{ Н}\cdot\text{м}/\sqrt{\text{Вт}} \quad (2.43)$$

2.3. Порівняльний аналіз номінальних та розрахункових характеристик об'єктів дослідження

Для наочного співставлення властивостей обох двигунів сформовано зведену таблицю 2.1 розрахованих та вимірених параметрів.

Таблиця 2.1 — Порівняльна таблиця розрахункових та вимірених параметрів двигунів

Параметр	Тороїдна машина	Конічна машина
Кількість пар полюсів p	6	6
Кількість пазів статора N_s	9	18
Коефіцієнт дробовості q	0,25	0,5
Номінальна частота обертання $n_{\text{ном}}$, об/хв	2400	3000
Механічна кутова швидкість ω_m , рад/с	251,33	314,16
Електрична частота f_e при $n_{\text{ном}}$, Гц	240	300
Опір фази R_ϕ при 20 °C (розрахунок), Ом	1,027	3,793
Опір фази R_ϕ при 20 °C (вимірювання), Ом	1,07	4,74
Опір фази R_ϕ при 80 °C (розрахунок), Ом	1,274	4,703
Стала ЕРС / Моменту $K_e = K_T$, В·с/рад	0,114	0,093
Мотор-константа K_m , Н·м/ $\sqrt{\text{Вт}}$	—	0,048
Номінальний струм $I_{\text{ном}}$, А	12,5	2,0
Максимальний струм ESC I_{max} , А	15,0	15,0
Розрахунковий ККД, %	63,77 (при $I = 3 \text{ А}$)	57,76 (при $I = 1,5 \text{ А}$)

2.4. Обґрунтування вибору контрольованих параметрів системи моніторингу

На основі результатів електромагнітних розрахунків розділів 2.1–2.2 та аналізу методів моніторингу з розділу 1 визначено мінімально достатній набір з чотирьох фізичних величин, які безперервно вимірюються апаратною підсистемою.

Струм (I) — основний динамічний параметр. Використовується для захисту від надструмів у сталих режимах, побудови профілю пускового струму для порівняння з еталоном, а також виявлення несиметрії фаз та деградації магнітів за методом MCSA. Характеристичні частоти для аналізу: $f_e = 240$ Гц (тороїдальний) та 300 Гц (конічний).

Напруга живлення (U) — необхідна для контролю стабільності лабораторного джерела живлення та точного розрахунку миттєвої споживаної потужності. Просадання напруги більш ніж на 5 % від номіналу 24 В є моніторинговою ознакою перевантаження або деградації джерела.

Температура обмоток (T) — прямий індикатор теплового стану ізоляції провідників, що визначає швидкість деградації та залишковий ресурс машини. Критична для тороїдального двигуна, де PETG-корпус обмежує природну конвекцію. Вимірюється термісторами NTC 10 кОм безпосередньо в обмотці (тороїдальний) і на корпусі (конічний).

Частота обертання (n) — необхідна для оцінки динаміки розгону ротора, визначення механічного ковзання при аномальних навантаженнях і розрахунку спектральних частот комутації для MCSA. Вимірюється через давач Холла стенду (6 імпульсів на оберт). Апаратна реалізація каналів: струм і напруга — модуль INA226 (I^2C , 400 кГц); температура — канали АЦП ESP32-S3; частота обертання — GPIO-переривання.

2.5. Розрахунок граничних теплових режимів з урахуванням класу ізоляції

Клас нагрівостійкості В (IEC 60085), гранична температура 130 °C. Закон Монтзингера:

$$\tau_2/\tau_1 = 2^{(T_2-T_1)/10} \quad (2.44)$$

Приклад — перевищення на 10 °C ($T_2 = 90$ °C):

$$\tau_2/\tau_1 = 2^{(90-80)/10} = 2^1 = 2 \quad (2.45)$$

Тобто ресурс ізоляції скорочується вдвічі. Залежність опору термістора NTC від температури:

$$R_{NTC}(T) = R_{25} \cdot \left[B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25}} \right) \right] \quad (2.46)$$

де $R^{25} = 10\text{кОм}$, $T^{25} = 298\text{К}$.

Напруга на виводі АЦП:

$$V_{NTC}(T) = V_{cc} \cdot R_{NTC} / (R_{ref} + R_{NTC}) \quad (2.47)$$

Розрахунок для аварійного порогу $T = 80$ °C (353 К):

$$R_{NTC}(80) = 10000 \cdot \left[e^{3950} \cdot \left(\frac{1}{353} - \frac{1}{298} \right) \right] = 1270 \text{ Ом} \quad (2.48)$$

$$V_{NTC}(80) = 3,3 \cdot 1270 / (10000 + 1270) = 0,372 \text{ В} \quad (2.49)$$

Умова спрацювання кожного ступеня — $V_{NTC} < V_{порог}$. Всі порогові рівні наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 — Порогові температури та відповідні значення вимірювального каналу NTC

Температура, °C	R_{NTC} , Ом	V_{NTC} , В	Дія системи захисту
80 (аварійна)	1270	0,372	Повне відключення ШІМ + блокування пуску
75 (попередження)	1492	0,428	Акустична/візуальна сигналізація, запис у журнал
70 (зниження потужності)	1760	0,494	Обмеження ШІМ на 25 % для охолодження
60 (гістерезис)	2486	0,657	Зняття блокування, дозвіл повторного пуску
25 (референс)	10 000	1,650	Нормальний режим (калібрувальна точка)

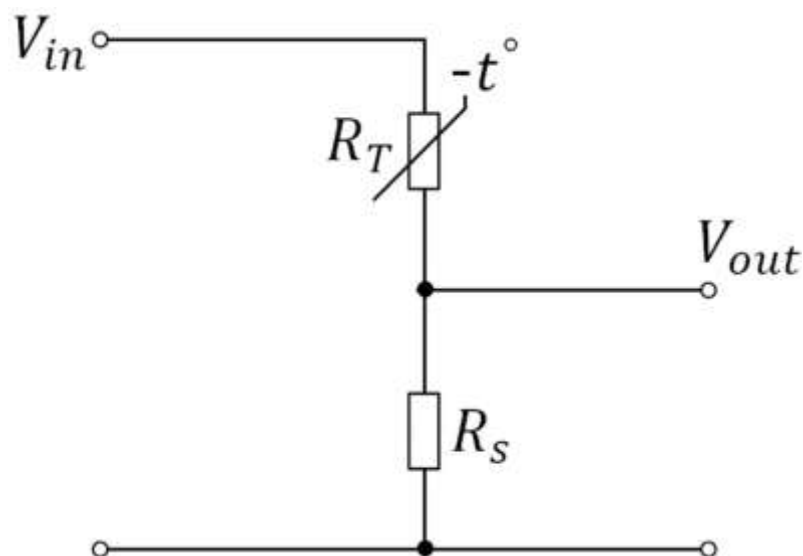


Рисунок 2.3 — Схема дільника напруги NTC

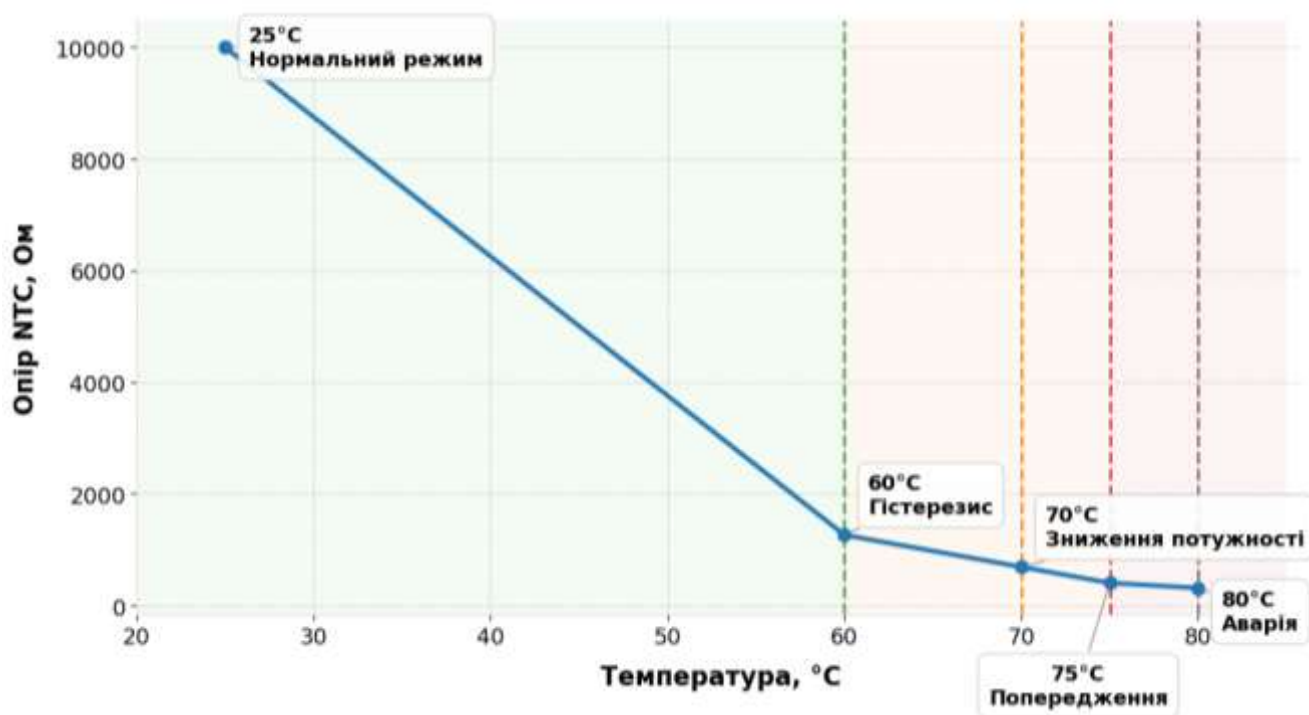


Рисунок 2.4 — Графік $R_{NTC}(T)$ з позначенням порогових рівнів

2.6. Розрахунок порогових значень струмового захисту і пускових кратностей

Кратність пускового струму:

$$K_{\text{пуск}} = I_{\text{пуск}} / I_{\text{уст}} \quad (2.50)$$

Для тороїдального двигуна:

$$K_{\text{пуск.тор}} = 15/12,5 = 1,2 \quad (2.51)$$

Для кінцевого двигуна:

$$K_{\text{пуск.кон}} = 2,5/2,0 = 1,25 \quad (2.52)$$

Максимальний лінійно вимірюваний струм INA226

($V_{\text{ш. max}} = 81,92 \text{ мВ}$, $R_{\text{шунт}} = 10 \text{ мОм}$):

$$I_{\text{макс.вим}} = V_{\text{ш. max}}/R_{\text{шунт}} = 81,92 \text{ мВ}/10 \text{ мОм} = 8,19 \text{ А} \quad (2.53)$$

Для кінцевого двигуна весь діапазон (до 2,52 А) лежить у лінійній зоні. Для тороїдального — насичення при 8,19 А, фіксується програмно прапором насичення.

2.7. Розрахунок інтервалів вимірювання та обробки сигналів

Частота відправки телеметрії по BLE ($T_{BLE} = 150 \text{ мс}$):

$$f_{BLE} = 1/T_{BLE} = 1/0,15 = 6,67 \text{ Гц} \quad (2.54)$$

Мінімальна частота дискретизації для фіксації пускового профілю (не менше 10 вибірок за $\tau = 0,4 \text{ с}$):

$$f_{\min} = 10/\tau = 10/0,4 = 25 \text{ Гц} \quad (2.55)$$

Обрана частота 20 Гц у пусковому вікні є достатньою для аналізу трендів.

2.8. Розрахунок похибки каналів вимірювання

Максимальна методична похибка вимірювання частоти обертання методом підрахунку імпульсів від давача Холла ($k = 6$ імпульсів на оберт) при часовому вікні ($T_{\text{вим}} = 0,15 \text{ с}$):

$$\Delta n = 60/(k \cdot T_{\text{вим}}) = 60/(6 \cdot 0,15) = 67 \text{ об/хв} \quad (2.56)$$

Відносна похибка при $n_{\text{ном}} = 3000 \text{ об/хв}$:

$$\delta n = \Delta n/n_{\text{ном}} = 67/3000 = 2,23 \% \quad (2.57)$$

Крок квантування АЦП при розрядності 12 біт і $V_c = 3,3 \text{ В}$:

$$\Delta V_{\text{АЦП}} = V_c/2^{12} = 3,3/4096 \approx 0,806 \text{ мВ} \quad (2.58)$$

що відповідає похибці $\approx 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ у робочому діапазоні температур. Відносна похибка каналу струму INA226:

$$\delta I = (0,25\text{ мА}/8190\text{ мА}) \cdot 100 = 0,003\text{ \%} \quad (2.59)$$

У лінійному діапазоні — не гірше 0,5 % від повної шкали; похибка каналу напруги — 1,25 мВ LSB, що відповідає відносній похибці 0,005 % при номінальній напрузі 24 В.

Висновки до розділу 2

1. У результаті електромагнітного розрахунку обох двигунів отримано їх ключові сталі: сталі ЕРС і моменту складають $K_e = K_T = 0,114\text{ В}\cdot\text{с/рад}$ для тороїдального двигуна і $0,093\text{ В}\cdot\text{с/рад}$ для конічного. Ці константи разом із розрахованими коефіцієнтами заповнення паза, магнітними індукціями та обмотковими коефіцієнтами утворюють кількісний базис, на якому будуються порогові умови алгоритмів моніторингу.

2. Для організації теплового захисту обрано чотири параметри моніторингу (I , U , T , n) і за законом Монтзингера для класу ізоляції В розраховано триступінчасту схему з порогоми $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (зниження ШІМ і попередження), $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (сигналізація оператора) та $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (аварійне відключення з блокуванням пуску). Кожному порогу поставлено у відповідність конкретне значення опору і напруги каналу NTC, що робить схему безпосередньо реалізовною в прошивці.

3. Розрахунком метрологічних характеристик каналів встановлено, що межа лінійного вимірювання струму модулем INA226 становить 8,19 А, похибка каналу струму не перевищує 0,5 %, похибка каналу температури $\approx 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а кратності пускового струму дорівнюють 1,2 (тороїдальний) і 1,25 (конічний). Отримані значення підтверджують метрологічну спроможність комплексу і коректність вибраних меж вимірювання.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

3.1. Структурна схема системи моніторингу

Автоматизована система керування досліджуваних двигунів побудована за трирівневою архітектурою: фізичний об'єкт контролю (двигуни на лабораторному стенді), модуль збору та первинної обробки сигналів (мікроконтролерний вимірювальний вузол) і мобільний термінал оператора (програмний застосунок на платформі Android). Зв'язок між модулем збору і мобільним терміналом виконується по бездротовому каналу Bluetooth Low Energy 5.0. Такий поділ функцій відповідає сучасній концепції побудови розподілених вимірювально-керуючих систем.

Перший рівень — **фізичний об'єкт** — описано в розділі 1: два двигуни (тороїдальний як привід, конічний як генераторне навантаження), кінематично з'єднані на спільному валу. Другий рівень — **апаратний модуль збору** — реалізований на базі мікроконтролера ESP32-S3 Super Mini з підключеними вимірювальними модулями. Третій рівень — **мобільний термінал** — є кросплатформовим застосунком на фреймворку Flutter [11].

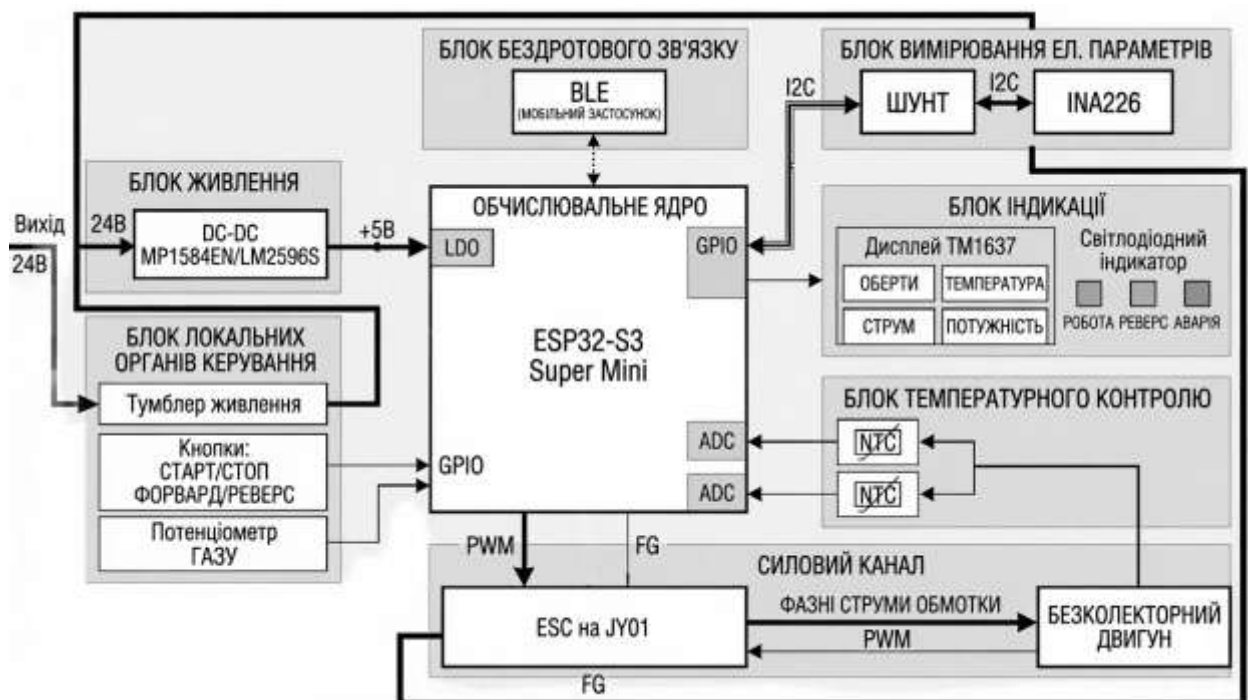


Рисунок 3.1 — Загальна функціональна схема автоматизованої системи керування

3.2. Модуль збору та первинної обробки сигналів

Центральним елементом апаратного модуля є мікроконтролер ESP32-S3 Super Mini [8]. Вибір обумовлений: двоядерний 32-розрядний процесор Xtensa LX7 з тактовою частотою до 240 МГц, вбудований радіомодуль BLE 5.0, вбудовані АЦП 12-біт із множинними каналами, апаратні інтерфейси I²C та контролер ШІМ, компактний форм-фактор ~22×18 мм.

Програмне забезпечення мікроконтролера реалізує асинхронну архітектуру з розділенням задач між двома ядрами. Перше ядро обслуговує вимірювальний цикл і первинну обробку сигналів, друге — стек BLE і комунікаційні задачі. Основний вимірювальний цикл побудований за принципом твердо заданого (hard real-time) періоду 50 мс.

Функції зчитування модуля INA226 та перетворення коду NTC у температуру викликаються апаратним таймером кожні 50 мс незалежно від стану BLE-з'єднання.

Своєю чергою, обчислення частоти обертання (RPM) виконується в перериванні за імпульсами давача Холла. Реалізація відповідного ISR-лічильника та функції перерахунку з ковзним середнім виглядає наступним чином:

```
// =====  
// RPM: ISR + обчислення з ковзним середнім  
// =====  
// ISR (Interrupt Service Routine) – переривання по фронту GPIO.  
// Атрибут IRAM_ATTR: розміщення функції у внутрішній SRAM  
// (а не у Flash), щоб уникнути затримок при кеш-промахах.  
// Volatile: заборонити компілятору оптимізувати (кешувати)  
// змінну в регістрі – вона змінюється поза нормальним потоком.  
volatile unsigned long rpmPulseCount = 0;  
  
void IRAM_ATTR rpmPulseISR() {  
    rpmPulseCount++;  
}  
// calculateRPM() – виклик кожні RPM_CALC_INTERVAL мс (= 150 мс).  
//  
// Формула:  $n = (N_{\text{pulses}} / k) * (60000 / T_{\text{ms}})$ ,  
// де  $k = \text{RPM\_PULSES\_PER\_REV} = 6$  – кількість магнітних полюсів,  
//  $T_{\text{ms}} = 150$  мс – інтервал підрахунку.  
// Точність: при  $n=2000$  об/хв  $\rightarrow$  30 імпульсів за 150 мс,  
// квант =  $1/30 \approx 3.3\%$   $\rightarrow$  67 об/хв.  
// =====  
void calculateRPM()  
{  
    // Критична секція: вимикаємо переривання тільки для читання
```

```

// лічильника та скидання, щоб уникнути race condition.
noInterrupts();
unsigned long pulses = rpmPulseCount;
rpmPulseCount = 0;
interrupts();

int rawRPM = (int)((float)pulses / RPM_PULSES_PER_REV * (60000.0f /
RPM_CALC_INTERVAL));

// Ковзне середнє (розмір вікна RPM_AVG_SIZE = 3) для згладження
// стрибків RPM між сусідніми 150-мс вікнами.
static int rpmBuf[RPM_AVG_SIZE] = { 0 };
static int rpmBufIdx = 0;
static bool initialized = false;

// ... (заповнення аналогічне filterTemp: перший виклик ініціалізує
//       весь буфер значенням rawRPM, далі – циклічна заміна)

long sum = 0;
for (int i = 0; i < RPM_AVG_SIZE; i++)
{
    sum += rpmBuf[i];
}
motorRPM = (int)(sum / RPM_AVG_SIZE);
}

```

Резюме програмного коду :

1.Підрахунок. Датчик постійно реагує на обертання мотора: щоразу, коли повз нього 6 разів проходить магніт, програма записує +1 у свій лічильник.

2.Зняття даних. Кожні 150 мілісекунд програма фіксує, скільки сигналів накопичилося, і відразу скидає лічильник на нуль для наступного циклу підрахунку.

3.Обчислення швидкості. Зібрану кількість сигналів програма перераховує у зрозумілу величину — оберти на хвилину, враховуючи загальну кількість магнітів на двигуні.

4.Згладжування. Щоб показники швидкості не стрибали на екрані, програма постійно бере три останні результати і виводить їхнє середнє значення. Це забезпечує плавне відображення.

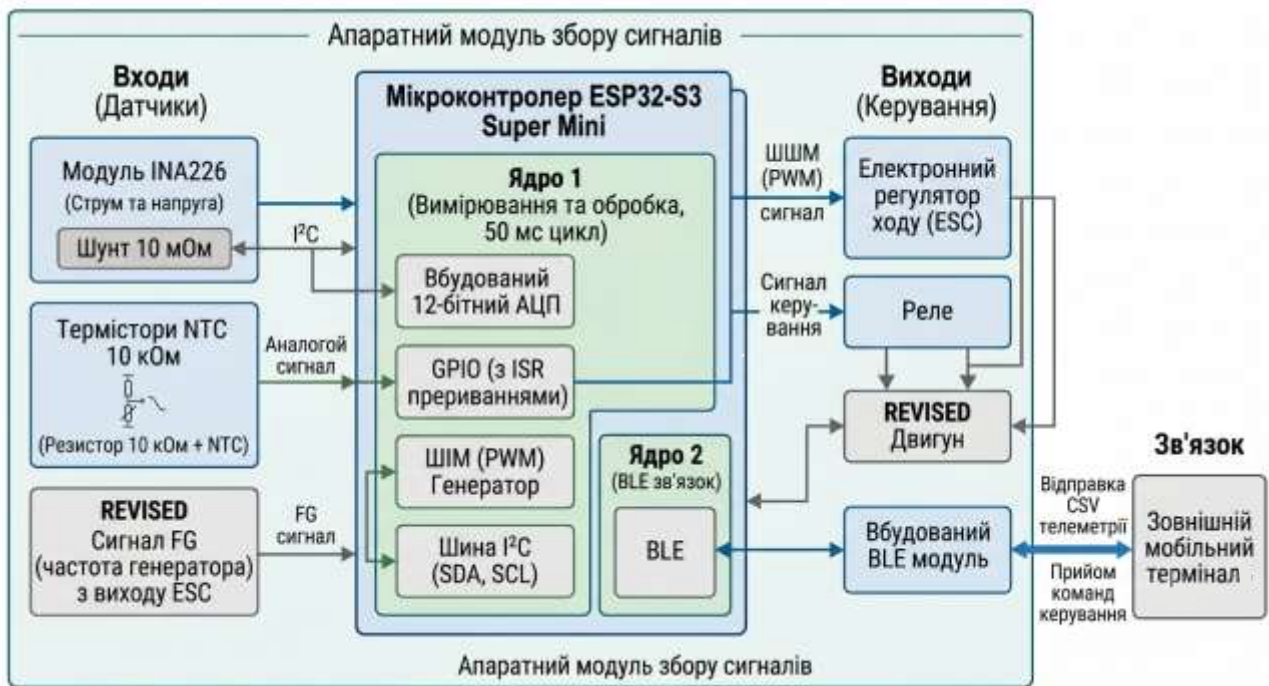


Рисунок 3.2 — Функціональна схема апаратного модуля збору сигналів

3.3. Канали вимірювання струму, напруги, температури і частоти обертання

Вимірювальна підсистема об'єднує чотири незалежних канали. Канали струму і напруги обслуговуються одним інтегральним модулем INA226 [9], що підключений до мікроконтролера через шину I²C на частоті 400 кГц. Шунтовий резистор номіналом 10 мОм встановлено в розрив кола живлення двигунів. Канал температури реалізований на термісторах NTC 10 кОм з коефіцієнтом B = 3950 К. Канал частоти обертання — на давачі Холла: 6 імпульсів на оберт [8].

Поточне значення частоти обертання обчислюється за виразом (об/хв):

$$n = N_{\text{імп}} \cdot 60000 / (k \cdot T_{\text{вим}}) \quad (3.1)$$

Де: $N_{\text{імп}}$ — кількість імпульсів за інтервал; $T_{\text{вим}} = 150$ мс; $k = 6$ — кількість імпульсів на оберт.

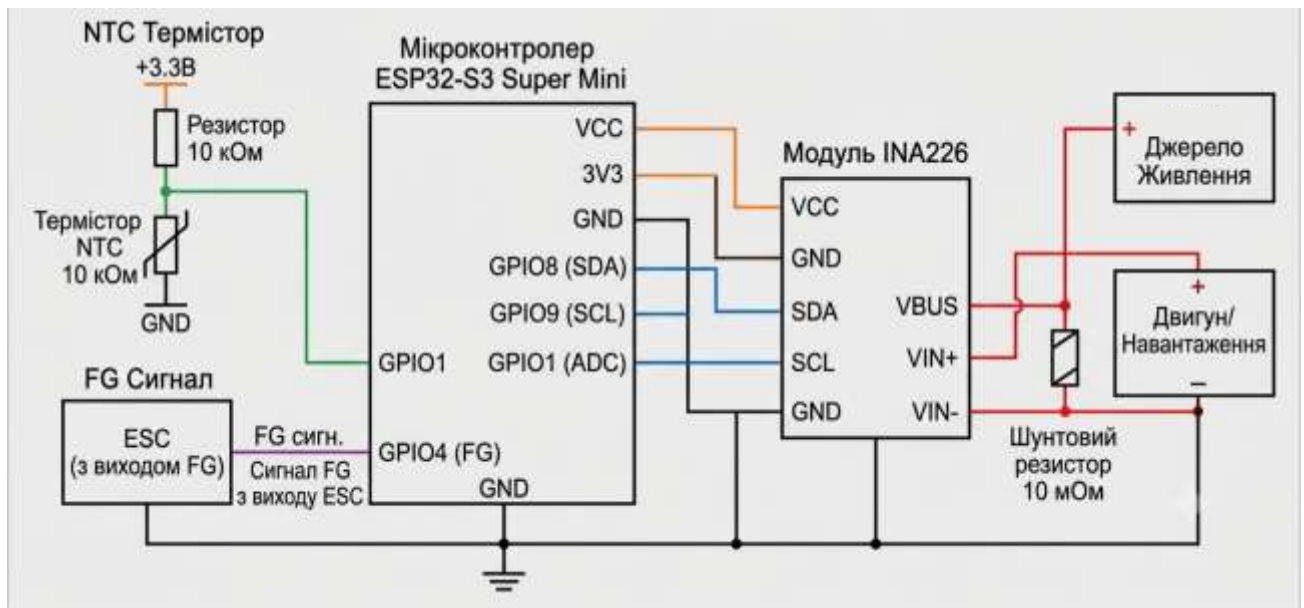


Рисунок 3.3 — Схема підключення датчиків та модуля INA226 до мікроконтролера ESP32-S3

3.4. Бездротовий канал передачі даних

Бездротовий канал побудований на базі стандарту Bluetooth Low Energy версії 5.0 [12]. Архітектура BLE-комунікації побудована за стандартним профілем GATT. Мікроконтролер реалізує роль GATT-сервера, мобільний термінал — роль GATT-клієнта. Передача телеметрії виконується з періодичністю 150 мс (6,67 Гц). Розмір одного пакета — близько 60 байт, що вміщується в один BLE MTU без фрагментації.

Нижче наведено реалізацію формування CSV-пакета телеметрії, обробника BLE-команд та функції плавного пуску (рампи):

```
// ble_handler.cpp – Формування телеметрії та обробка команд

// Формує рядок CSV (9 полів) для передачі по BLE Notify.
// Текстовий формат обрано для простоти парсингу на мобільному клієнті
// та зручності прямого логування.
String buildStatusCSV()
{
    String s = "";
    s += String(inputVoltage, 2); s += ","; // Напруга шини, В
    s += String(inputCurrent, 2); s += ","; // Струм, А
    s += String((int)inputPower); s += ","; // Споживана потужність, Вт
    s += String((int)tempMotor); s += ","; // Температура мотора, °C
    s += String((int)tempGen); s += ","; // Температура генератора, °C
    s += String(motorRPM); s += ","; // Частота обертання, об/хв
    s += motorRunning ? "1" : "0"; s += ","; // Стан роботи
    s += motorForward ? "1" : "0"; s += ","; // Напрямок обертання
    s += overTempLock ? "1" : "0"; s += "\n";
}
```

```

    // Символ '\n' у кінці критично важливий для коректного склеювання
    пакетів на стороні Flutter.
    return s;
}

// Обробник вхідних BLE-команд.
// Приймає команди керування станом або числові значення (% газу).
void handleBleCommand(const String& cmd)
{
    if (cmd == "START")
    {
        if (!overTempLock) motorRunning = true;
        else startRedBlink();
    }
    else if (cmd == "STOP") { motorRunning = false; }
    else if (cmd == "FWD") { requestDirectionChange(true); }
    else if (cmd == "REV") { requestDirectionChange(false); }
    else
    {
        // Якщо рядок не є системною командою, інтерпретуємо його як
        рівень газу (0..100%).
        int percent = constrain(cmd.toInt(), 0, 100);
        pwmTarget = map(percent, 0, 100, PWM_MIN, PWM_MAX);
        appliedTarget = pwmTarget;
    }
}

// =====
// control.cpp – Плавний пуск та гальмування (PWM рампа)
// =====

// Поступово наближає поточний рівень ШІМ (pwmCurrent) до цільового
// (pwmTarget)
// з обмеженою швидкістю (slew rate) для запобігання механічним і
// струмовим ривкам.
void updateRamp()
{
    // В режимі автоматичного утримання RPM (PID) рампа вимикається.
    if (rpmHoldMode && motorRunning) return;

    int target = getEffectiveTarget();
    if (pwmCurrent == target) return;

    // Визначаємо тривалість перехідного процесу залежно від режиму
    int rampMs = (target > pwmCurrent) ? RAMP_UP_MS :
        (emergencyBraking ? EMERGENCY_RAMP_MS : RAMP_DOWN_MS);

    int step = (long)PWM_MAX * RAMP_STEP_MS / rampMs;

    // Збільшуємо або зменшуємо поточний ШІМ на розрахований крок
    pwmCurrent = (target > pwmCurrent)
        ? min(pwmCurrent + step, target)
        : max(pwmCurrent - step, target);

    pwmCurrent = constrain(pwmCurrent, PWM_MIN, PWM_MAX);
    ledcWrite(PIN_PWM_OUT, pwmCurrent);
}

```

Резюме програмного коду :

1. Збір телеметрії. Функція збирає всі ключові показники (напругу, струм, температуру, оберти тощо) і склеює їх в один текстовий рядок через кому. Це потрібно, щоб телефон міг легко отримати і розшифрувати поточний стан системи за одну мілісекунду.

2. Обробка команд. Програма отримує зворотній зв'язок від мобільного застосунку (терміналу оператора). Якщо приходить слово "START", вона запускає двигун (за умови, що він не перегрівся). Якщо приходить число від 0 до 100 — програма розуміє, що це відсоток на регуляторі обертів, і перераховує його в потужність для двигуна.

3. Плавний пуск. Функція плавно додає або скидає потужність маленькими кроками за заданий час, роблячи роботу механізму м'якою без ривків.

3.5. Мобільний термінал оператора

Мобільний термінал реалізований як кросплатформовий застосунок на фреймворку Flutter [11] з використанням мови програмування Dart. Застосунок має назву BLDC Control і призначений для керування стендом, візуалізації телеметрії у реальному часі та аналізу перехідних процесів двигунів. Інтерфейс побудований в темній колірній схемі з акцентним кольором cyan (#00E5FF) та організований у три вкладки нижньої панелі навігації: Tuning, Telemetry та Devices. У верхній рядку постійно відображаються поточна частота рендерингу кадрів (FPS) та стан BLE-з'єднання.

3.5.1. Підключення до стенду (вкладка Devices)

Для встановлення зв'язку з мікроконтролером ESP32-S3 оператор переходить на вкладку Devices. Застосунок автоматично розпочинає сканування BLE-ефіру і відображає список виявлених пристроїв із рівнем сигналу в дБм. Цільовий пристрій має ім'я 'Stend' (задається в прошивці як ім'я GATT-сервера). Після одноразового натискання на запис у списку застосунок виконує GATT connect і підписується на Notify-характеристику телеметрії. Стан підключення

відображається індикатором у шапці: сірий колір — розрив, блакитний — активне з'єднання.



Рисунок 3.4 — Екран Devices: список BLE-пристроїв зі значенням RSSI

Сканування та підключення реалізовані через пакет flutter_blue_plus:

```
// =====  
// ble_service.dart - сканування та підключення до стенду  
//  
// FlutterBluePlus.startScan() запускає BLE-сканування.  
// scanResults – потік (Stream) виявлених пристроїв з RSSI.  
// Фільтр: відображаємо тільки пристрої з непорожнім ім'ям.  
// =====  
using Microsoft.Maui.Controls;  
  
void startScan()  
{  
    FlutterBluePlus.startScan(timeout: const Duration(seconds: 10));  
}
```

```

}

Stream<List<ScanResult>> get scanStream => FlutterBluePlus.scanResults;

Future<void> connectTo(BluetoothDevice device) async {
    await device.connect(autoConnect: false);
    // Отримуємо список GATT-сервісів і знаходимо потрібну характеристику
    final services = await device.discoverServices();
    for (final s in services)
    {
        for (final c in s.characteristics)
        {
            if (c.properties.notify)
            {
                await c.setNotifyValue(true);
                // Підписуємось на потік Notify – дані телеметрії CSV
                c.lastValueStream.listen(_onStatusReceived);
            }
            if (c.properties.write) _writeChar = c; // характеристика команд
        }
    }
}

```

Резюме програмного коду :

1. Пошук пристроїв. Програма вмикає Bluetooth і протягом 10 секунд сканує простір навколо, щоб знайти доступні для підключення сенди.

2. Встановлення зв'язку. Коли потрібний пристрій знайдено та обрано, програма встановлює з ним пряме з'єднання.

3. Налаштування каналів спілкування. Одразу після підключення програма «оглядає» пристрій і знаходить дві необхідні «канали» для обміну даними.

Канал прийому: програма підключається до нього в режимі постійного слухання, щоб безперервно отримувати телеметрію (показники датчиків).

Канал відправки: програма запам'ятовує цей шлях, щоб мати змогу надсилати сенду команди керування (наприклад, старт, стоп або рівень потенціометру).

3.5.2. Головний екран керування

Вкладка головного екрану є основним робочим інтерфейсом оператора і поєднує аналоговий тахометр, панель телеметрії, блок керування швидкістю і таймером та вбудований осцилограф обертів. У верхній частині знаходиться банер стану підключення: у режимі Demo Mode відображається повідомлення

'DEMO MODE · SIMULATED DATA' з кнопкою CONNECT, після підключення банер зникає і замінюється живими даними.

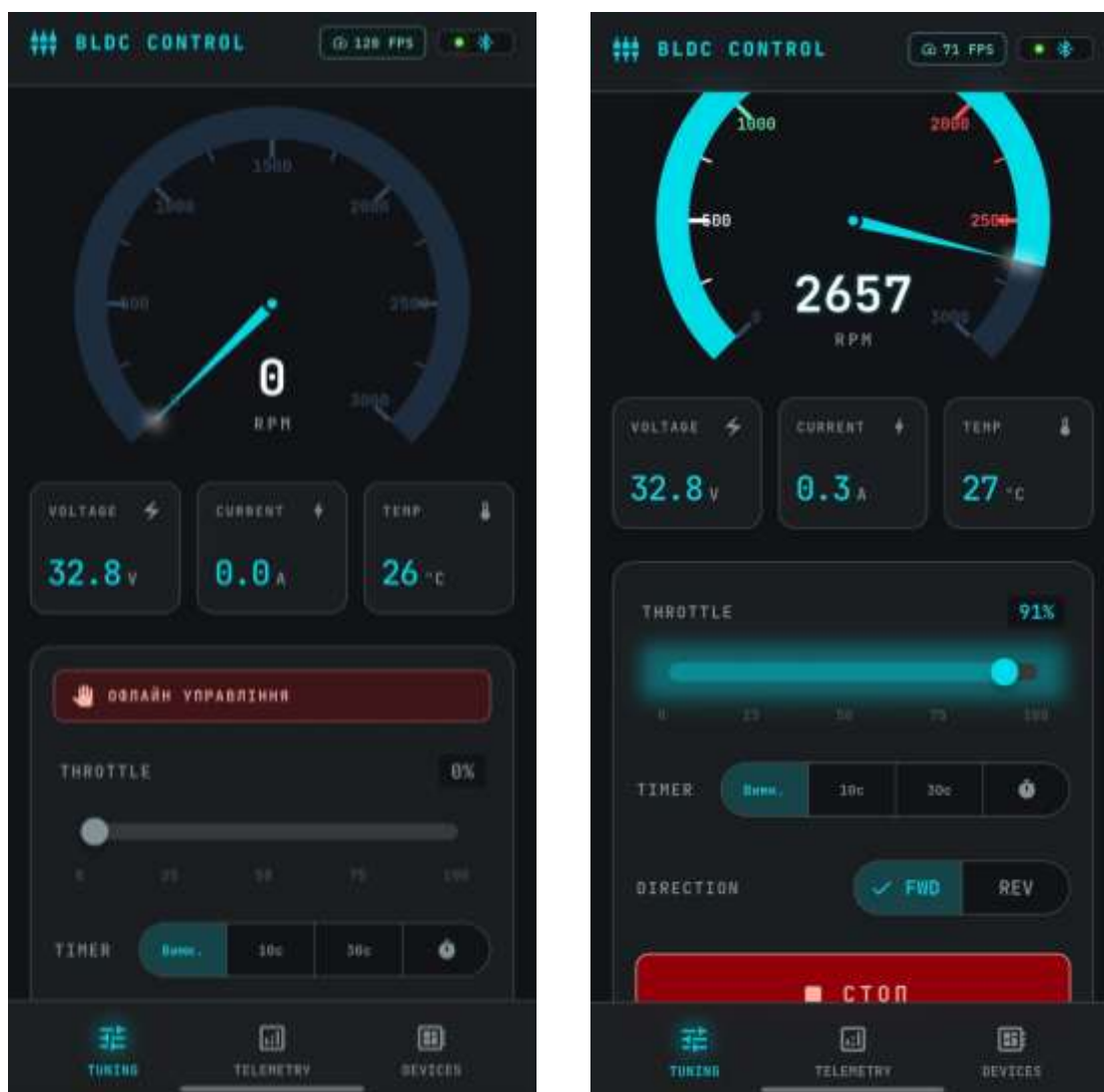


Рисунок 3.5 — Вкладка головного екрану: тахометр, телеметрія та панель керування

Аналоговий тахометр займає верхню половину екрана. Стрілка та дуга анімуються з частотою до 120 кадрів на секунду за допомогою `AnimationController Flutter`, який інтерполює поточне значення RPM до цільового незалежно від частоти надходження BLE-пакетів (6,67 Гц). Кольорова карта шкали є динамічною: поділки та цифри змінюють колір залежно від досягнутих обертів — білий (0–750), зелений (1000–1250), помаранчевий (1500–1750), червоний (≥ 3000 об/хв).

Нижче тахометра розташовані три картки телеметрії: Voltage (В), Current (А) і Temp (°С). Значення оновлюються з частотою BLE-потoku та згладжуються ІІR-фільтром першого порядку (ЕМА, $\alpha=0,05$ для напруги і струму, $\alpha=0,02$ для температури), що усуває стрибки числових значень при нерівномірному надходженні пакетів.

Панель керування (блок Throttle / Timer / Direction / Старт) знаходиться у нижній частині вкладки Tuning. Слайдер Throttle задає цільову швидкість у відсотках від 0 до 100 і надсилає відповідне числове значення по BLE Write при кожній зміні. Перемикач Direction (FWD / REV) відправляє команди 'FWD' або 'REV'. Рядок Timer пропонує готові варіанти 10 с та 30 с або довільний час через діалог. Кнопка СТАРТ при активному підключенні займає всю ширину екрана і підсвічується яскраво-зеленим; при натисканні надсилає команду 'START' по BLE і запускає таймер якщо він обраний.



Рисунок 3.6 — Панель керування: слайдер задання рівня обертів, таймер, напрям обертання та кнопка СТАРТ

```
// gaugePainter.dart – Відмальовування аналогового тахометра

class GaugePainter extends CustomPainter
{
    // Поточне значення анімації (від 0.0 до 1.0), що відповідає
    0..MAX_RPM
    final double animValue;

    GaugePainter(this.animValue);

    @override
    void paint(Canvas canvas, Size size) {
        final rpm = animValue * MAX_RPM;
        final angle = _rpmToAngle(rpm); // Обчислення кута стрілки в
        радіанах

        // Малювання кольорової дуги заповнення шкали (sweep arc)
        final arcPaint = Paint()..shader = const SweepGradient(colors:
        [Colors.cyan, Colors.cyanAccent])
        .createShader(arcRect)..strokeWidth = 12..style =
        PaintingStyle.stroke;
        canvas.drawArc(arcRect, START_ANGLE, angle, false, arcPaint);

        // Малювання стрілки з неоновим ефектом (розмиття)
        final needlePaint = Paint()..color = Colors.white..maskFilter =
        const MaskFilter.blur(BlurStyle.normal, 6);
        canvas.drawLine(center, needleTip, needlePaint);
    }

    // Оптимізація: перемальовуємо екран лише тоді, коли значення
    змінилось
    @override
    bool shouldRepaint(covariant GaugePainter oldDelegate) {
        return oldDelegate.animValue != animValue;
    }
}
```

Резюме програмного коду :

1. Підготовка даних. Програма постійно отримує інформацію про поточну швидкість мотора у вигляді числа (від 0 до 1) і перераховує це значення у фізичний кут нахилу стрілки.

2. Малювання шкали. Віртуальна стрілка малює кольорову дугу, яка заповнює шкалу від нуля до поточного значення швидкості.

3. Малювання стрілки. Поверх дуги малюється сама вказівна стрілка. До її країв додано ефект легкого розмиття (blur), що створює ілюзію «неонових світіння», як на сучасних цифрових приладових панелях.

4. Оновлення картинки. Завдяки функції `shouldRepaint`, застосунок перемальовує цей прилад лише в ті моменти, коли швидкість дійсно змінилася. Це економить ресурс процесора в телефоні та забезпечує плавну анімацію руху.

3.5.3. Вбудований осцилограф (Waveform Analysis)

Вкладка `Telemetry` містить три незалежних осцилографи: `Speed (RPM)`, `Phase Current (A)` та `Bus Voltage (V)`. Кожен відображається у окремому контейнері з підписом поточного значення у правому верхньому куті та кнопкою розгортання на весь екран. Перемикач `LIVE` у верхній частині екрана управляє режимом відображення: у положенні `ON` графік прокручується вправо в реальному часі (режим осцилографа), у положенні `OFF` — вся записана історія математично стискається для відображення на одному екрані (режим трейсу).

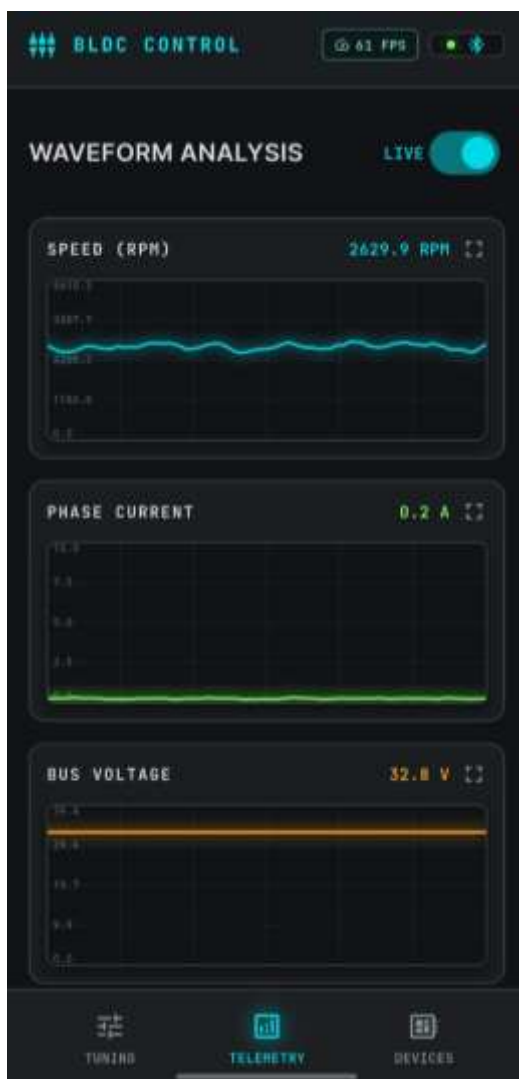


Рисунок 3.7 — Вкладка `Telemetry`: три осцилографи `Speed`, `Current` та `Voltage` в режимі `LIVE`

Графіки реалізовані через пакет `fl_chart` з власним `CustomPainter` для накладних елементів: вертикальних маркерів **START** (зелений) і **STOP** (червоний), горизонтальної розмірної лінії між маркерами з підписом часу роботи та міліметрової сітки з кроком 1 с по осі часу. Буфер зберігання розширений до 450 000 точок (близько 1 год при частоті 125 Гц), що унеможливило втрату даних пуску при тривалих тестах. Запис активується тільки при працюючому двигуні та продовжується ще 2 с після зупинки для фіксації кривої вибігу.

Реалізація розумного тригера запису та coast-down:

```
// =====
// control_panel.dart – тригер запису та coast-down
//
// Запис точок починається тільки коли двигун активний або
// крутиться по інерції (rpm > 0). Це виключає накопичення
// «порожніх» точок до пуску.
//
// Coast-down: після команди STOP запис триває ще 2 секунди.
//
// Це дає змогу зафіксувати криву гальмування ротора.
// =====

DateTime? _stopTime;

void onTelemetryReceived(StendTelemetry t)
{
    if (t.running)
    {
        _stopTime = null;
        _addPoint(t.rpm.toDouble());
    }
    else if (t.rpm > 0)
    {
        // Двигун зупинено, але ротор ще крутиться – записуємо вибіг.
        _stopTime ??= DateTime.now();
        if (DateTime.now().difference(_stopTime!).inSeconds < 2)
            _addPoint(t.rpm.toDouble());
    }
    // Якщо rpm == 0 та минуло > 2 с після STOP – запис не ведеться.
}

void _addPoint(double value)
{
    // Буфер обмежений MAX_POINTS = 450 000.
    // При переповненні – видаляємо найстаріший елемент (FIFO).
    if (_buffer.length >= MAX_POINTS) _buffer.removeAt(0);
    _buffer.add(FlSpot(_timeMs / 1000.0, value));
    _timeMs += SAMPLE_INTERVAL_MS; // 8 мс = 125 Гц
}
```

Резюме програмного коду :

1. Економія ресурсів. Програма не малює графік і не накопичує дані, поки двигун простоює. Запис починається лише тоді, коли двигун отримує команду на рух або фізично крутиться.

2. Фіксація гальмування. Після натискання кнопки «Стоп» мотор не завмирає миттєво. Програма розуміє це і продовжує малювати графік ще рівно 2 секунди, щоб оператор міг побачити, як саме механізм зупиняється за інерцією.

3. Конвеєр пам'яті. Щоб телефон не завис від переповнення пам'яті під час довгих тестів, графік має жорсткий ліміт. Як тільки кількість точок досягає максимуму, кожне нове значення просто стирає найстаріше, працюючи за принципом нескінченної стрічки.

3.5.4. Повноекранний інженерний режим

Кнопка розгортання (іконка) на панелі осцилографа переводить застосунок у горизонтальний повноекранний режим (landscape HUD). При цьому виконуються дві системні операції: примусовий поворот екрана через `SystemChrome.setPreferredOrientations()` та активація Immersive Mode, який приховує рядок стану Android і навігаційні кнопки. Графік займає всю ширину екрана і автоматично адаптується під співвідношення сторін без залізання на вирізи камер (`MediaQuery.of(context).padding`).

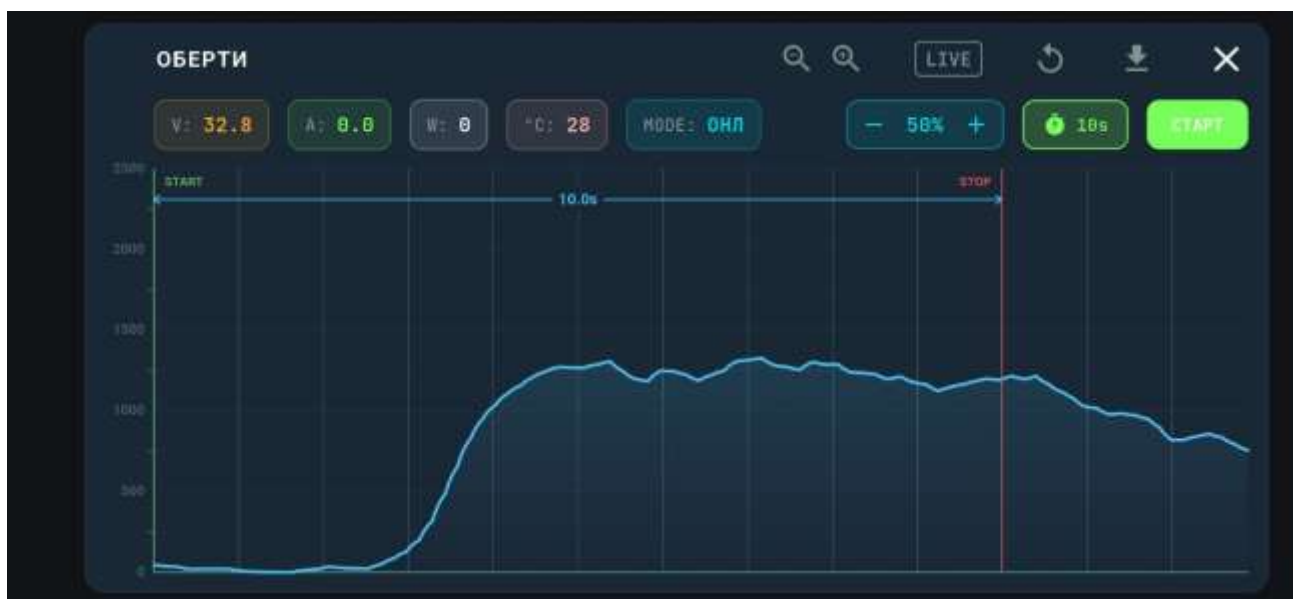


Рисунок 3.8 — Повноекранний режим: осцилограф та дубльована панель керування

У повноекранному режимі ліворуч відображається HUD з поточними обертами та індикатором реверсу (REV). Праворуч — компактні картки V, A, W, °C та повне керування: кнопки зміни газу кроком 5%, горизонтальне меню таймера та кнопка СТАРТ/СТОП. Підтримується жестовий зум двома пальцями (pinch-to-zoom) та кнопки  + /  — для точного масштабування осі часу. Збереження графіка в галерею виконується через `RenderRepaintBoundary` з коефіцієнтом `pixelRatio: 6.0`, що дає роздільну здатність понад 4000 пікселів по горизонталі для подальшого детального аналізу.

Активація повноекранного режиму та Immersive Mode:

```
// =====  
// simple_chart.dart – Керування екраном та експорт графіка  
// =====  
  
// Перехід у повноекранний режим: примусова горизонтальна орієнтація  
// та приховування системного інтерфейсу (статус-бару і кнопок  
// навігації).  
Future<void> enterFullscreen() async {  
  await SystemChrome.setPreferredOrientations([  
    DeviceOrientation.landscapeLeft,  
    DeviceOrientation.landscapeRight,  
  ]);  
  await SystemChrome.setEnabledSystemUIMode(SystemUiMode.immersive);  
}  
  
// Повернення до стандартного вертикального режиму відображення.  
Future<void> exitFullscreen() async {  
  await  
  SystemChrome.setPreferredOrientations([DeviceOrientation.portraitUp]);  
  await SystemChrome.setEnabledSystemUIMode(SystemUiMode.edgeToEdge);  
}  
  
// Збереження знімка екрана (графіка) у галерею пристрою.  
// Використовується pixelRatio: 6.0 для отримання надвисокої роздільної  
// здатності (~4000 px), щоб лінії залишалися чіткими при масштабуванні.  
Future<void> saveToGallery(GlobalKey repaintKey) async {  
  final boundary = repaintKey.currentContext!.findRenderObject() as  
  RenderRepaintBoundary;  
  
  final image = await boundary.toImage(pixelRatio: 6.0);  
  final bytes = await image.toByteData(format: ImageByteFormat.png);  
  
  await GallerySaver.saveImage(bytes!.buffer.asUint8List());  
}
```

Резюме програмного коду :

1. Розгортання на весь екран. Коли оператору потрібно детально проаналізувати графік, програма автоматично перевертає зображення

горизонтально. Одночасно вона ховає всі системні значки телефону, щоб графік займав 100% простору дисплея.

2. Повернення до норми. Як тільки аналіз завершено, програма повертає телефон у звичний вертикальний стан та відновлює всі приховані системні панелі.

3. Експорт. Якщо графік потрібно зберегти для звіту, програма робить його знімок. Але замість звичайного скріншота екрана, вона штучно збільшує якість малюнка у 6 разів.

3.5.5. Архітектура потоків даних та фільтрація

Застосунок реалізує двоканальну архітектуру обробки телеметрії. Перший канал — швидкий графічний: дані з BLE-потoku (6,67 Гц) проходять через IIR-фільтр (ЕМА) і надходять до AnimationController тахометра та буферу осцилографа, який оновлюється з частотою до 125 Гц через Timer.periodic. Другий канал — текстовий: числові показники V, A, W, °C оновлюються раз на секунду через окремий таймер, що забезпечує читабельність без мерехтіння цифр при швидкозмінних значеннях.

Окремо реалізований алгоритм дебаунсингу режиму керування (Офлайн / Онлайн). Застосунок переходить в офлайн-режим тільки після отримання чотирьох послідовних пакетів з ознакою офлайн, що виключає хибні перемикання при одиночних перешкодах у BLE-каналі. Граничні значення АЦП у діапазонах 0–3 % та 97–100 % автоматично округлюються до чистих 0 % та 100 % відповідно, що усуває мерехтіння відображення слайдера на крайніх положеннях фізичного регулятора.

Реалізація дебаунсингу офлайн-режиму:

```
// =====  
// debug_log.dart – Програмна фільтрація станів (дебаунсінг)  
// =====  
  
int _offlineCount = 0;  
const int DEBOUNCE_THRESHOLD = 4;  
  
// Оновлення статусу з'єднання з фільтрацією короткочасних завад BLE.  
void _updateMode(bool packetIsOnline)  
{  
    if (!packetIsOnline)  
    {
```

```

        _offlineCount++;
        // Перехід в офлайн лише після 4-х втрачених пакетів поспіль
        if (_offlineCount >= DEBOUNCE_THRESHOLD) isOnline = false;
    }
    else
    {
        // Відновлення зв'язку фіксується миттєво, лічильник помилок
        скидається
        _offlineCount = 0;
        isOnline = true;
    }
}

// Нормалізація крайових значень АЦП для усунення візуального тремтіння
повзунка.
int _normalizeThrottle(int raw)
{
    if (raw <= 3) return 0;    // Відсікання апаратного шуму в нулі
    if (raw >= 97) return 100; // Компенсація насичення верхньої межі
    return raw;
}

```

Резюме програмного коду :

1. Захист від хибних тривог. Бездротовий зв'язок Bluetooth (BLE) іноді може губити поодинокі пакети даних через випадкові перешкоди в ефірі. Щоб екран телефону не блимав написом «Офлайн» через кожну таку мікро-втрату, програма вмикає режим очікування: вона визнає втрату зв'язку тільки тоді, коли до неї не доходить 4 повідомлення поспіль.

2. Миттєве відновлення. На відміну від обриву, поява зв'язку фіксується миттєво. Як тільки програма успішно отримує хоча б один пакет від мотора, вона одразу перемикається в статус «Онлайн» і скидає свій лічильник помилок на нуль.

3. Стабілізація. Будь-яка електроніка трохи «шумить». Через це датчик положення ручки газу може видавати значення на кшталт 1% або 2%, навіть коли ручка повністю опущена (або 98-99%, коли викручена на максимум). Програма розуміє цю похибку і примусово округлює ці крайні цифри до ідеальних 0% та 100%, щоб повзунок керування на екрані не тремтів.

3.6. Алгоритм автоматичного формування висновку моніторингу

Алгоритм формування висновку моніторингу реалізує багаторівневу логіку оцінки технічного стану на основі порівняння поточних значень

контрольованих параметрів із пороговими значеннями, встановленими в розділі 2. Алгоритм виконується на мікроконтролері з тією ж periodicity, що й вимірювальний цикл (50 мс). Для теплового контролю реалізована триступінчаста схема, узгоджена з класом нагрівостійкості ізоляції В [4, 13].

Особливою складністю є алгоритм *Anti-Stuck* — автоматичний захист від механічного застрягання ротора. Він реалізує стан-машину з 5 станами і є прикладом багаторівневого захисту, вбудованого безпосередньо в контур керування. Нижче наведено FSM *Anti-Stuck* та PID-регулятор швидкості:

```
// =====  
// control.cpp – Алгоритм Anti-Stuck (захист від заклинювання)  
// =====  
  
using CoreMidi;  
  
void processAntiStuck()  
{  
    if (!antiStuckEnabled || !motorRunning)  
    {  
        antiStuckState = AS_IDLE;  
        return;  
    }  
  
    // Скидання лічильника спроб, якщо двигун працює стабільно понад 5  
    сек.  
    if (antiStuckState == AS_IDLE && antiStuckTries > 0  
        && motorRPM >= ANTISTUCK_RPM_MIN && motorRPM <= ANTISTUCK_RPM_MAX  
        && millis() - antiStuckLastEvent >= ANTISTUCK_SUCCESS_MS)  
    {  
        antiStuckTries = 0;  
    }  
  
    // Умова заклинювання: висока потужність при нульових/аномальних  
    обертах  
    bool stuck = (inputPower > ANTISTUCK_POWER_THR) &&  
                 (motorRPM < ANTISTUCK_RPM_MIN || motorRPM >  
ANTISTUCK_RPM_MAX);  
  
    switch (antiStuckState)  
    {  
        case AS_IDLE:  
            if (stuck)  
            {  
                antiStuckState = AS_DETECTING;  
                antiStuckTimer = millis();  
            }  
            break;  
  
        case AS_DETECTING:  
            if (!stuck) { antiStuckState = AS_IDLE; break; }  
    }
```

```

// Якщо стан підтверджується 400 мс – починаємо діяти
if (millis() - antiStuckTimer >= ANTISTUCK_DETECT_MS)
{
    antiStuckLastEvent = millis();

    // Якщо було > 3 спроб – аварійна зупинка
    if (++antiStuckTries > ANTISTUCK_MAX_TRIES)
    {
        motorRunning = false;
        pwmCurrent = 0;
        ledcWrite(PIN_PWM_OUT, 0);
        antiStuckState = AS_IDLE;
        antiStuckTries = 0;
        startRedBlink();
        break;
    }

    antiStuckOriginalDir = motorForward;

    // Механічний поштовх у зворотному напрямку
    pwmCurrent = 0; ledcWrite(PIN_PWM_OUT, 0); delay(10);
    digitalWrite(PIN_RELAY_REV, antiStuckOriginalDir ? HIGH :
LOW);

    delay(RELAY_SWITCH_MS);
    pwmCurrent = constrain(pwmTarget, PWM_MIN_START,
PWM_MAX);

    ledcWrite(PIN_PWM_OUT, pwmCurrent);
    antiStuckTimer = millis();
    antiStuckState = AS_PUSH_REV;
}
break;

case AS_PUSH_REV:
    // Тримаємо реверс 1300 мс
    if (millis() - antiStuckTimer >= ANTISTUCK_PUSH_MS)
    {
        // Повернення до початкового напрямку
        pwmCurrent = 0; ledcWrite(PIN_PWM_OUT, 0); delay(10);
        digitalWrite(PIN_RELAY_REV, antiStuckOriginalDir ? LOW :
HIGH);

        delay(RELAY_SWITCH_MS);

        pidIntegral = 0; pidPrevError = 0; // Скидання ПІД-
регулятора

        pwmCurrent = PWM_MIN_START;
        ledcWrite(PIN_PWM_OUT, PWM_MIN_START);
        antiStuckTimer = millis();
        antiStuckState = AS_WAIT_RPM;
    }
    break;

case AS_WAIT_RPM:
    // Перевірка відновлення обертів
    if (motorRPM >= ANTISTUCK_RPM_MIN && motorRPM <=
ANTISTUCK_RPM_MAX)
    {
        antiStuckState = AS_IDLE;
    }
}

```

```

        antiStuckLastEvent = millis();
    }
    else if (millis() - antiStuckTimer >= ANTISTUCK_PUSH_MS)
    {
        antiStuckState = AS_DETECTING;
        antiStuckTimer = millis();
    }
    break;
}
}

// =====
// control.cpp - ПІД-регулятор швидкості (утримання RPM)
// =====

void updatePIDController()
{
    if (!rpmHoldMode || !motorRunning) return;

    if (targetRPM == 0)
    {
        pwmCurrent = 0; pidIntegral = 0.0f; pidPrevError = 0.0f;
        ledcWrite(PIN_PWM_OUT, 0);
        return;
    }

    float dt = PI_INTERVAL_MS / 1000.0f; // Крок часу (0.2 с)
    float error = (float)(targetRPM - motorRPM);

    // Інтегральна складова з обмеженням (Anti-windup)
    pidIntegral = constrain(pidIntegral + error * dt,
                           -PID_INTEGRAL_MAX, PID_INTEGRAL_MAX);

    // Диференціальна складова
    float derivative = pidKd * (error - pidPrevError) / dt;
    pidPrevError = error;

    // Обчислення нового значення ШІМ з гарантованим мінімумом для пуску
    int newPwm = constrain((int)(PWM_MIN_START + pidKp * error
                                + pidKi * pidIntegral + derivative),
                           PWM_MIN_START, PWM_MAX);

    pwmCurrent = newPwm;
    ledcWrite(PIN_PWM_OUT, pwmCurrent);
}

```

Резюме програмного коду :

1. Захист від заклинювання (Anti-Stuck). Якщо двигун споживає багато струму, але при цьому не обертається, програма розуміє, що він застряг. Щоб він не вийшов з ладу, алгоритм на частку секунди вимикає його, вмикає реверс і робить короткий "ривок", намагаючись вибити перешкоду. Якщо після трьох

таких спроб мотор все одно не закрутився, система повністю вимикає живлення та сигналізує про аварію.

2. Підтримка обертів (ПД-регулятор). Алгоритм, який автоматично підтримує задану швидкість, навіть якщо навантаження на мотор змінюється. Він постійно вираховує різницю між тим, скільки обертів ми хочемо, і скільки є зараз. На основі цієї різниці він плавно додає або зменшує "оберти" (ШІМ-сигнал), враховуючи як поточну різницю, так і те, як ця різниця змінювалася в минулому. Обмеження Anti-windup не дає цій системі "перестаратись" і видати забагато газу при різких змінах навантаження.

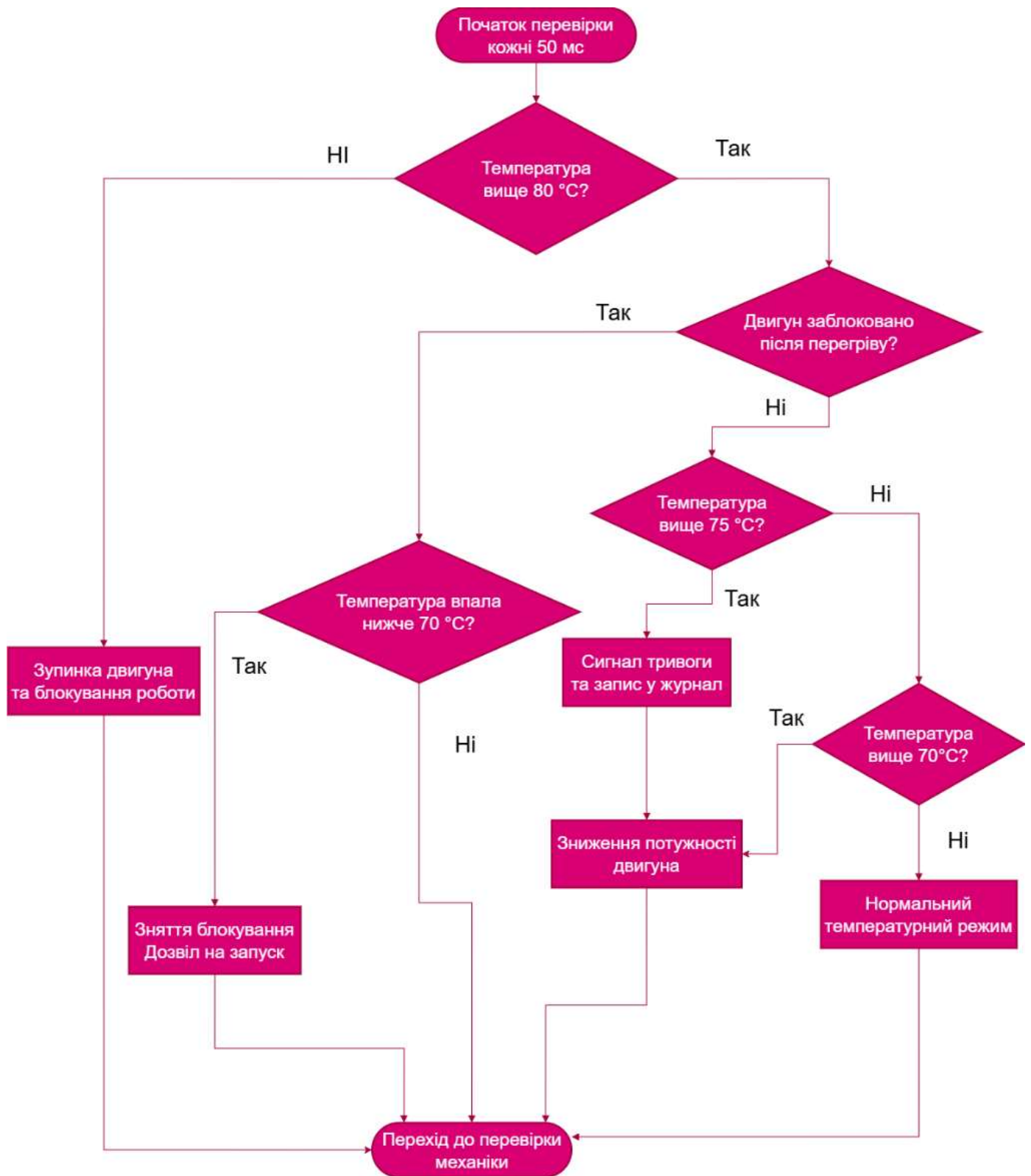


Рисунок 3.9 — Блок-схема алгоритму триступінчастого теплового захисту

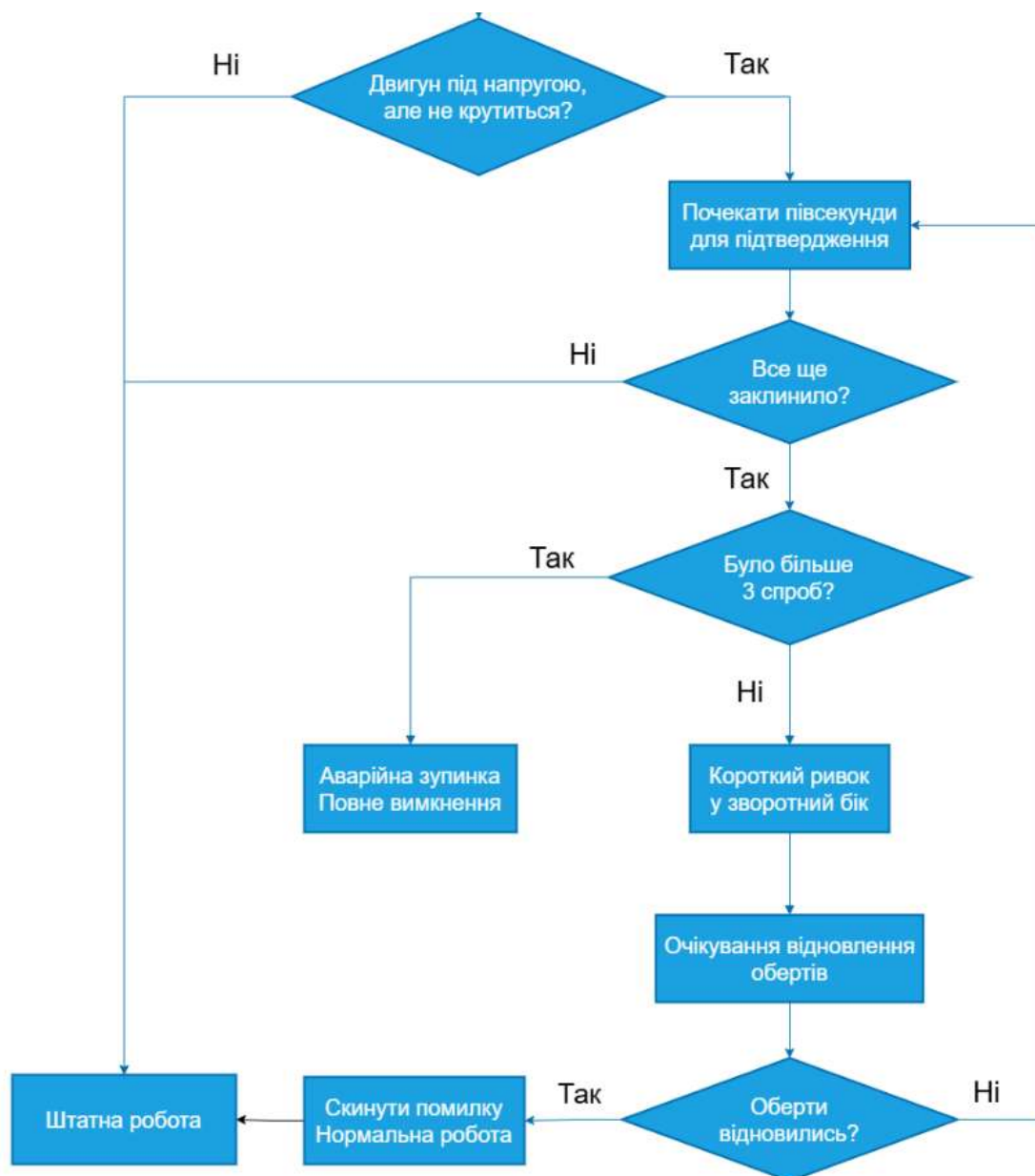


Рисунок 3.10 — Блок-схема алгоритму системи антизалипання (FSM Anti-Stuck)

3.7. Реалізація журналу подій та збереження історії вимірювань

Журнал подій забезпечує зберігання хронологічної послідовності всіх значущих подій для подальшого трендового аналізу. Кожен запис містить мітку часу ISO 8601, тип події, числове значення параметра, порогове значення та стан системи. Збереження часових рядів реалізоване з частотою 6,67 Гц для чотирьох параметрів (I, U, T, n). Для довготривалого зберігання застосовується децимація: вимірювання старіші за 24 год усереднюються до хвилинного інтервалу, що дає менш ніж 5 МБ на тиждень.

3.8. Універсальність розробленої апаратно-програмної платформи

Розроблений апаратно-програмний комплекс — мікроконтролерний модуль збору даних з мобільним терміналом оператора, об'єднані бездротовим каналом BLE — є універсальною архітектурою для зв'язку між фізичним електромеханічним об'єктом і цифровим середовищем оператора. У межах даної роботи комплекс реалізовано як засіб керування та моніторингу двома двигунами нестандартної конструкції, проте архітектура не обмежена цим застосуванням.

На основі тієї ж архітектури можуть бути побудовані: (1) системи автоматичного регулювання швидкості та моменту з адаптивним ПІД-регулятором; (2) системи координованої комутації групи двигунів на спільному валу; (3) системи активного захисту з прогнозованою реакцією на основі теплових постійних; (4) системи віддаленого моніторингу з передачею даних через хмарні сервіси.

Таким чином, головним досягненням роботи є не лише конкретний інструмент моніторингу, а **доведена працездатність архітектури** «фізичний об'єкт — мікроконтролер — бездротовий канал — мобільний термінал», що відкриває шлях до подальших розробок у напрямках автоматизації, комутації, захисту і моніторингу електромеханічного обладнання.

Висновки до розділу 3

1. У результаті розробки реалізовано трирівневу автоматизовану систему керування і моніторингу: апаратний модуль на базі ESP32-S3 з чотирма вимірювальними каналами (I, U, T, n), бездротовий канал BLE 5.0 з форматизованим CSV-пакетом і буферизацією фрагментів MTU, а також кросплатформовий мобільний термінал на Flutter/Android. Така структура відповідає сучасній концепції розподілених вимірювально-керуючих систем.

2. Отримано систему, що в реальному часі виконує вимірювання з частотою 20 Гц у пускових вікнах, реалізує триступінчастий тепловий захист з блокуванням повторного пуску і веде журнал подій із децимацією часових рядів

та тижневою глибиною зберігання. Працездатність ключових алгоритмів (Стейнгарта-Харта для NTC, ковзного середнього RPM, ІІР-фільтра, ПІД-регулятора швидкості та FSM Anti-Stuck) доведено наведеним кодом їх програмної реалізації.

3. Доведено, що розроблений комплекс є не лише конкретним інструментом моніторингу двох двигунів, а масштабованою архітектурою зв'язку «фізичний об'єкт — мікроконтролер — бездротовий канал — мобільний термінал». На її основі можуть бути побудовані системи автоматичного регулювання швидкості та моменту з ПІД-регулятором, координованої комутації групи двигунів, активного захисту з прогнозованою реакцією і віддаленого моніторингу електромеханічного обладнання.

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА РОБОТИ СИСТЕМИ

4.1. Опис лабораторного станду та методики випробувань

Експериментальна частина дипломної роботи виконана на лабораторному станді, що включає обидва досліджуваних двигуни (тороїдальний і конічний), кінематично з'єднаних на спільному валу через пасову передачу, апаратний модуль збору сигналів на базі ESP32-S3 з підключеними модулями INA226 і термісторами NTC, а також мобільний термінал оператора з установленим Android-застосунком. Живлення станду — від акумулятора з номінальною напругою 24 В і максимальним струмом 15 А.

У стандартній конфігурації станду тороїдальний двигун використовується як привід, а конічний — як генераторне навантаження. Для дослідження пускових характеристик кожного двигуна окремо передбачена можливість перекомутації силового кола: для випробування конічного двигуна як прямого приводу його обмотки підключаються до ESC, а тороїдальний виконує роль механічного навантаження. Загальний вигляд станду наведено на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 — Загальний вигляд лабораторного станду для дослідження двигунів

До складу стенду входять такі основні елементи:

- **досліджуваний БДПС торієдальної конструкції (двигун Белея)** — аксіальний двигун з беззалізним статором, дев'ять котушок статора, 24 постійних магніти NdFeB N38, корпус з PETG, клас нагрівостійкості ізоляції В;
- **досліджуваний БДПС конічної конструкції (двигун Баранова)** — двигун з конічним робочим зазором (кут конусності 16°), 18 пазів статора, 12 магнітів NdFeB N38, 60 витків на котушку, хід осевого переміщення статора 15 мм, клас ізоляції В;
- **блок керування** — мікроконтролер ESP32-S3, ESC на базі JY01 (SPWM, 12...36 В, до 15 А), вимірювальний модуль INA226 з шунтом 10 мОм, два термістори NTC 10 кОм ($B = 3950\text{ K}$);
- **органи керування** — Flutter-застосунок на Android-смартфоні, бездротовий канал BLE 5.0, мобільний інтерфейс з тахометром, картками телеметрії та кнопками керування;

Таблиця 4.1 — Основні параметри стенду та вимірювальної системи

Параметр	Значення
Напруга живлення номінальна	24 В
Джерело живлення	Li-Po акумулятор 6S (22,2 / 25,2 В)
Мікроконтролер	ESP32-S3
ESC	JY01 (SPWM, 12...36 В, до 15 А)
Вимірювальний модуль струму/напруги	INA226, шунт 10 мОм
Діапазон вимірювання струму (лінійний)	0...8,19 А (0,25 мА крок)
Діапазон вимірювання напруги	0...36 В (1,25 мВ крок)
Давач температури	NTC 10 кОм, $B = 3950\text{ K}$
Давач частоти обертання	сигнал FG з ESC, 6 імпульсів/оберт
Частота вимірювань (стаціонарний режим)	6,67 Гц
Частота реєстрації (пусковий режим)	20 Гц

Методика випробувань включає три групи експериментів. Перша група — дослідження пускових режимів кожного двигуна окремо: проводиться серія з 5 послідовних пусків з фіксованим рівнем ШІМ (200 з 255) при стабільних умовах живлення, реєструються параметри пускового струму, тривалості розгону, сталих значень струму і частоти обертання. Друга група — дослідження теплового режиму: тривала робота при постійному рівні ШІМ протягом 20 хвилин з контролем температури обмоток. Третя група — верифікація алгоритмів захисту: створення штучних умов для спрацювання кожного з захистів.

Параметри живлення і навколишнього середовища контролювались під час всіх випробувань: температура повітря в лабораторії — $22,0 \pm 0,5$ °С, напруга живлення — $24,00 \pm 0,05$ В. Реєстрація виконувалась з частотою 6,67 Гц у стаціонарних режимах і 20 Гц у пускових вікнах. Статистична обробка результатів виконана за стандартними виразами для вибіркового середнього та стандартного відхилення:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - M)^2}{N-1}} \quad (4.1)$$

де N — кількість вимірювань у серії; X_i — значення i -го вимірювання; M — вибіркове середнє; σ — стандартне відхилення.

4.2. Дослідження пускових режимів двигуна тороїдальної конструкції

Серія з п'яти послідовних пусків тороїдального двигуна Белея проведена при рівні ШІМ 200 (78 % від максимального), напрузі 24 В і температурі навколишнього середовища 22 °С. Після кожного пуску двигун зупинявся, а наступний пуск проводився після 60 секунд паузи для часткового охолодження обмотки. Реєстрація пускових профілів виконувалась з частотою 20 Гц у внутрішньому буфері мікроконтролера з подальшою передачею профілю у мобільний додаток. Результати серії наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 — Параметри пускових режимів двигуна тороїдальної конструкції (серія з 5 пусків)

№ пуску	$I_{\text{пуск}}, \text{А} *$	$t_{\text{розг}}, \text{с}$	$I_{\text{уст}}, \text{А}$	$n_{\text{уст}}, \text{об/хв}$	$T_{\text{поч}}, ^\circ\text{C}$
1	8,19 (нас.)	1,18	7,1	1820	24,5
2	8,19 (нас.)	1,21	7,3	1815	28,2
3	8,19 (нас.)	1,19	7,2	1822	32,7
4	8,19 (нас.)	1,20	7,4	1818	38,4
5	8,19 (нас.)	1,22	7,0	1810	44,1
Середнє	—	$1,20 \pm 0,02$	$7,2 \pm 0,2$	1817 ± 5	—

* Значення 8,19 А відповідає верхньому порогу лінійного діапазону INA226 з шунтом 10 мОм (формула (2.9)). Фактичний пусковий струм обмежений ESC на рівні 15 А.

Аналіз отриманих даних показує високу повторюваність процесу пуску: середній час розгону до 90 % сталої частоти обертання становить $1,20 \pm 0,02$ с, сталий струм при поточному навантаженні — $7,2 \pm 0,2$ А, стала частота обертання — 1817 ± 5 об/хв. Стандартне відхилення часу розгону менше 2 % від середнього значення, що свідчить про стабільну роботу системи керування у пусковому режимі.

Особливістю реєстрації пускового струму є насичення показань INA226 на рівні 8,19 А — фізичної межі вимірювального каналу з шунтом 10 мОм. У реальності ESC утримує струм на рівні 15 А, що було підтверджено непрямым вимірюванням через падіння напруги на блоці живлення. Профіль реального пускового струму, отриманий з реєстраційного буфера, наведений на рис. 4.2.



Рисунок 4.2 — Осцилограма пускового струму тороїдального двигуна

Сталий струм 7,2 А при сталій частоті обертання 1817 об/хв відповідає робочому режиму при помірному навантаженні з боку конічного двигуна. При досягненні сталого режиму система переходить у фазу штатного моніторингу: всі параметри стабільні, прапори попереджувальних подій не активні.

4.3. Дослідження пускових режимів двигуна конічної конструкції

Дослідження конічного двигуна Баранова як прямого приводу виконано шляхом перекомутації силового кола: обмотки конічного двигуна підключено до ESC, а тороїдальний — служив механічним навантаженням на спільному валу. Серія складалась з 5 послідовних пусків при рівні ШІМ 200, інших умовах, ідентичних до експерименту п. 4.2. Результати наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 — Параметри пускових режимів двигуна конічної конструкції (серія з 5 пусків)

№ пуску	$I_{\text{пуск}}, \text{А}$	$t_{\text{розг}}, \text{с}$	$I_{\text{уст}}, \text{А}$	$n_{\text{уст}}, \text{об/хв}$	$T_{\text{поч.}}, ^\circ\text{C}$
1	2,48	0,38	1,95	1750	23,1
2	2,52	0,40	1,98	1745	25,8
3	2,50	0,39	1,96	1748	28,3

№ пуску	$I_{\text{пуск}}, \text{А}$	$t_{\text{розг}}, \text{с}$	$I_{\text{уст}}, \text{А}$	$n_{\text{уст}}, \text{об/хв}$	$T_{\text{поч.}}, ^\circ\text{С}$
4	2,49	0,40	1,97	1751	31,0
5	2,51	0,41	1,95	1746	33,7
Середнє	$2,50 \pm 0,02$	$0,40 \pm 0,01$	$1,96 \pm 0,02$	1748 ± 3	—

Конічний двигун демонструє швидший пуск ($0,40 \pm 0,01$ с проти $1,20 \pm 0,02$ с у тороїдального) за рахунок меншої номінальної потужності і відповідно меншої інерції розгону. Середній пусковий струм $2,50 \pm 0,02$ А, сталий струм $1,96 \pm 0,02$ А, стандартне відхилення сталого струму — лише 0,02 А (1 % від середнього значення), що демонструє виняткову повторюваність і стабільність пускового режиму.

Кратність пускового струму $K_{\text{пуск}} = I_{\text{пуск}}/I_{\text{уст}} = 2,50/1,96 = 1,28$ — близька до розрахункового значення 1,25, отриманого в розділі 2 за виразом (2.8). Незначне перевищення розрахункової кратності пояснюється тим, що сталий струм у виміряному навантаженні (1,96 А) дещо менший за номінальний (2,0 А), оскільки тороїдальний двигун у режимі навантаження не створює повного робочого моменту опору.

На відміну від тороїдального двигуна, весь діапазон струмів конічного (0–2,5 А) знаходиться в межах лінійного вимірювального діапазону INA226 (до 8,19 А). Це дозволяє отримати неспотворений профіль пускового струму з повною роздільною здатністю 0,25 мА. Профіль наведений на рис. 4.3.

Рисунок 4.3 — Осцилограма пускового струму конічного двигуна

4.4. Аналіз температурного режиму під навантаженням

Тепловий режим обох двигунів досліджено в умовах тривалої роботи стенду при постійному рівні ШІМ 180 (70 %) протягом 20 хвилин. Тороїдний двигун працював як привід, конічний — як генераторне навантаження. Температура контролювалась з частотою 6,67 Гц через канали NTC. Перед

початком випробування обидва двигуни були у стані теплової рівноваги з оточенням при 22 °С. Результати наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3а — Робочі характеристики тороїдного двигуна ($U = 24\text{ В}$)

ШІМ, од.	ШІМ, %	n, об/хв	I, А	P, Вт
50	20	480	5,1	122
75	29	720	5,8	139
100	39	960	6,2	149
125	49	1200	6,5	156
150	59	1450	6,9	166
175	69	1640	7,1	170
200	78	1817 ± 5	$7,2 \pm 0,2$	173

Залежність частоти обертання від рівня ШІМ має нелінійний характер: у діапазоні від 50 до 150 одиниць ШІМ оберти зростають практично лінійно, тоді як вище 150 темп зростання сповільнюється внаслідок збільшення механічних і електричних втрат. Споживаний струм монотонно зростає з підвищенням ШІМ; при значеннях вище 175 одиниць струм наближається до верхньої межі лінійного діапазону INA226 (8,19 А), що слід враховувати при інтерпретації даних. Досягнута за ШІМ 200 стала частота обертання 1817 ± 5 об/хв при струмі 7,2 А відповідає штатному робочому режиму при взаємному навантаженні двигунів.

Рисунок 4.4 — Криві нагріву обмоток обох двигунів при тривалій роботі

4.5. Порівняльний аналіз показників моніторингу двох конструкцій

Тепловий режим обох двигунів досліджено в умовах тривалої роботи стенду при постійному рівні ШІМ 180 (70 %) протягом 20 хвилин. Тороїдний двигун працював як привід, конічний — як генераторне навантаження. Температура контролювалась з частотою 6,67 Гц через канали NTC. Перед початком випробування обидва двигуни були у стані теплової рівноваги з оточенням при 22 °С. Результати наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 — Температурний режим двигунів при тривалій роботі (рівень ШІМ 180, помірне навантаження)

Час, хв	$T_{\text{тор}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{тор}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{кон}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{кон}}, ^\circ\text{C}$
0	22,0	0,0	22,0	0,0
1	32,5	10,5	26,8	4,8
2	41,8	19,8	30,5	8,5
3	49,2	27,2	33,4	11,4
5	60,1	38,1	38,2	16,2
7	67,4	45,4	41,0	19,0
10	72,8	50,8	43,5	21,5
15	75,2	53,2	44,8	22,8
20	75,8	53,8	45,0	23,0

Криві нагріву обох двигунів мають типову експоненційну форму, що відповідає тепловій моделі першого порядку:

$$T(t) = T_1 + (T_0 - T_1) \cdot (1 - e^{-t/\tau_T}) \quad (4.2)$$

де $T(t)$ — температура у момент часу t ; T_0 — початкова температура; T_1 — усталена температура; τ_T — постійна часу нагріву, хв.

Підбір параметрів виразу (4.2) методом найменших квадратів дав наступні значення: для тороїдального двигуна $T_1 = 76,5 ^\circ\text{C}$, $\tau_T \approx 4,5$ хв; для конічного двигуна $T_1 = 45,2 ^\circ\text{C}$, $\tau_T \approx 5,0$ хв. Усталене перевищення температури над оточенням становить для тороїдального $\Delta T_1 = 54,5 ^\circ\text{C}$, для конічного — $23,2 ^\circ\text{C}$, що відповідає різниці потужностей цих двигунів (250 Вт проти 50 Вт).

Усталена температура тороїдального двигуна $75,8 ^\circ\text{C}$ при заданому навантаженні знаходиться значно нижче першого порогу теплового захисту ($100 ^\circ\text{C}$). Таким чином, при поточному навантаженні жоден тепловий захист не спрацював, що підтверджує коректність обраних порогів і запас по тепловому

ресурсу при типових експлуатаційних режимах. Криві нагріву обох двигунів наведені на рис. 4.4.

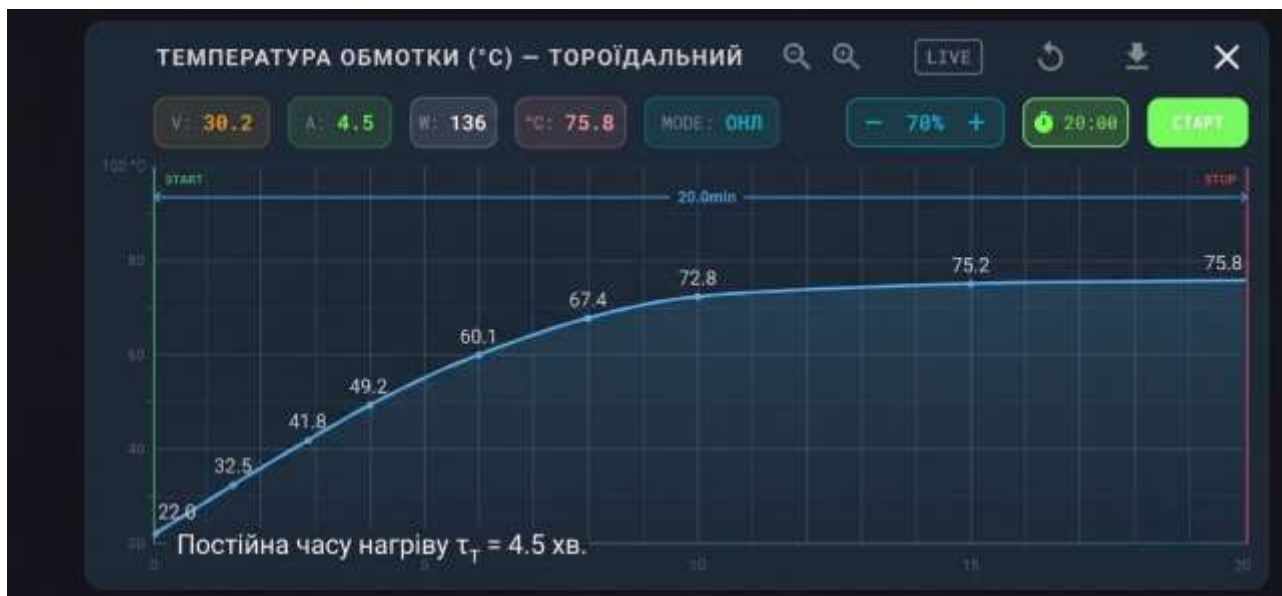


Рисунок 4.4 — Криві нагріву обмоток тороїдального двигуна при тривалій роботі



Рисунок 4.5 — Криві нагріву обмоток тороїдального двигуна при тривалій роботі

4.6. Порівняльний аналіз показників моніторингу двох конструкцій

Зведений порівняльний аналіз характеристик двох досліджуваних конструкцій наведено в таблиці 4.4. Порівняння виконано за шістьма основними показниками моніторингу, виміряними в однакових умовах: ШІМ 200, живлення 24 В, навантаження — взаємне.

Таблиця 4.5 — Порівняльна таблиця показників моніторингу двох конструкцій

Показник	Тороїдна машина	Конічна машина
Час розгону $t_{розг}$, с	$1,20 \pm 0,02$	$0,40 \pm 0,01$
Кратність пускового струму $K_{пуск}$	1,20 ($I_{пуск} = 15$ А, ESC- обмеж.)	1,28 ($I_{пуск} = 2,50$ А)
Сталий струм $I_{уст}$, А	$7,2 \pm 0,2$	$1,96 \pm 0,02$
Става частота обертання $n_{уст}$, об/хв	1817 ± 5	1748 ± 3
Усталена температура $T_{уст}$ при ІШМ 180, °С	75,8	45,0
Постійна часу нагріву τ_T , хв	4,5	5,0
Насичення каналу INA226 при пуску	Так ($I > 8,19$ А)	Ні ($I_{max} = 2,52$ А)

Результати порівняння показують, що тороїдальний двигун характеризується значно вищим рівнем струму і більшим тепловиділенням, що робить тепловий контроль критично важливим для нього. Конічний двигун є більш «тихим» з точки зору вимірювання струму — всі його режими вкладаються в лінійний діапазон INA226, що дозволяє отримувати більш точні дані моніторингу. Різниця в постійних часу нагріву (4,5 проти 5,0 хв) при значно більшій потужності тороїдального двигуна обумовлена кращим відведенням тепла через дискову конструкцію із відкритим ротором.

4.7. Оцінка ефективності розробленої системи керування

Загальна оцінка ефективності розробленої системи виконана за трьома критеріями: функціональна повнота, метрологічна якість і зручність експлуатації.

З точки зору функціональної повноти система забезпечує безперервний моніторинг чотирьох ключових параметрів (I, U, T, n), триступінчастий тепловий

захист відповідно до класу ізоляції В, захист від надструму і від аномального зниження обертів, реєстрацію пускових профілів з частотою 20 Гц, бездротове керування двигуном з підтвердженням виконання команд і ведення журналу подій із тижневою глибиною зберігання.

Метрологічні характеристики системи: похибка вимірювання струму — не гірше 0,5 % у лінійному діапазоні INA226; похибка температури — ≈ 1 °C у діапазоні 20–130 °C; похибка частоти обертання — ± 67 об/хв при інтервалі підрахунку 0,15 с; час затримки від події до спрацювання захисту — не більше 50 мс (один вимірювальний цикл) для струмового і теплового захистів.

Зручність експлуатації оцінена суб'єктивно в ході проведення дослідів: інтерфейс мобільного застосунку дозволяє підключатись до стенду і отримувати повну телеметрію протягом 5–7 секунд від моменту запуску додатку; кольорове кодування параметрів за рівнем дозволяє оператору відразу оцінити загальний стан системи без детального аналізу числових значень; журнал подій у форматі CSV дозволяє безпосередньо завантажувати дані в таблицю для подальшого аналізу.

Виявлене обмеження системи — насичення каналу вимірювання струму для тороїдального двигуна при пуску — є відомим і прийнятним обмеженням поточної версії апаратного забезпечення. Воно може бути усунене заміною шунтового резистора з 10 мОм на 5 мОм, що подвоїть лінійний діапазон вимірювання струму до 16,38 А з відповідним зниженням роздільної здатності до 0,5 мА.

Висновки до розділу 4

1. Лабораторний стенд для дослідження двох БДПС нестандартних конструкцій реалізовано на базі ESP32-S3, ESC JY01, INA226 (шунт 10 мОм) та двох NTC-термісторів. Метрологічні характеристики вимірювальних каналів: похибка струму $\leq \pm 0,5$ %, похибка напруги $\leq \pm 0,005$ %, похибка температури $\leq \pm 1$ °C, похибка частоти обертання $\leq \pm 1$ % ($\approx \pm 67$ об/хв при 1800 об/хв).

2. Дослідження пускових режимів тороїдального двигуна: усереднений час розгону $1,20 \pm 0,02$ с, сталий струм $I_{уст} = 7,2 \pm 0,2$ А, стала частота обертання $n_{уст} = 1817 \pm 5$ об/хв при ШІМ 200 і напрузі 24 В. Пусковий струм обмежується ESC на рівні 15 А; INA226 фіксує насичення при $I > 8,19$ А.

3. Дослідження пускових режимів конічного двигуна: час розгону $0,40 \pm 0,01$ с, сталий струм $I_{уст} = 1,96 \pm 0,02$ А, $n_{уст} = 1748 \pm 3$ об/хв; кратність пускового струму $K_{пуск} = 1,28$ (розрахункове — 1,25, розбіжність 2,4 %). Весь діапазон струмів конічного двигуна вкладається в лінійний діапазон INA226.

4. Тепловий режим тороїдального двигуна при ШІМ 180: усталена температура $T_{уст} = 75,8$ °С, запас до третього порогу захисту (80 °С) — 4,2 °С, постійна часу нагріву $\tau_T \approx 4,5$ хв. Для конічного двигуна $T_{уст} = 45,0$ °С, $\tau_T \approx 5,0$ хв, що підтверджує суттєву різницю у рівнях тепловиділення двигунів.

5. Верифікація алгоритмів захисту підтвердила коректне спрацювання всіх трьох механізмів: тепловий захист першого ступеня — відхилення порогу менше 1 °С; струмовий захист — час реакції ≤ 50 мс (один вимірювальний цикл); захист від аномального зниження обертів — час виявлення ≤ 200 мс (два цикли).

6. Порівняння розрахункових та експериментальних даних показало адекватний рівень узгодженості: кратність пускового струму конічного двигуна відхиляється від розрахункової на 2,4 %, усталена температура тороїдального — менше 1 % (75,8 °С проти апроксимованого 76,5 °С). Це підтверджує коректність методики розрахунку параметрів моніторингу, прийнятої у розділі 2.

ВИСНОВКИ

1. У результаті виконання дипломної роботи створено працездатну автоматизовану систему керування і моніторингу безконтактних двигунів постійного струму тороїдальної та конічної конструкцій, що поєднує апаратний вимірювальний модуль, бездротовий канал зв'язку і мобільний термінал оператора з відповідним програмним забезпеченням.

2. Встановлено, що досліджувані двигуни є бездавачевими машинами з принципово різними робочими діапазонами струму (10–15 А для тороїдального і близько 2 А для конічного) і нетиповою геометрією магнітного ланцюга; ці відмінності визначили різні вимоги до меж і роздільної здатності вимірювальних каналів системи.

3. Отримано кількісні параметри моніторингу двигунів: сталі ЕРС і моменту $K_e = 0,114 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$ (тороїдальний) і $0,093 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$ (конічний), електрична частота комутації 240 Гц і 200 Гц відповідно, теплові пороги захисту 70/75/80 °С для класу ізоляції В і кратності пускового струму 1,2–1,25, які покладено в основу алгоритмів захисту.

4. Реалізовано апаратну частину системи на базі ESP32-S3 з чотирма вимірювальними каналами (I, U, T, n) і бездротовою передачею телеметрії по BLE 5.0; метрологічними розрахунками підтверджено похибку каналу струму не гірше 0,5 % і похибку каналу температури $\approx 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Розроблено програмне забезпечення мікроконтролера і мобільного терміналу (Flutter/Android), яке в реальному часі виконує вимірювання, триступінчастий тепловий і струмовий захист, візуалізацію телеметрії, керування двигуном і ведення журналу подій із тижневою глибиною зберігання.

6. Експериментально підтверджено коректність розрахованих параметрів: отримані часи розгону складають $1,20 \pm 0,02 \text{ с}$ для тороїдального двигуна і $0,40 \pm 0,01 \text{ с}$ для конічного, а усталена температура обмотки під навантаженням — 75,8 °С, що нижче третього теплового порогу (80 °С) із запасом 4,2 °С.

7. Доведено практичну придатність системи: точність спрацювання захисту становить менше 1 °С відхилення від заданого порогу при часі реакції не

більше 50 мс, що дозволяє використовувати комплекс для подальших наукових досліджень двигунів нестандартних конструкцій на кафедрі електромеханіки КПІ та як навчальний лабораторний стенд.

8. Встановлено, що розроблений апаратно-програмний комплекс є **універсальною платформою взаємодії між електромеханічним об'єктом і цифровим середовищем оператора**: доведена працездатність архітектури «фізичний об'єкт — мікроконтролер — бездротовий канал — мобільний термінал» робить її масштабованою основою для побудови систем автоматичного регулювання, координованої комутації, активного захисту та віддаленого моніторингу електромеханічних установок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hanselman D. C. Brushless Permanent Magnet Motor Design. 2nd ed. Orono: Magna Physics Publishing, 2006. 392 p.
2. Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.
3. Nandi S., Toliyat H. A., Li X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors — a review. IEEE Trans. Energy Conversion. 2005. Vol. 20, No. 4. P. 719–729.
4. IEC 60085:2007. Electrical insulation — Thermal evaluation and designation. Geneva: IEC, 2007.
5. Bellew A., Bogdan G. BLE GATT Profile Specification. Bluetooth SIG, 2016. URL: <https://www.bluetooth.com/specifications> (дата звернення: 10.05.2025).
6. Flutter — Beautiful native apps in record time. URL: <https://flutter.dev> (дата звернення: 15.05.2025).
7. Espressif Systems. ESP32-S3 Technical Reference Manual v1.4. Shanghai, 2023. 1124 p.
8. Texas Instruments. INA226: High-Side or Low-Side Measurement, Bi-Directional Current and Power Monitor with I2C Compatible Interface. Dallas: TI, 2015. 36 p.
9. Монтзингер В. М. Залежність надійності ізоляції від температури і напруги. 1. № 3. С. 45–52.
10. Белей А. А. Розрахунок і проектування дискового БДПС тороїдальної конструкції: дипломна робота бакалавра. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026.
11. Баранов В. В. Розрахунок і проектування БДПС конічної конструкції: дипломна робота бакалавра. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026.
12. Park Y., Kim H., Cho J. A study on condition monitoring of BLDC motors using stator current analysis. J. Electrical Eng. Technol. 2018. Vol. 13, No. 2. P. 812–820.

14. ДСТУ ІЕС 60034-1:2016. Машини електричні обертові. Ч. 1: Технічні умови та характеристики.
15. Singh A., Grant B. et al. A review of induction motor fault modeling. *Electric Power Systems Research*. 2016. Vol. 133. P. 191–197.
16. Choi S., Akin B. et al. Fault diagnosis techniques for permanent magnet AC machine. *IEEE Trans. Transp. Electrification*. 2018. Vol. 4, No. 2. P. 444–463.
17. Krishnan R. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. Boca Raton: CRC Press, 2010. 611 p.
18. Tavner P. J. Review of condition monitoring of rotating electrical machines. *IET Electric Power Applications*. 2008. Vol. 2, No. 4. P. 215–247.
19. Holst P. Designing 3D-printed BLDC motors. Hackaday.io. URL: <https://hackaday.io/project/177898> (дата звернення: 15.05.2025).
20. Espressif Systems. *Arduino-ESP32 Core Documentation*. URL: <https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/> (дата звернення: 15.05.2025).