

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

**Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Децентралізована мережа автоматизованих електропідстанцій під управлінням штучного інтелекту»

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ПМ-21

Доценко Максим Олександрович _____

Керівник:

к.т.н., доцент кафедри АСНК

Нечай Сергій Олексійович _____

Рецензент:

проф., д.т.н., доцент кафедри ІВТ

Барилко Сергій Віталійович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4		Пояснювальна записка	110	
3	A1	ДПБ.ПМ-21.03.1760.001 СхС	Схема структурна	1	
4	A1	ДПБ.ПМ-21.03.1760.002 СхЕ	Схема електрична принципова	1	
5	A1	ДПБ.ПМ-21.03.1760.003 СхФ	Схема автоматизації	1	
6	A1	ДПБ.ПМ-21.03.1760.004 СхА	Блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення	2	

				ДП ПМ21.003.000		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Доценко М.О			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Нечай С.О.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ-21	
Н/контр.						
Зав.каф.	Киричук Ю.В					

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Децентралізована мережа автоматизованих
електропідстанцій під управлінням штучного інтелекту»

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Юрій КИРИЧУК**

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Доценко Максиму Олександровичу

1. Тема проєкту «Децентралізована мережа автоматизованих електропідстанцій під управлінням штучного інтелекту», керівник проєкту к.т.н. Нечай Сергій Олексійович, затверджені наказом по університету від 26.05.2026 р. № 1905-с

2. Термін подання студентом проєкту: 10 червня 2026 року _____

3. Вихідні дані до проєкту : Вихідні дані до проєкту: локальний енергетичний вузол на базі акумуляторної батареї, контролера ESP8266, цифрового монітора INA228, зовнішнього шунта 75 мВ, температурного датчика, релейного виходу керування on-grid інвертором та каналу бездротового обміну даними з хмарною платформою. _____

4. Зміст пояснювальної записки: Аналітичний огляд децентралізованих автоматизованих електропідстанцій. Розробка апаратної частини та вибір елементної бази. Розробка алгоритмів роботи та програмного забезпечення контролера. Розробка конструктивної реалізації пристрою. _____

5. Перелік графічного матеріалу: схема структурна локального енергетичного вузла, схема електрична принципова контролера, схема автоматизації, блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення. Загалом 5 аркушів формату А1

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 1.04.2026

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Ознайомлення з завданням на дипломне проєктування	5.04.2026	
2	Огляд сучасного стану електромереж у світі та Україні	25.04.2026	
3	Аналіз технологій для вирішення задач дипломного проєкту	07.05.2026	
4	Розробка структурної схеми системи та вибір елементної бази для її реалізації	14.05.2026	
5	Розробка електричної принципової схеми	18.05.2026	
6	Розробка алгоритму роботи системи	21.05.2026	
7	Оформлення текстової та графічної частини дипломного проєкту	03.06.2026	

Студент

(підпис)

Максим ДОЦЕНКО

(ім'я, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н. Сергій НЕЧАЙ

(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт присвячено розробці апаратно-програмного контролера локального енергетичного вузла децентралізованої мережі автоматизованих електропідстанцій. Актуальність роботи зумовлена потребою підвищення стійкості електропостачання, зменшення впливу пікових навантажень та можливістю використання розподілених джерел і накопичувачів енергії для підтримки енергосистеми.

У роботі розглянуто принципи побудови децентралізованої структури електропостачання, особливості роботи локального енергетичного вузла, методи моніторингу, локального захисту та диспетчерського керування. Проаналізовано фізичні основи роботи мережевих on-grid інверторів, методи їх зовнішнього керування, а також способи вимірювання постійного струму, напруги та температури.

Розроблено структуру контролера, сформовано його функціональні вимоги та обґрунтовано модульну конструкцію. Виконано вибір основних апаратних компонентів: мікроконтролера ESP8266 ESP-12F з OLED-дисплеєм, цифрового монітора напруги та струму INA228, NTC-термістора, ізольованих DC/DC-перетворювачів, релейного виходу та зовнішнього силового модуля захисту. Проведено розрахунки вимірювальних каналів, параметрів шунтів, теплового режиму силового модуля та системи живлення контролера.

Розроблено алгоритми роботи пристрою, включаючи ініціалізацію, вимірювання параметрів, розрахунок потужності та рівня заряду, локальний захист, роботу меню користувача, налаштування через конфігураційну точку доступу та обмін даними з хмарною платформою. Передбачено пріоритет локального захисту над командами хмарної платформи, що забезпечує безпечну роботу енергетичного вузла навіть у разі втрати зв'язку.

Результатом дипломного проєкту є розроблена структура, електрична принципова схема та програмна логіка контролера, який може застосовуватися для моніторингу, захисту та керування локальним енергетичним вузлом у складі децентралізованої мережі автоматизованих електропідстанцій.

Ключові слова: децентралізована мережа, автоматизована електropідстанція, локальний енергетичний вузол, ESP8266, INA228, on-grid інвертор, моніторинг, локальний захист, хмарна платформа, штучний інтелект.

ABSTRACT

The diploma project is devoted to the development of a hardware and software controller for a local energy node of a decentralized network of automated electrical substations. The relevance of the work is determined by the need to improve the resilience of power supply, reduce the impact of peak loads, and use distributed energy sources and storage systems to support the power grid.

The project considers the principles of decentralized power supply structures, the features of a local energy node, and the methods of monitoring, local protection, and dispatch control. The physical principles of on-grid inverter operation, methods of external inverter control, and methods for measuring direct current, voltage, and temperature are analyzed.

The structure of the controller was developed, its functional requirements were defined, and the modular design was justified. The main hardware components were selected, including the ESP8266 ESP-12F microcontroller module with an OLED display, the INA228 digital voltage and current monitor, an NTC thermistor, isolated DC/DC converters, a relay output, and an external power protection module. Calculations of measurement channels, shunt parameters, thermal conditions of the power module, and the controller power supply system were performed.

The operating algorithms of the device were developed, including initialization, measurement of parameters, calculation of power and state of charge, local protection, user menu operation, configuration through an access point, and data exchange with a cloud platform. The priority of local protection over cloud platform commands is provided, which ensures safe operation of the energy node even in the event of communication loss.

The result of the diploma project is the developed structure, electrical schematic, and software logic of a controller that can be used for monitoring, protection, and control of a local energy node as part of a decentralized network of automated electrical substations.

Keywords: decentralized network, automated electrical substation, local energy node, ESP8266, INA228, on-grid inverter, monitoring, local protection, cloud platform, artificial intelligence.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОПІДСТАНЦІЙ.....	10
1.1 Актуальність децентралізованої структури електропостачання	10
1.2 Автоматизована електропідстанція як локальний енергетичний вузол	11
1.3 Засоби моніторингу, захисту та керування локальним вузлом	12
1.4 Диспетчеризація децентралізованої мережі та постановка задачі дипломного проєкту.....	13
1.5 Фізичні основи роботи інверторів on-grid з енергомережею.....	15
1.5.1 Синхронізація з мережею	15
1.5.2 Передача потужності	16
1.6 Методи зовнішнього керування інверторами on-grid.....	17
1.7 Методи вимірювання постійного струму.....	19
1.8 Методи вимірювання напруги.....	22
1.9 Методи вимірювання температури.....	24
Висновки до розділу 1.....	26
2. РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ	28
2.1 Розробка структурної схеми локального енергетичного вузла	28
2.2 Функціональні вимоги та обґрунтування модульної конструкції.....	29
2.3 Аналіз та вибір мікроконтролера.....	31
2.4 Вибір датчика температури та розрахунок вимірювального каналу	35
2.5 Аналіз та вибір цифрового монітора напруги та струму	39
2.5.1 Аналіз та вибір цифрового монітора	40
2.5.2 Гальванічна розв'язка живлення та інтерфейсу цифрового монітора	43
2.5.3 Метод вимірювання напруги та розрахунок вимірювального каналу.....	44
2.5.4 Метод вимірювання струму та розрахунок параметрів шунта.....	47
2.6 Вибір зовнішнього силового модуля захисту.....	50
2.6.1 Низьковольтний силовий модуль на MOSFET IRFP4468PbF	51
2.6.2 Високовольтний силовий модуль на IGBT IRG4PC50UD	54
2.7 Розробка системи живлення контролера	59
2.7.1 Розрахунок споживання основних вузлів	60
2.7.2 Формування резервного живлення	62

2.7.3 Формування ізольованої напруги 12 В	63
2.7.4 Живлення ізольованого вимірювального вузла	64
2.7.5 Підсумкова структура системи живлення	64
2.8 Розробка електричної принципової схеми контролера	65
Висновки до розділу 2.....	66
3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОНТРОЛЕРА	67
3.1 Загальна логіка роботи контролера	67
3.2 Алгоритм ініціалізації пристрою	70
3.3 Алгоритм вимірювання та розрахунку параметрів локального вузла	75
3.4 Алгоритм локального захисту та аварійного відключення.....	83
3.4.1 Захист від глибокого розряду.....	85
3.4.2 Захист за струмом.....	85
3.4.3 Захист від перегріву	86
3.4.4 Захист при втраті зв'язку	86
3.4.5 Захист при помилці вимірювального модуля.....	87
3.4.6 Відновлення після аварії.....	87
3.5 Розробка меню користувача та системи налаштувань	89
3.5.1 Зовнішнє меню	90
3.5.2 Внутрішнє меню налаштувань.....	91
3.5.3 Налаштування акумуляторного вузла	91
3.5.4 Налаштування шунта	92
3.5.5 Потужність інвертора.....	92
3.5.6 Налаштування зв'язку.....	93
3.5.7 Збереження налаштувань.....	94
3.6 Алгоритм обміну даними з хмарною платформою	94
3.7 Опис програмної реалізації контролера.....	97
Висновки до розділу 3.....	102
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	106
ДОДАТКИ.....	109

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АЦП — аналого-цифровий перетворювач.

АКБ — акумуляторна батарея.

ВЕС — вітрова електростанція.

ДП — дипломний проєкт.

IoT — Інтернет речей.

ККД — коефіцієнт корисної дії.

МПП — мікроелектропідстанція.

ПЗ — програмне забезпечення.

СЕС — сонячна електростанція.

ШІ — штучний інтелект.

BMS — Battery Management System, система керування акумуляторною батареєю.

DC — Direct Current, постійний струм.

EEPROM — Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, електрично стираюча програмована постійна пам'ять.

ESP8266 — мікроконтролер із вбудованим Wi-Fi-модулем.

GPIO — General Purpose Input/Output, цифрові входи та виходи загального призначення.

HTTP — HyperText Transfer Protocol, протокол передавання даних у мережі.

I2C — Inter-Integrated Circuit, послідовний інтерфейс обміну даними між мікросхемами.

INA228 — цифровий монітор напруги, струму, потужності, енергії та заряду.

JSON — JavaScript Object Notation, текстовий формат обміну структурованими даними.

MOSFET — Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, польовий транзистор із ізолюваним затвором.

MQTT — Message Queuing Telemetry Transport, легкий протокол обміну повідомленнями для IoT-систем.

OLED — Organic Light-Emitting Diode, органічний світлодіодний дисплей.

SoC — State of Charge, рівень заряду акумулятора.

SPI — Serial Peripheral Interface, послідовний периферійний інтерфейс.

USB — Universal Serial Bus, універсальна послідовна шина.

Wi-Fi — бездротова технологія передавання даних.

ВСТУП

Сучасна електроенергетика активно впроваджує розподілені джерела енергії, накопичувачі та автоматизовані системи керування. У зв'язку з необхідністю підвищення надійності електропостачання актуальним є створення децентралізованих мереж локальних енергетичних вузлів, здатних накопичувати, контролювати та передавати електроенергію.

У даному дипломному проєкті автоматизована електропідстанція розглядається як локальний енергетичний вузол, до складу якого входять акумуляторна батарея, on-grid інвертор, засоби вимірювання, захисту та зв'язку. Для його роботи необхідний контролер, що забезпечує моніторинг параметрів системи, локальний захист і обмін даними з хмарною платформою.

Метою дипломного проєкту є розробка апаратно-програмного контролера локального енергетичного вузла децентралізованої мережі автоматизованих електропідстанцій.

Об'єктом проєктування є локальний енергетичний вузол децентралізованої мережі електропостачання. Предметом проєктування є апаратна структура та програмна логіка контролера, його вимірювальні канали, система живлення і засоби захисту.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати принципи побудови децентралізованих енергетичних систем, обґрунтувати вибір елементної бази, розробити електричну схему контролера та алгоритми його роботи.

Практичне значення роботи полягає у створенні контролера для моніторингу, захисту та керування локальними енергетичними вузлами з можливістю інтеграції до хмарної системи керування.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОПІДСТАНЦІЙ

1.1 Актуальність децентралізованої структури електропостачання

Електроенергетична система традиційно будується за централізованим принципом, за якого основна частина електричної енергії виробляється великими електростанціями та передається до споживачів через магістральні й розподільчі мережі. Така структура є ефективною для масового електропостачання, однак має низку вразливостей. До них належать залежність великої кількості споживачів від обмеженої кількості великих генеруючих об'єктів, складність балансування пікових навантажень, високі вимоги до стану мережевої інфраструктури та ризики масштабних відключень у разі пошкодження ключових елементів системи.

Однією з характерних проблем традиційної електромережі є пікові навантаження. Вони виникають у періоди різкого зростання споживання електроенергії та призводять до збільшення струмів у лініях, додаткового нагрівання обладнання, перевантаження трансформаторів і зниження надійності електропостачання. В умовах України ця проблема посилюється пошкодженнями енергетичної інфраструктури, дефіцитом резервних потужностей і потребою в швидкому відновленні живлення споживачів [1].

Одним із напрямів підвищення стійкості енергосистеми є використання децентралізованої структури електропостачання. У такому підході централізована мережа доповнюється локальними енергетичними вузлами, які можуть частково підтримувати споживачів, зменшувати навантаження на окремі ділянки мережі та брати участь у згладжуванні пікових режимів. Кожен окремий вузол може мати невелику потужність, проте сукупна робота багатьох вузлів здатна створити помітний ефект для мережі.

У багатьох споживачів уже з'явилися власні резервні джерела енергії: побутові акумуляторні станції, інверторні системи, сонячні електростанції та генератори. Однак без системи моніторингу та координації ці ресурси використовуються фрагментарно.

Для узгодженої роботи таких вузлів необхідні засоби автоматизації, які забезпечують вимірювання основних параметрів, локальний захист, зв'язок із сервером і виконання команд диспетчеризації. Тому подальший розгляд у дипломному проєкті зосереджується на автоматизованій електропідстанції як локальному енергетичному вузлі децентралізованої мережі.

1.2 Автоматизована електропідстанція як локальний енергетичний вузол

У межах даного дипломного проєкту автоматизована електропідстанція розглядається як локальний енергетичний вузол децентралізованої мережі. Такий вузол може мати власне джерело або буфер енергії, силове обладнання для перетворення та передавання електроенергії, засоби вимірювання, локального захисту, зв'язку та керування.

Локальний енергетичний вузол може бути побудований на основі різних джерел і накопичувачів енергії: сонячної електростанції, вітрового генератора, резервного джерела живлення, акумуляторного буфера або комбінованої системи. Конкретний склад силової частини залежить від призначення вузла, його потужності, типу джерела енергії та умов експлуатації. При цьому для включення такого вузла в загальну електромережу необхідне використання відповідного сертифікованого силового обладнання, зокрема інвертора із засобами синхронізації та захисту.

Основною задачею автоматизації такого вузла є не заміна силового обладнання, а забезпечення контролю його стану та формування керуючих команд. Для цього вузол повинен мати контролер, який отримує дані з вимірювальних каналів, виконує локальну перевірку допустимих режимів роботи, керує виконавчим елементом і передає необхідну інформацію на сервер або хмарну платформу.

У типовому вигляді автоматизований локальний вузол складається з енергетичної частини, вимірювальної частини, виконавчого елемента, модуля

зв'язку та керуючого контролера. Енергетична частина відповідає за накопичення, генерацію або передавання енергії. Вимірювальна частина забезпечує контроль основних електричних і температурних параметрів. Виконавчий елемент використовується для дозволу або заборони роботи інвертора чи силового модуля. Контролер об'єднує ці частини в єдину автоматизовану систему [2].

Таким чином, автоматизована електропідстанція в межах даної роботи розглядається як керований локальний вузол, здатний передавати інформацію про свій стан і виконувати команди диспетчерського рівня. Саме такий підхід дозволяє перейти від загальної ідеї децентралізованої мережі до практичної задачі розробки апаратно-програмного контролера одного вузла.

1.3 Засоби моніторингу, захисту та керування локальним вузлом

Для ефективної роботи локального енергетичного вузла необхідно контролювати його основні параметри. До таких параметрів належать напруга джерела або буфера енергії, струм заряду чи розряду, температура силових елементів, а також стан виконавчого виходу. На основі цих даних контролер може оцінювати поточний режим роботи вузла, визначати наявність навантаження та виявляти аварійні ситуації.

Вимірювання напруги потрібне для контролю допустимого діапазону роботи енергетичного вузла. У практичній реалізації можуть використовуватися різні діапазони вимірювання, що дозволяє застосовувати контролер як у низьковольтних, так і у відносно високовольтних системах постійного струму. Вимірювання струму дає змогу визначати фактичне навантаження, розраховувати потужність і контролювати перевищення допустимого струму. Температурний контроль необхідний для виявлення перегріву силових елементів, з'єднань або корпусу пристрою.

Окремою функцією контролера є локальний захист. Він повинен працювати незалежно від сервера, оскільки аварійна ситуація має оброблятися без очікування зовнішньої команди. До основних аварійних умов належать зниження

напруги нижче встановленого порогу, перевищення допустимого струму, перегрів і втрата зв'язку з диспетчерським рівнем. У разі виникнення таких умов контролер повинен перевести вузол у безпечний стан і заборонити подальшу передачу енергії.

Керування локальним вузлом може виконуватися через релейний вихід або інший виконавчий елемент. У найпростішому випадку контролер замикає або розмикає контакти реле, які сприймаються зовнішнім інвертором як команда дозволу або заборони роботи. Такий підхід дає змогу не втручатися у внутрішню силову частину інвертора, а використовувати його штатні входи керування. Для різних типів обладнання може застосовуватися як прямий, так і інверсний режим роботи релейного виходу.

Отже, засоби моніторингу, захисту та керування є основою автоматизації локального енергетичного вузла [3]. Вони забезпечують безпечну роботу пристрою, дозволяють контролювати фактичний стан вузла та створюють технічну можливість для його включення до децентралізованої мережі під диспетчерським керуванням.

1.4 Диспетчеризація децентралізованої мережі та постановка задачі дипломного проєкту

Децентралізована мережа автоматизованих електропідстанцій передбачає наявність багатьох локальних енергетичних вузлів, які можуть бути розміщені в різних місцях і мати різну доступну потужність. Для їх узгодженої роботи необхідний диспетчерський рівень, який отримує інформацію від вузлів, оцінює їхню готовність і формує команди керування.

У межах даного проєкту диспетчеризація розглядається у спрощеному вигляді. Хмарна платформа не виконує детального керування силовими процесами, а лише отримує мінімальний набір даних, необхідний для вибору доступних вузлів. До таких даних належать унікальний ідентифікатор пристрою, адреса встановлення, ємність енергетичного вузла у ват-годинах, максимально

можлива потужність, поточний заряд у відсотках і поточний струм. Значення струму дає змогу перевірити, чи відбулося фактичне ввімкнення інвертора та чи є передавання енергії.

З боку хмарної платформи контролер отримує дві основні команди: увімкнути передачу енергії та вимкнути передачу енергії. Остаточне виконання команди залежить від локального стану вузла. Якщо контролер виявив аварійну умову, команда на ввімкнення не повинна виконуватися, навіть якщо вона була отримана від сервера.

В ідеальному варіанті диспетчеризація такої мережі може виконуватися із застосуванням алгоритмів штучного інтелекту. Такий диспетчерський модуль міг би не лише вибирати вузли для підключення за поточними параметрами, а й частково прогнозувати потребу в додатковій потужності, очікуване навантаження мережі, доступність окремих вузлів, доцільний момент їх увімкнення та навіть частково прогнозувати аварії на вузлах енергопостачання. Для цього можуть враховуватися усі історичні дані що до стану енергомережі.

У межах даного бакалаврського дипломного проєкту повноцінна система штучного інтелекту виходить за рамки роботи, тому основною частиною є розроблення апаратно-програмного контролера локального енергетичного вузла децентралізованої мережі автоматизованих електропідстанцій. Контролер має забезпечувати вимірювання електричних параметрів, температурний контроль, локальний захист, керування виконавчим виходом, передавання даних до хмарної платформи та виконання команд диспетчеризації.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Визначити структуру локального енергетичного вузла як елемента децентралізованої мережі.
2. Сформулювати вимоги до функцій контролера, вимірювальних каналів, захистів і виконавчого виходу.
3. Обґрунтувати вибір основних апаратних компонентів контролера.
4. Розробити алгоритм роботи пристрою, включаючи вимірювання, локальний захист, обмін із сервером і керування реле.

5. Розглянути принцип диспетчерського вибору вузлів для підключення в межах децентралізованої мережі.

Подальші розділи дипломного проєкту присвячені розробці структури вузла, вибору апаратної частини контролера, опису алгоритмів роботи та перевірці запропонованої системи.

1.5 Фізичні основи роботи інверторів on-grid з енергомережею

Мережевий інвертор (on-grid) функціонує як кероване джерело струму, що працює паралельно з промисловою електромережею. Для коректної передачі енергії від локального джерела (наприклад, акумуляторної батареї) у зовнішню мережу пристрій вирішує два ключові фізичні завдання: точну синхронізацію та керовану інжекцію («проштовхування») потужності [4].

1.5.1 Синхронізація з мережею

Для безпечного підключення струм, який генерується інвертором, повинен ідеально збігатися за частотою та фазою з напругою мережі в точці підключення. Це забезпечується програмно-апаратним алгоритмом фазової автопідстройки частоти (PLL – Phase-Locked Loop). Система керування безперервно вимірює напругу мережі, обчислює її частоту (близько 50 Гц) та фазовий кут, формуючи на основі цих даних еталонний синусоїдальний сигнал для вихідного струму [5].

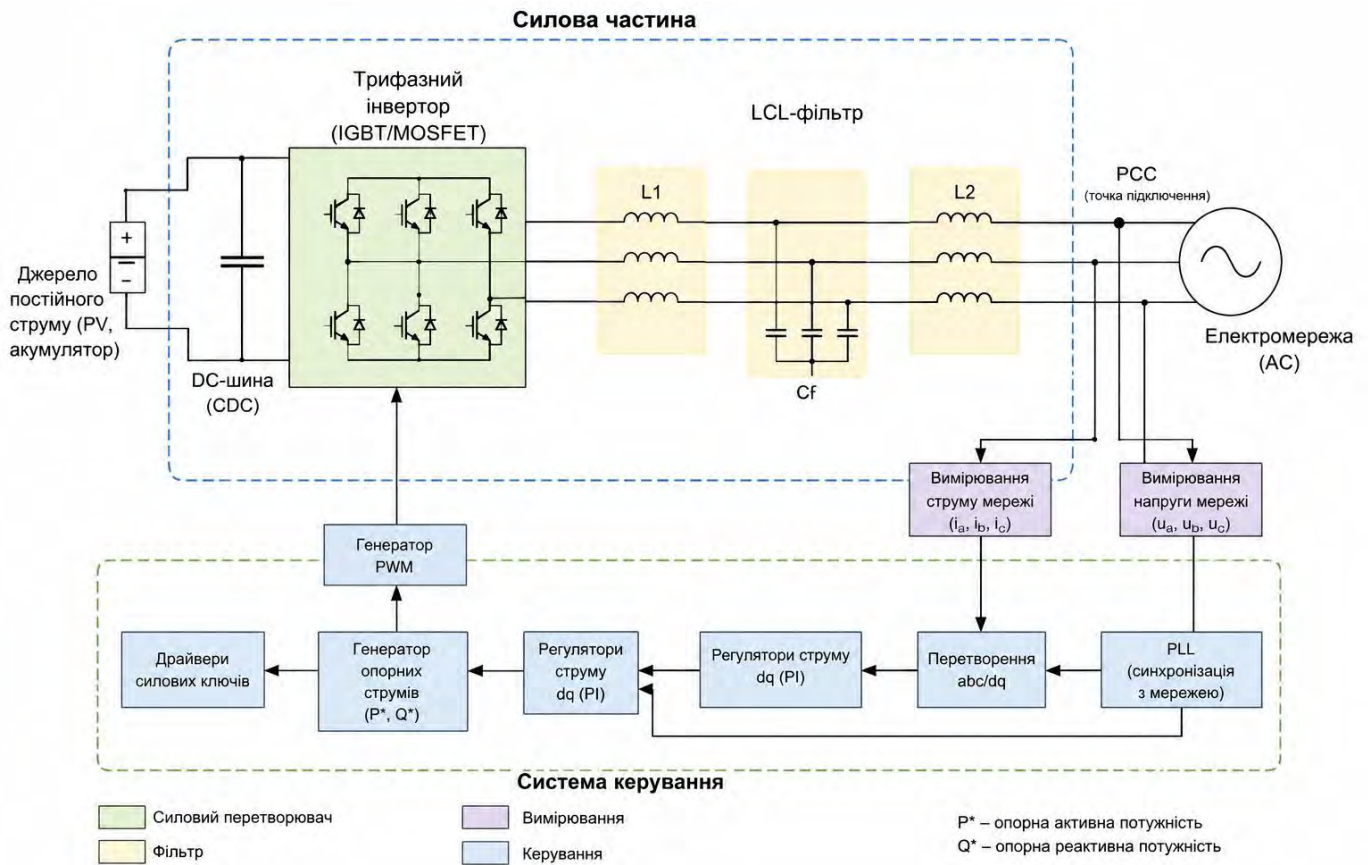


Рисунок 1.4. Узагальнена структура мережевого інвертора

1.5.2 Передача потужності

Щоб електричний струм фізично потік від інвертора в загальну мережу, необхідно створити відповідну різницю потенціалів та фазовий зсув. Передача активної потужності P в точку спільного підключення описується базовим рівнянням електротехніки [6]:

$$P = \frac{U_{inv} \cdot U_{grid}}{X_L \sin(\delta)}, \quad (1.1)$$

де U_{inv} - діюче значення напруги на виході інвертора;

U_{grid} - діюче значення напруги промислової мережі;

X_L - реактивний опір вихідного фільтра інвертора та лінії;

δ - кут навантаження (зсув фаз між векторами напруги інвертора та мережі).

Згідно з цією залежністю, для експорту енергії інвертор штучно створює мікроскопічне випередження фази своєї напруги відносно мережі і підтримує її

амплітуду на декілька вольт вищою за поточну напругу мережі. Саме ця різниця амплітуд і фаз створює електричний «напір», що фізично змушує струм перетікати від локального джерела до зовнішньої мережі [7].

1.6 Методи зовнішнього керування інверторами on-grid

У мережевих інверторах типу **on-grid** зовнішнє керування зазвичай не передбачає прямого втручання у силову частину пристрою. Синхронізація з мережею, формування струму, захисти та контроль допустимих параметрів виконуються самим інвертором. Зовнішня система керування може лише передавати інвертору команду дозволу, заборони або обмеження режиму роботи.

Одним із найпростіших способів зовнішнього керування є використання **сухого контакту** або релейного входу. У такому випадку інвертор має спеціальні клеми, замикання або розмикання яких сприймається як команда на зміну режиму роботи. Наприклад, сухий контакт може використовуватися для дистанційного вимкнення інвертора, дозволу роботи, керування зовнішнім генератором або взаємодії з системою енергоменеджменту [8]. Приклад керування зображено на рисунку 1.1.

Такий спосіб керування є зручним для простої системи диспетчеризації, оскільки контролеру достатньо змінити стан реле. При цьому силова частина інвертора залишається штатною, а розроблюваний контролер не бере участі у процесах синхронізації з мережею. Залежно від моделі інвертора може використовуватися пряма або інверсна логіка: в одному випадку замикання контакту дозволяє роботу, в іншому — навпаки, використовується для аварійного або дистанційного відключення.

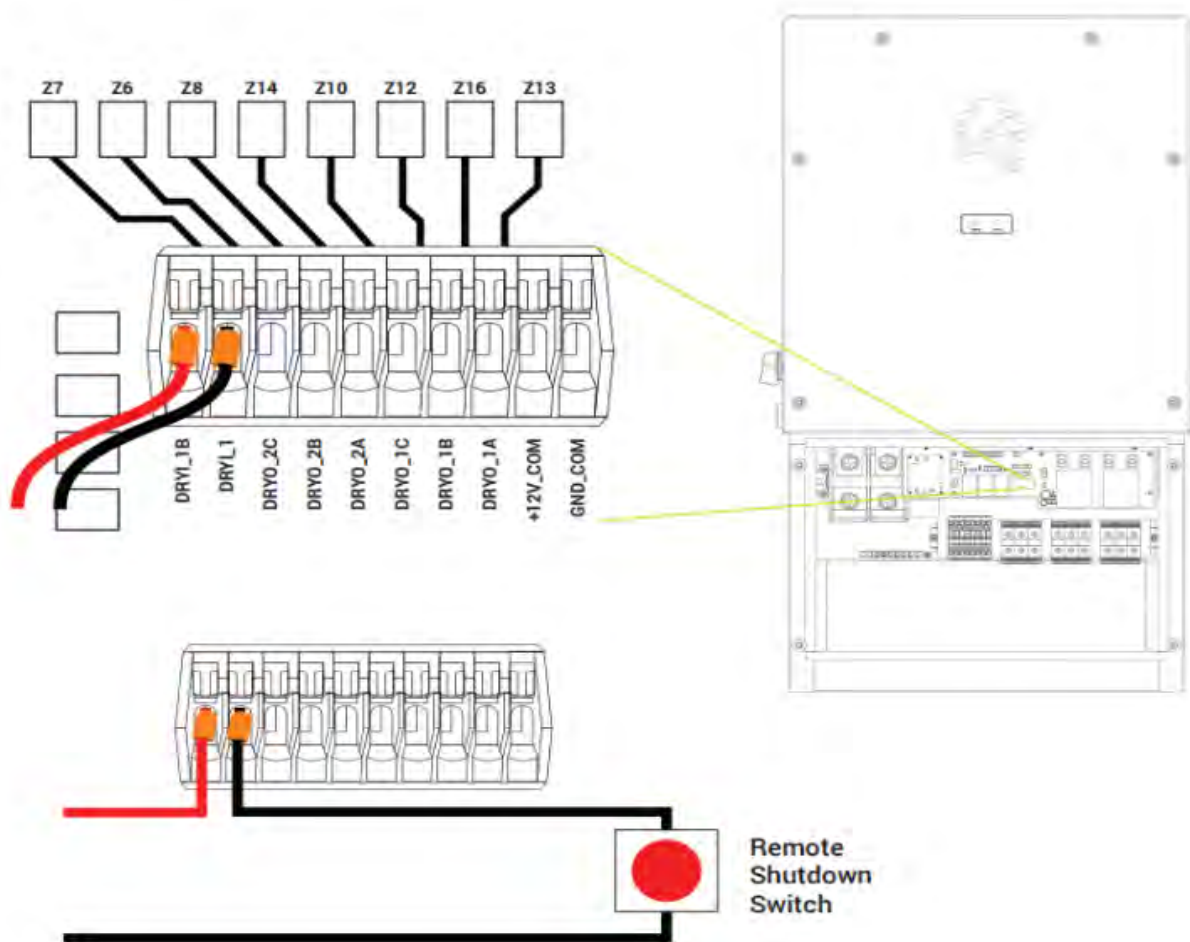


Рисунок 1.1. Приклад керування інвертором за допомогою перемикача.

Більш функціональним способом керування є використання цифрових інтерфейсів, зокрема RS-485, Modbus або Ethernet. Через такі інтерфейси можна не лише вмикати чи вимикати інвертор, а й задавати обмеження активної потужності, зчитувати поточні параметри, змінювати налаштування та інтегрувати інвертор у систему диспетчеризації або SCADA [9]. При цьому фізичний інтерфейс RS-485 та протокол Modbus є достатньо поширеними й підтримуються багатьма виробниками інверторів. Однак конкретна структура регістрів, адреси параметрів і набір доступних команд можуть відрізнятися залежно від моделі та виробника обладнання. Тому для повної сумісності системи керування зазвичай необхідна адаптація програмного забезпечення під документацію конкретного інвертора. Приклад підключення зображено на рисунку 1.2.

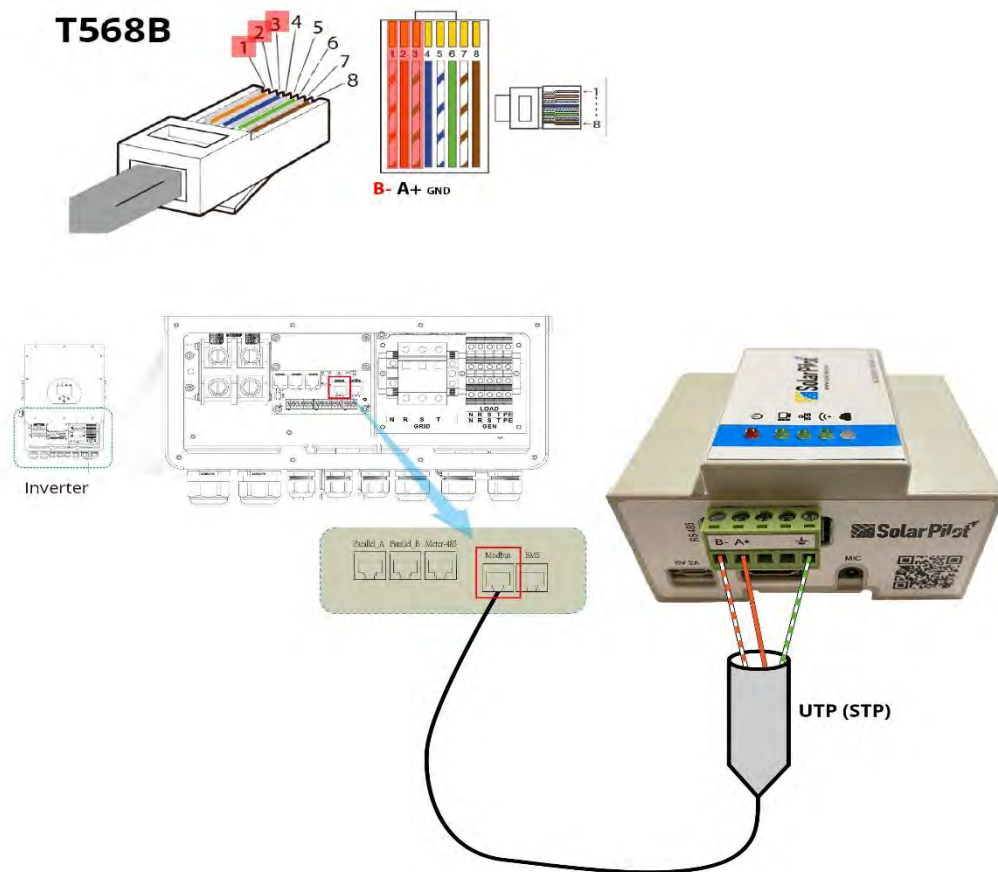


Рисунок 1.2. Приклад підключення зовнішнього контролера до інвертора через Modbus/RS-485

1.7 Методи вимірювання постійного струму

Вимірювання постійного струму є однією з основних задач у системах моніторингу енергетичних вузлів, оскільки саме струм дозволяє визначити фактичне навантаження, напрям передавання енергії, поточну потужність і перевищення допустимих режимів. У системах постійного струму застосовують кілька основних методів вимірювання: шунтовий метод, датчики на ефекті Холла, магніторезистивні та інші ізольовані сенсори струму.

1.7.1 Вимірювання за допомогою шунтового резистору

Найпростішим і поширеним методом є використання **шунтового резистора**. Шунт вмикається послідовно в силове коло, а струм визначається за падінням напруги на ньому. Згідно із законом Ома:

$$I = \frac{U_{sh}}{R_{sh}}, \quad (1.2)$$

де I - вимірюваний струм,

U_{sh} - падіння напруги на шунті,

R_{sh} - опір шунта.

Перевагами такого методу є простота, відносно висока точність, лінійність і можливість використання з високоточними вимірювальними мікросхемами. Недоліками є наявність втрат потужності на шунті та відсутність гальванічної розв'язки між силовим і вимірювальним колом [10].

$$P_{sh} = I^2 R_{sh}, \quad (1.3)$$

де P_{sh} - потужність, що розсіюється на шунті.

При великих струмах навіть малий опір шунта може призводити до помітного нагрівання, тому для силових систем використовують низькоомні шунти з номінальним падінням напруги, наприклад 50 мВ або 75 мВ. Схему вимірювання постійного струму зображено на рисунку 1.3.

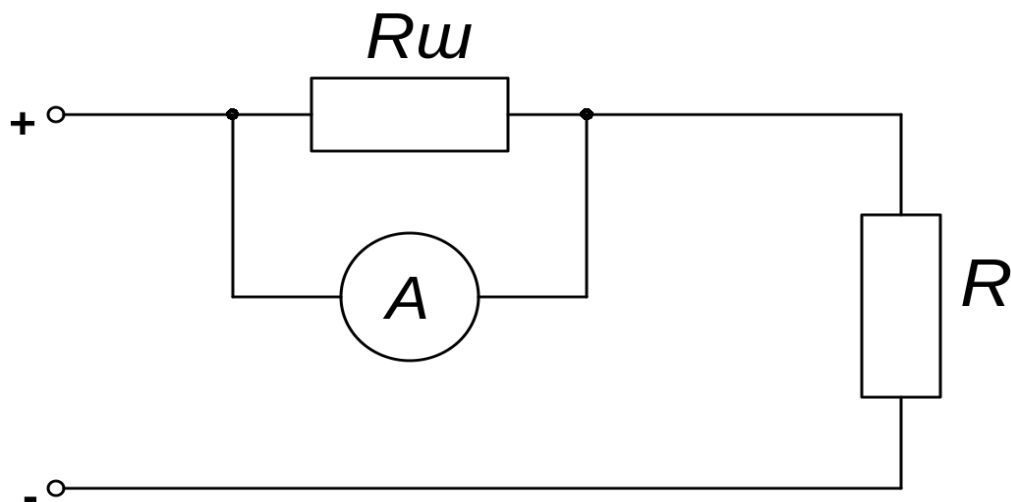


Рисунок 1.3. Схema вимірювання постійного струму за допомогою шунтового резистора

1.7.2 Вимірювання за допомогою датчиків холла

Іншим поширеним способом є використання **датчиків струму на ефекті Холла**. Принцип їх роботи ґрунтується на вимірюванні магнітного поля, яке створюється навколо провідника зі струмом. Чутливий елемент датчика Холла формує вихідний сигнал, пропорційний магнітному полю, а отже і струму в провіднику. Основною перевагою такого методу є гальванічна ізоляція, оскільки вимірювальна частина не має прямого електричного контакту із силовим колом. Також датчики Холла можуть вимірювати як постійний, так і змінний струм [11].

Недоліками датчиків Холла є залежність точності від температури, наявність початкового зміщення сигналу, обмежена точність порівняно з якісними шунтовими вимірюваннями та можливий вплив зовнішніх магнітних полів. Водночас у силових системах, де важливі безпека, ізоляція та зменшення втрат, такий метод є дуже поширеним. Принцип вимірювання зображено на рисунку 1.4.

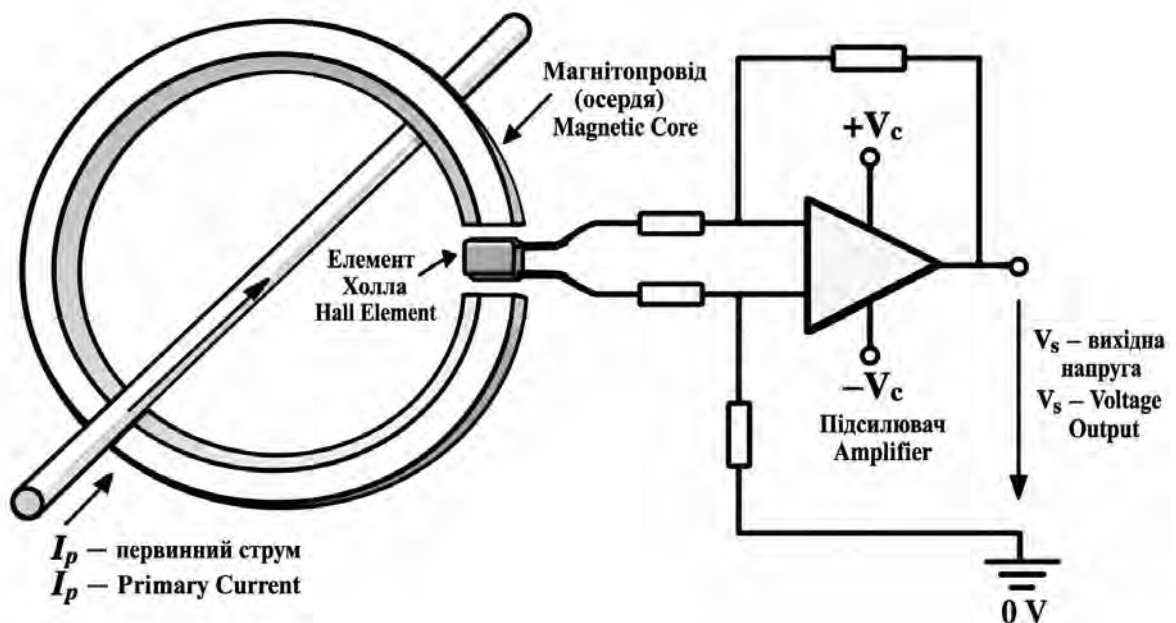


Рисунок 1.4. Принцип вимірювання струму датчиком на ефекті Холла

Також існують інші ізольовані методи вимірювання, наприклад датчики на основі магніторезистивного ефекту, fluxgate-сенсори та DC current transformer. Вони можуть забезпечувати високу точність і гальванічну розв'язку, однак зазвичай є дорожчими та складнішими у використанні.

1.8 Методи вимірювання напруги

Вимірювання напруги є необхідним для контролю стану локального енергетичного вузла, визначення допустимих режимів роботи, розрахунку потужності та реалізації захистів. У системах постійного струму напруга може вимірюватися кількома способами: за допомогою резистивного подільника, спеціалізованих мікросхем моніторингу напруги або ізольованих вимірювальних підсилювачів. Схема вимірювання зображено на рисунку 1.5.

Найпростішим способом є використання **резистивного подільника напруги**. Він складається з двох послідовно з'єднаних резисторів, які зменшують вимірювану напругу до рівня, допустимого для входу аналого-цифрового перетворювача або вимірювальної мікросхеми. Вихідна напруга подільника визначається за формулою:

$$U_{out} = U_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (1.4)$$

де U_{in} - вхідна напруга,

U_{out} - напруга на виході подільника,

R_1 і R_2 - опори резисторів подільника.

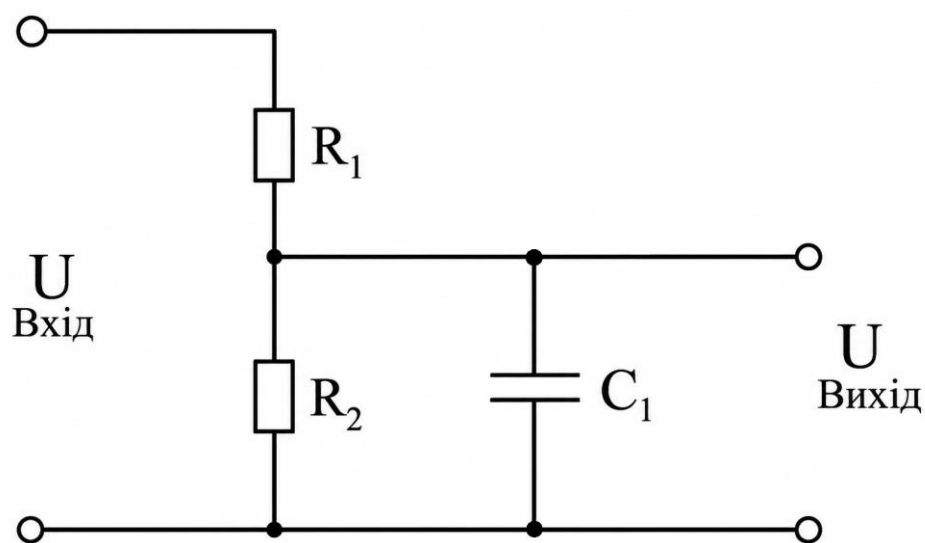


Рисунок 1.5. Схема резистивного подільника напруги для вимірювання постійної напруги

Перевагами такого методу є простота, низька вартість і можливість вимірювання напруг, які перевищують допустимий рівень входу мікроконтролера. Водночас точність вимірювання залежить від допуску резисторів, їх температурного коефіцієнта, стабільності опорної напруги АЦП та вхідного опору вимірювального каналу. При вимірюванні високих напруг також необхідно враховувати допустиму потужність резисторів, електричну міцність, нагрівання та безпечні зазори на друкованій платі [12].

Для підвищення точності та зручності вимірювання можуть застосовуватися **спеціалізовані монітори напруги**, які мають вбудовані АЦП, цифровий інтерфейс і засоби обробки результатів. Такі мікросхеми дозволяють передавати виміряні значення до мікроконтролера у цифровому вигляді, зменшуючи вплив шумів на лініях зв'язку та спрощуючи програмну обробку.

У високовольтних або промислових системах можуть використовуватися **ізольовані методи вимірювання напруги**. Вони передбачають застосування ізоляційних підсилювачів, оптичних або магнітних ізоляторів, що дозволяє передати вимірювальний сигнал між силовою та керуючою частинами без прямого електричного з'єднання. Такий підхід підвищує безпеку й захищає мікроконтролерну частину від високої напруги, однак ускладнює схему та збільшує вартість пристрою [13]. Приклад такого вимірювання зображено на рисунку 1.6.

Отже, вибір методу вимірювання напруги залежить від діапазону напруг, вимог до точності, наявності гальванічної розв'язки, вартості та складності схеми. Для простих низьковольтних систем достатньо резистивного подільника, тоді як для високовольтних і промислових застосувань доцільно використовувати ізольовані вимірювальні рішення або спеціалізовані мікросхеми моніторингу.

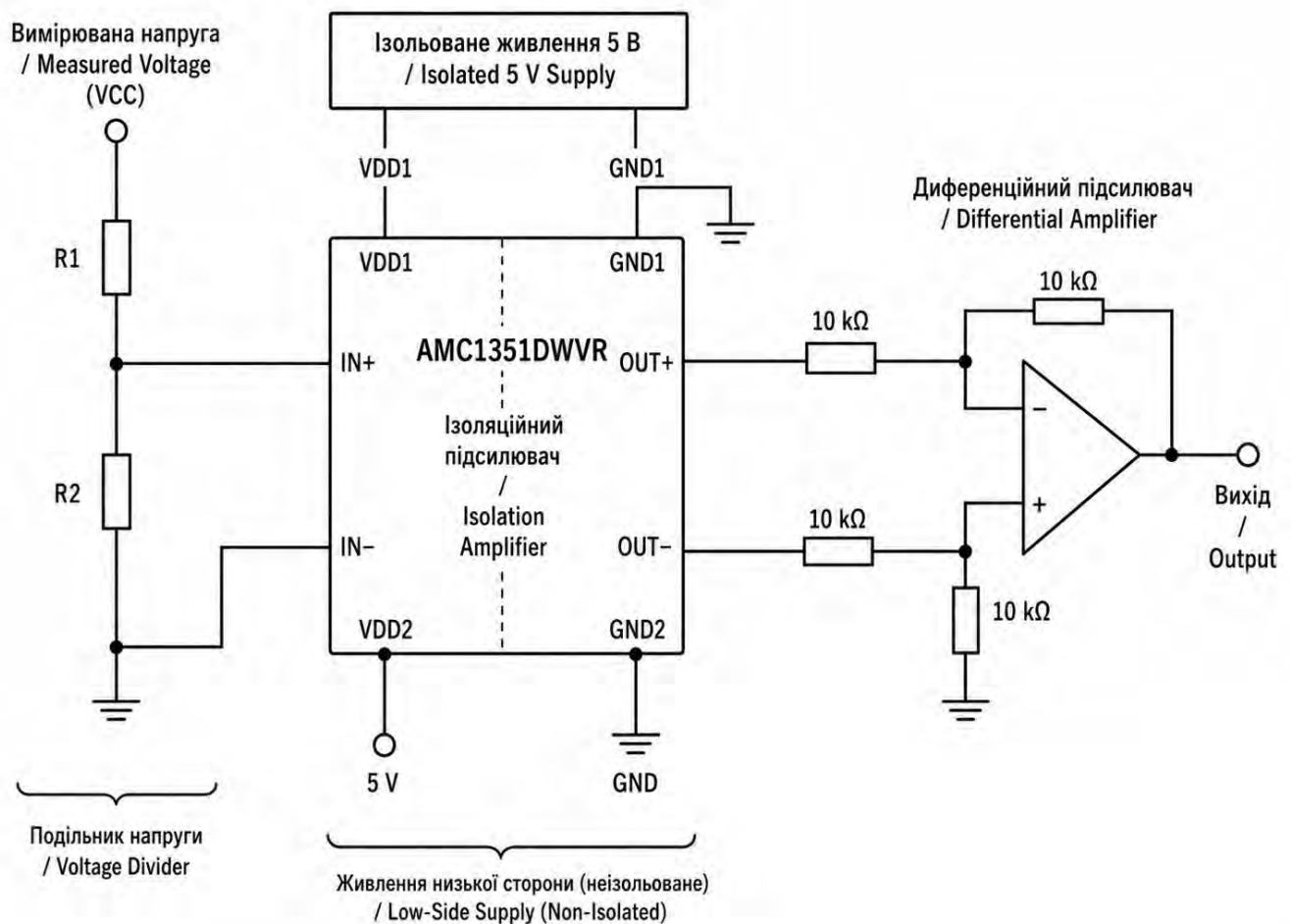


Рисунок 1.6. Приклад ізольованого вимірювання напруги за допомогою ізоляційного підсилювача

1.9 Методи вимірювання температури

Вимірювання температури є важливим для контролю стану силових елементів, провідників, з'єднань, корпусу пристрою та енергетичного вузла загалом. Перегрів може свідчити про перевантаження, поганий контакт, недостатнє охолодження або несправність силової частини. У системах автоматизації найчастіше застосовують термістори, резистивні датчики температури, термопари та інтегральні температурні датчики.

Одним із поширених методів є використання **термісторів**. Термістор — це напівпровідниковий резистивний елемент, опір якого змінюється залежно від температури. Найчастіше використовуються NTC-термістори, у яких опір

зменшується зі зростанням температури. Такі датчики мають невелику вартість, компактні розміри та достатню чутливість, однак їхня характеристика є нелінійною і потребує програмної або схемної компенсації [14]. Приклад підключення NTC-термістора зображено на рисунку 1.7.

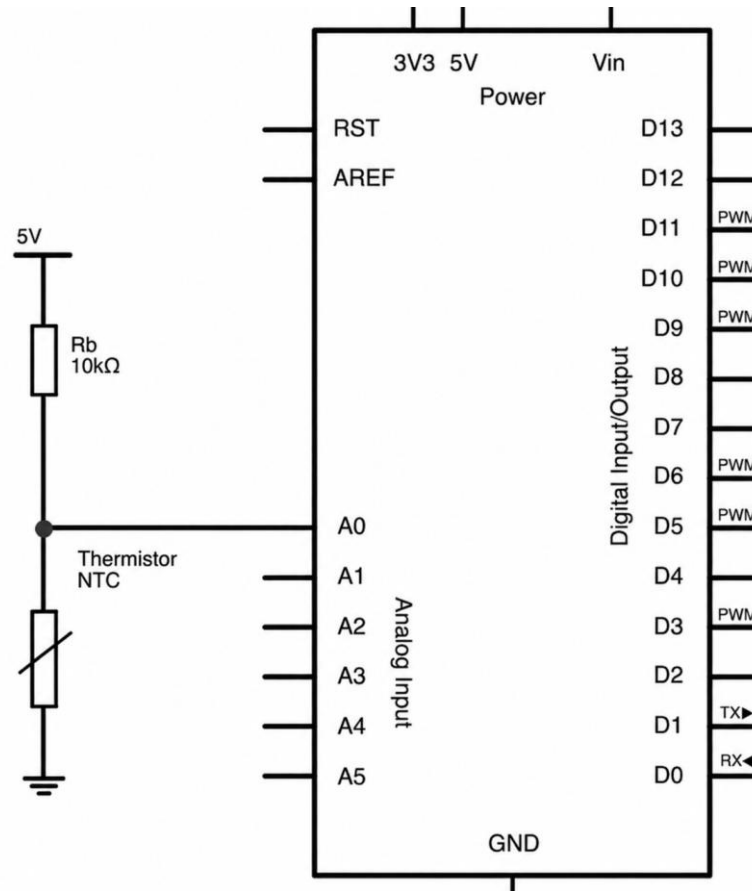


Рисунок 1.7. Приклад підключення NTC-термістора до вимірювального входу мікроконтролера

Для точніших вимірювань можуть застосовуватися **резистивні датчики температури** — RTD. Вони виготовляються з металів, опір яких змінюється майже лінійно зі зміною температури. Найпоширенішим прикладом є платиновий датчик Pt100 або Pt1000. RTD забезпечують високу точність і стабільність, але зазвичай є дорогими та потребують точнішої вимірювальної схеми [15].

Ще одним методом є використання **термопар**. Термопара складається з двох різних металів, між з'єднаннями яких виникає термоелектрична напруга, що залежить від різниці температур. Перевагою термопар є широкий діапазон вимірювання та можливість роботи при високих температурах. Недоліками є мала

величина вихідного сигналу, потреба в підсиленні та компенсації температури холодного спаю [16].

Основні типи датчиків температури зображено на рисунку 1.12.

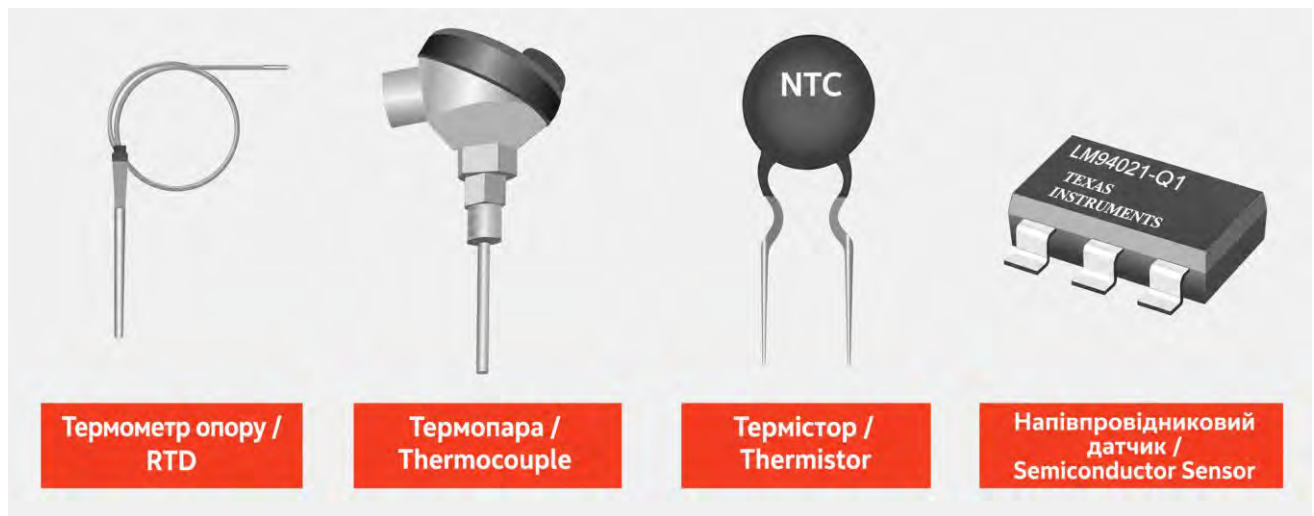


Рисунок 1.12. Основні типи датчиків температури: RTD, термопара, термістор, та інтегральний датчик

У мікропроцесорних системах також часто використовуються інтегральні температурні датчики з аналоговим або цифровим виходом. Вони містять чутливий елемент і схему обробки сигналу в одному корпусі, що спрощує підключення до контролера. Такі датчики зручні для контролю температури плати, корпусу або окремих силових елементів, однак їх температурний діапазон зазвичай менший, ніж у термопар.

Отже, вибір методу вимірювання температури залежить від необхідного діапазону, точності, швидкодії, вартості та умов встановлення датчика. Для простих систем контролю перегріву достатньо термісторів або інтегральних датчиків, тоді як для промислових і високотемпературних застосувань доцільніше використовувати RTD або термопари.

Висновки до розділу 1

У першому розділі розглянуто передумови створення децентралізованої мережі автоматизованих електропідстанцій та обґрунтовано доцільність

використання локальних енергетичних вузлів для підвищення стійкості електропостачання і зменшення пікових навантажень.

Автоматизовану електропідстанцію в межах роботи розглянуто як локальний енергетичний вузол, що містить джерело або накопичувач енергії, on-grid інвертор, засоби вимірювання, захисту, зв'язку та керування. Визначено, що основною задачею є розробка контролера для моніторингу, локального захисту та взаємодії з хмарною платформою.

Проаналізовано основні функції вузла: вимірювання напруги, струму і температури, розрахунок потужності, контроль аварійних режимів та передавання даних. Встановлено, що локальний захист повинен працювати автономно та мати пріоритет над зовнішніми командами.

Також розглянуто принципи роботи on-grid інверторів і методи вимірювання електричних та температурних параметрів, що стало основою для подальшого вибору елементної бази.

Отже, у розділі сформовано теоретичну основу для розробки апаратно-програмного контролера локального енергетичного вузла, якій присвячені наступні розділи роботи.

2. РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ

2.1 Розробка структурної схеми локального енергетичного вузла

На основі аналізу, проведеного в першому розділі, локальну автоматизовану електропідстанцію доцільно розглядати як окремий енергетичний вузол децентралізованої мережі. Такий вузол повинен мати власне джерело або буфер енергії, засоби вимірювання основних параметрів, локальний захист, виконавчий елемент керування та канал зв'язку з хмарною платформою.

Структурна схема локального енергетичного вузла наведена на рисунку 2.1 та в додатку А.

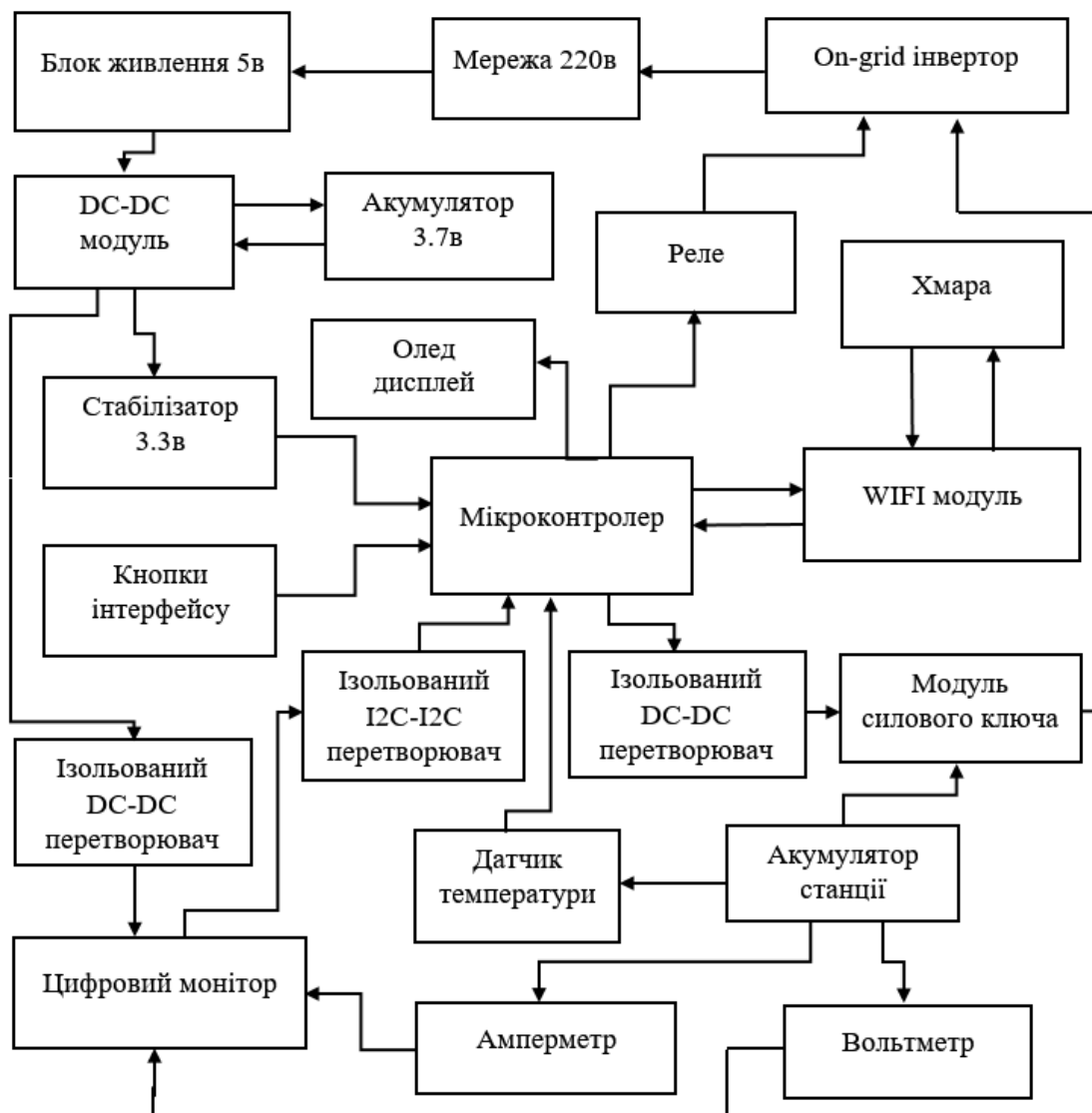


Рисунок 2.1. Структурна схема локального енергетичного вузла

Основним елементом системи є контролер, який виконує збір даних з вимірювальних каналів, обробку отриманих значень, перевірку аварійних умов, керування виконавчим виходом і передавання даних до хмарної платформи. До контролера підключаються канали вимірювання напруги, струму та температури. Вимірювання струму виконується через зовнішній шунт, що дозволяє адаптувати пристрій до різних діапазонів струму залежно від параметрів конкретного енергетичного вузла.

Передавання енергії в мережу здійснюється за допомогою зовнішнього on-grid інвертора. Розроблюваний контролер не виконує функцій силового інвертора та не здійснює синхронізацію з електромережею. Його задача полягає у формуванні керуючого сигналу для дозволу або заборони роботи інвертора, а також у контролі стану локального вузла.

Для підвищення безпеки у структурі передбачено зовнішній силовий модуль захисту, який може розривати силове коло джерела або буфера енергії у разі аварійного режиму. Керування цим модулем виконується сигналом від контролера. Такий підхід дозволяє відокремити слабкострумову керуючу частину від силової частини, параметри якої можуть змінюватися залежно від потужності конкретної установки.

Хмарна платформа використовується для отримання мінімального набору даних від вузла та передавання команд диспетчеризації. У такій структурі локальний вузол залишається автономним з погляду захисту, але може бути включений до загальної децентралізованої мережі для узгодженої роботи з іншими вузлами.

2.2 Функціональні вимоги та обґрунтування модульної конструкції

Для забезпечення роботи локального енергетичного вузла контролер повинен виконувати функції вимірювання, локального захисту, керування виконавчими елементами та обміну даними з хмарною платформою. Основні функціональні вимоги до пристрою наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Функціональні вимоги до контролера локального енергетичного вузла

№	Функція	Вимога до реалізації
1	Вимірювання напруги	Контроль напруги джерела постійного струму. Основний діапазон вимірювання — до 85 В, розширений діапазон через додатковий подільник напруги — до 500 В
2	Вимірювання струму	Вимірювання струму заряду або розряду через зовнішній шунт. Передбачити можливість задання номінального струму шунта та падіння напруги на ньому
4	Вимірювання температури	Контроль температури силових елементів або корпусу пристрою. Аварійний поріг перегріву — 60 °C
5	Розрахунок параметрів	Розрахунок потужності за виміряними значеннями напруги та струму, а також орієнтовного стану заряду енергетичного вузла
6	Захист від низької напруги	Користувач повинен мати можливість задати напругу повного заряду та повного розряду джерела енергії
7	Захист за струмом	Струм спрацювання захисту визначається на основі максимальної потужності інвертора та напруги джерела
8	Захист при втраті зв'язку	У разі втрати зв'язку з хмарною платформою контролер повинен переводити вузол у безпечний стан
9	Керування інвертором	Формування дискретного сигналу дозволу або заборони роботи on-grid інвертора через релейний вихід
10	Керування зовнішнім силовим модулем	Формування керуючого сигналу 12 В для зовнішнього силового модуля захисту або відключення
11	Обмін із хмарною платформою	Передавання ID пристрою, адреси встановлення, ємності вузла, максимальної потужності, поточного заряду та струму
12	Локальний інтерфейс	Відображення основних параметрів на OLED-дисплеї та зміна налаштувань за допомогою кнопок
13	Резервне живлення	Забезпечення роботи контролера від акумулятора 21700 через модуль резервного живлення

Оскільки локальні енергетичні вузли можуть суттєво відрізнятися за напругою, струмом, потужністю інвертора та типом силового обладнання, конструкцію контролера доцільно виконати за модульним принципом. Універсальною частиною пристрою є основний модуль керування, який містить мікроконтролер, дисплей, кнопки, модуль зв'язку, систему живлення та виходи керування. Вузли, параметри яких залежать від конкретної установки, доцільно винести в окремі зовнішні модулі.

До таких змінних частин належать зовнішній шунт, силовий модуль захисту, а також частина вимірювального тракту для розширеного діапазону напруги. Зовнішній шунт може мати різний номінальний струм і падіння напруги, наприклад 100 А / 75 мВ, 200 А / 75 мВ або 500 А / 75 мВ. Тому контролер повинен дозволяти задавати параметри шунта в налаштуваннях і виконувати перерахунок вимірюваного падіння напруги у значення струму.

Силовий модуль також доцільно винести окремо, оскільки струм і напруга силового кола можуть бути різними для різних енергетичних вузлів. У малопотужних системах може використовуватися транзисторний ключ, тоді як у потужніших установках доцільним є застосування контактора або окремого силового модуля. Основний контролер у такому випадку формує лише керуючий сигнал, а силове комутування виконується зовнішнім модулем.

2.3 Аналіз та вибір мікроконтролера

Мікроконтролер є центральним елементом розроблюваного контролера локального енергетичного вузла. Він повинен забезпечувати зчитування даних із вимірювальних мікросхем, обробку параметрів, керування виконавчими елементами, роботу локального інтерфейсу та обмін даними з хмарною платформою. Тому при виборі мікроконтролера враховувалися такі вимоги:

1. наявність або можливість реалізації бездротового зв'язку;
2. підтримка цифрового інтерфейсу I2C для роботи з вимірювальним вузлом та OLED-дисплеєм;

3. достатня кількість входів і виходів для кнопок, реле, датчика температури та керуючих сигналів;
4. достатня продуктивність для обробки вимірювань, меню користувача та обміну з сервером;
5. доступність, невисока вартість і простота програмування.

Для порівняння було розглянуто кілька поширених платформ: Arduino Nano, ESP8266, ESP32 та STM32F103C8T6.

Arduino Nano

Переваги:

- ❖ простота програмування;
- ❖ велика кількість прикладів і бібліотек;
- ❖ достатня кількість GPIO для нескладних проєктів.

Недоліки:

- ❖ відсутність вбудованого Wi-Fi;
- ❖ обмежений обсяг пам'яті;
- ❖ нижча продуктивність порівняно з сучасними платформами.

Доцільність використання:

Arduino Nano підходить для простих автономних пристроїв, однак для взаємодії з хмарною платформою потребує додаткового Wi-Fi-модуля, що ускладнює схему та збільшує вартість системи.

ESP8266

Переваги:

- ❖ вбудований Wi-Fi-модуль;
- ❖ достатня продуктивність для задач моніторингу та керування;
- ❖ підтримка інтерфейсу I2C через GPIO;
- ❖ низька вартість;
- ❖ широке поширення в IoT-пристроях.

Недоліки:

- ❖ обмежена кількість зручних GPIO;
- ❖ робота з логічними рівнями 3,3 В;
- ❖ необхідність врахування особливостей завантажувальних виводів.

Доцільність використання:

ESP8266 добре підходить для пристроїв з віддаленим моніторингом і хмарним обміном даними, оскільки не потребує додаткових модулів бездротового зв'язку.

ESP32

Переваги:

- ❖ вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth;
- ❖ вища продуктивність;
- ❖ більша кількість GPIO;
- ❖ значний запас обчислювальних ресурсів.

Недоліки:

- ❖ вища вартість;
- ❖ надлишкові можливості для даної задачі.

Доцільність використання:

ESP32 є хорошим рішенням для складних систем із великою кількістю периферії, однак для розроблюваного контролера його можливості використовувалися б не повністю.

STM32F103C8T6

Переваги:

- ❖ висока продуктивність;
- ❖ велика кількість периферійних інтерфейсів;
- ❖ якісні вбудовані АЦП;
- ❖ широке застосування в промислових системах.

Недоліки:

- ❖ відсутність вбудованого Wi-Fi;
- ❖ складніше налаштування бездротового зв'язку;
- ❖ необхідність використання додаткового комунікаційного модуля.

Доцільність використання:

STM32F103C8T6 доцільно застосовувати у складних вимірювальних або промислових системах, проте для реалізації хмарного моніторингу необхідно додатково використовувати Wi-Fi-модуль.

З урахуванням поставлених вимог доцільним варіантом є використання мікроконтролера ESP8266.

У межах даного дипломного проєкту використовується готовий модуль на базі ESP8266 ESP-12F з інтегрованим OLED-дисплеєм 0,96", перетворювачем USB-UART CH340G та роз'ємом USB Type-C. Такий модуль поєднує в одному пристрої засоби програмування, локальної індикації та бездротового зв'язку, що спрощує розробку та налагодження системи.

Наявність вбудованого OLED-дисплея дозволяє відображати основні параметри роботи контролера без використання окремого індикаторного модуля. На дисплей можуть виводитися значення напруги, струму, потужності, температури, стан мережевого підключення, аварійні повідомлення та пункти меню налаштування. Це забезпечує зручність експлуатації пристрою навіть без підключення до комп'ютера або мобільного застосунку. Модуль на базі ESP8266 зображено на рисунку 2.3.

Отже, модуль ESP8266 ESP-12F з OLED-дисплеєм забезпечує необхідний набір функцій для реалізації контролера локального енергетичного вузла та дозволяє поєднати вимірювання, локальне керування, індикацію й бездротовий обмін даними в одному пристрої.

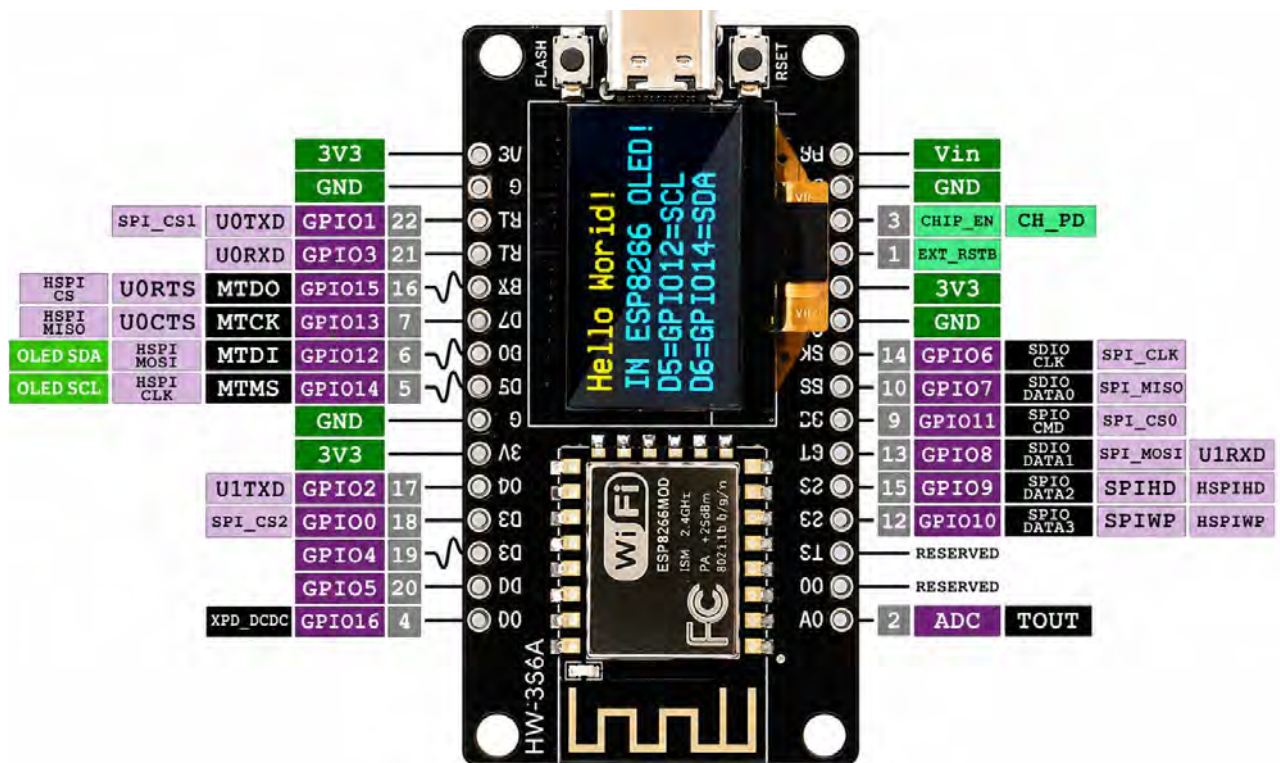


Рисунок 2.3. Модуль NodeMCU ESP8266 ESP-12F

2.4 Вибір датчика температури та розрахунок вимірювального каналу

Для контролю перегріву силових елементів, шунта, корпусу або зони розміщення силового модуля в пристрої використовується NTC-термістор 10 кОм В3950 з кабелем довжиною 1 м та номінальним допуском опору $\pm 1\%$. Такий датчик є компактним, недорогим і зручним для встановлення безпосередньо на контрольовану поверхню або поблизу силових елементів. Термістори типу NTC мають від'ємний температурний коефіцієнт, тобто їхній опір зменшується при зростанні температури [17]. NTC-термістор В3950 зображено на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4. NTC-термістор 10 кОм В3950 з кабелем для вимірювання температури

Для зчитування температури термістор підключається як частина резистивного подільника напруги. Подільник живиться від напруги **3,3 В**, що відповідає логічному рівню мікроконтролера ESP8266. Як верхній резистор подільника доцільно використати резистор номіналом **10 кОм**, тобто такий самий, як опір термістора при температурі 25 °С. Такий вибір забезпечує зручний діапазон вихідної напруги поблизу кімнатної температури [18].

Схема підключення має такий вигляд: постійний резистор R_f підключається між лінією 3,3 В та вимірювальним входом, а NTC-термістор R_{NTC} - між вимірювальним входом і загальним проводом. Схема підключення NTC-термістора зображено на рисунку 2.5.

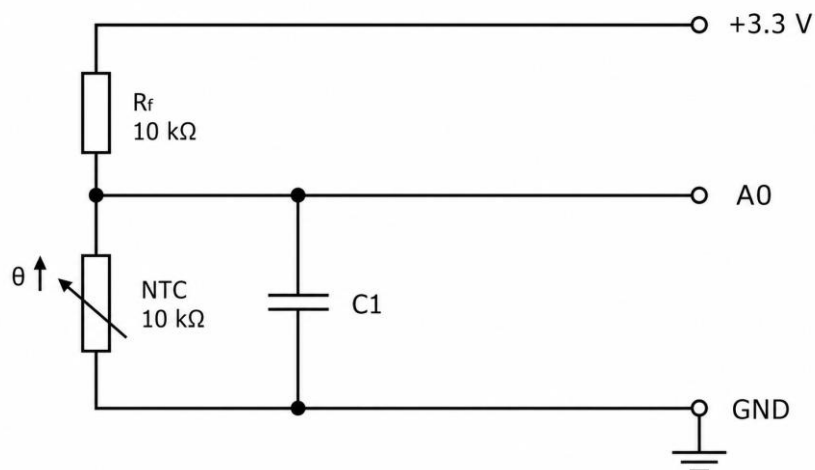


Рисунок 2.5. Схема підключення NTC-термістора

Вихідна напруга подільника визначається за формулою:

$$U_{out} = U_{cc} \cdot \frac{R_{NTC}}{R_f + R_{NTC}}, \quad (2.1)$$

де U_{out} - напруга на вході АЦП;

U_{cc} - напруга живлення подільника, $U_{cc} = 3,3$ В;

R_f - постійний резистор подільника, $R_f = 10$ кОм;

R_{NTC} - опір термістора при поточній температурі.

Опір NTC-термістора залежно від температури можна розрахувати за β -рівнянням:

$$R_{NTC} = R_0 \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}, \quad (2.2)$$

де $R_0 = 10$ кОм - опір термістора при температурі $T_0 = 25^\circ\text{C} = 298,15$ К;

$B = 3950$ К - β -коефіцієнт термістора;

T - температура в кельвінах [19].

Для зворотного розрахунку температури в цельсіях T_{C} за вимірним опором використовується формула:

$$T_{\text{C}} = \frac{1}{\frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \cdot \ln\left(\frac{R_{NTC}}{R_0}\right)} - 273,15 \quad (2.3)$$

Опір термістора можна знайти через виміряну напругу подільника:

$$R_{NTC} = R_f \cdot \frac{U_{out}}{U_{cc} - U_{out}} \quad (2.4)$$

Таким чином, мікроконтролер спочатку вимірює напругу U_{out} , потім розраховує опір термістора R_{NTC} , після чого визначає температуру за β -рівнянням.

Розрахункові значення опору термістора та вихідної напруги подільника наведено в таблиці 2.2.

З таблиці видно, що при зростанні температури опір термістора зменшується, а разом із ним зменшується і напруга на вимірювальному вході.

Таблиця 2.2. Розрахункові параметри подільника з NTC-термістором 10 кОм В3950

Температура, °C	Опір NTC, кОм	Напруга U_{out} , В	Код АЦП для діапазону 0–3,3 В
-10	58,25	2,816	873
0	33,62	2,543	788
10	20,17	2,206	684
25	10,00	1,650	512
40	5,30	1,143	354
50	3,59	0,871	270
60	2,49	0,657	204
70	1,76	0,494	153
80	1,27	0,372	115

Наприклад, при температурі 25 °C опір термістора становить 10 кОм, тому вихідна напруга подільника дорівнює приблизно половині напруги живлення:

$$U_{out} = 3,3 \cdot \frac{10}{10 + 10} = 1,65 \text{ В}$$

При температурі 60 °C, яка використовується як аварійний поріг перегріву, опір термістора становить приблизно 2,49 кОм, а напруга подільника дорівнює:

$$U_{out} = 3,3 \cdot \frac{2,49}{10 + 2,49} = 0,657 \text{ В}$$

Отже, програмний поріг аварійного перегріву може бути встановлений відповідно до температури 60 °C, що відповідає напрузі приблизно 0,66 В на виході подільника.

Також необхідно оцінити струм через подільник і потужність, що розсіюється на термісторі. При температурі 25 °C струм подільника I_{div} становить:

$$I_{div} = \frac{U_{cc}}{R_f + R_{NTC}} \quad (2.5)$$

$$I_{div} = \frac{3,3}{10000 + 10000} = 0,000165 \text{ A} = 0,165 \text{ mA}$$

Потужність на термісторі визначається за формулою:

$$P_{NTC} = I_{div}^2 \cdot R_{NTC} \quad (2.6)$$

Для температури 25 °C:

$$P_{NTC} = 0,000165^2 \cdot 10000 \approx 0,000272 \text{ Вт} = 0,272 \text{ мВт}$$

Отримана потужність є малою, тому самонагрів термістора від струму подільника буде незначним. Це важливо, оскільки самонагрів датчика може спотворювати результат вимірювання температури.

Оскільки використовується датчик із кабелем довжиною 1 м, у практичній схемі доцільно передбачити фільтрацію вимірювального сигналу. Для цього паралельно до входу АЦП може бути встановлений конденсатор невеликої ємності, наприклад 0,1 мкФ, який зменшує вплив електричних завад на довгому проводі.

Важливо врахувати допустимий діапазон напруги аналогового входу конкретного модуля ESP8266. У мікросхемі ESP8266EX вхід TOUT має діапазон 0-1,0 В [20]. Водночас у багатьох готових модулях розробника аналоговий вхід A0 має додатковий подільник і може приймати більшу напругу. Тому під час розробки принципової схеми необхідно перевірити схему саме використаного модуля. Якщо аналоговий вхід допускає лише 0–1 В, вихід подільника NTC необхідно додатково масштабувати або використати інший спосіб підключення.

Отже, NTC-термістор 10 кОм В3950 з живленням подільника від 3,3 В дозволяє реалізувати простий і достатньо чутливий канал контролю температури. Розрахунки показують, що при порозі перегріву 60 °C на виході подільника формується напруга приблизно 0,66 В, яку можна використати для програмного визначення аварійного стану.

2.5 Аналіз та вибір цифрового монітора напруги та струму

Для контролю стану локального енергетичного вузла необхідно вимірювати напругу джерела постійного струму, струм заряду або розряду, а

також розраховувати потужність. Ці параметри потрібні для локального захисту, оцінки стану вузла та передавання даних до хмарної платформи.

Загальна потужність, що передається через вузол, визначається за формулою:

$$P = U \cdot I, \quad (2.7)$$

де P - потужність, Вт;

U - напруга джерела постійного струму, В;

I - струм заряду або розряду, А.

Для розроблюваного контролера важливо, щоб вимірювальний вузол забезпечував:

- ❖ вимірювання напруги до 85 В без додаткового подільника;
- ❖ можливість вимірювання напруги до 500 В через зовнішній подільник;
- ❖ вимірювання струму через зовнішній шунт;
- ❖ підтримку різноманітних шунтів;
- ❖ цифровий інтерфейс для передавання даних до мікроконтролера;
- ❖ можливість гальванічної розв'язки вимірювального вузла від основного контролера.

З огляду на ці вимоги доцільно застосувати спеціалізований цифровий монітор напруги та струму. Такі мікросхеми містять високоточний АЦП, вимірюють напругу на шині, падіння напруги на шунті та можуть виконувати розрахунок струму, потужності, енергії або заряду.

2.5.1 Аналіз та вибір цифрового монітора

Для вибору цифрового монітора було розглянуто кілька поширених мікросхем: INA226, INA238, INA228 та INA229. Основні характеристики наведено в таблиці 2.3.

INA226 є простим і поширеним цифровим монітором, однак його максимальна напруга шини становить 36 В. Цього недостатньо для систем, у яких потрібно контролювати напругу до 85 В.

Таблиця 2.3. Порівняння цифрових моніторів напруги та струму

Мікросхема	Інтерфейс	Максимальна напруга шини	Розрядність АЦП	Вимірювані параметри	Особливості
INA226	I2C	36 В	16 біт	Напруга, струм, потужність	Підходить для низьковольтних систем
INA238	I2C	85 В	16 біт	Напруга, струм, потужність, температура	Підтримує вимірювання до 85 В
INA228	I2C	85 В	20 біт	Напруга, струм, потужність, енергія, заряд, температура	Висока роздільна здатність, I2C, зручний для ESP8266
INA229	SPI	85 В	20 біт	Напруга, струм, потужність, енергія, заряд, температура	Аналогічний INA228, але з SPI-інтерфейсом

INA238 підтримує вимірювання напруги до 85 В і має I2C-інтерфейс, однак використовує 16-бітний АЦП.

INA229 має близькі можливості до INA228, але використовує SPI-інтерфейс, що потребує більшої кількості ліній мікроконтролера.

Для даного пристрою доцільним є використання INA228, оскільки ця мікросхема підтримує вимірювання напруги шини до 85 В, має 20-бітний АЦП, інтерфейс I2C та може вимірювати шунтову напругу, напругу шини, температуру, а також розраховувати струм, потужність, енергію і заряд [21]. Функціональна схема INA228 зображено на рисунку 2.6.

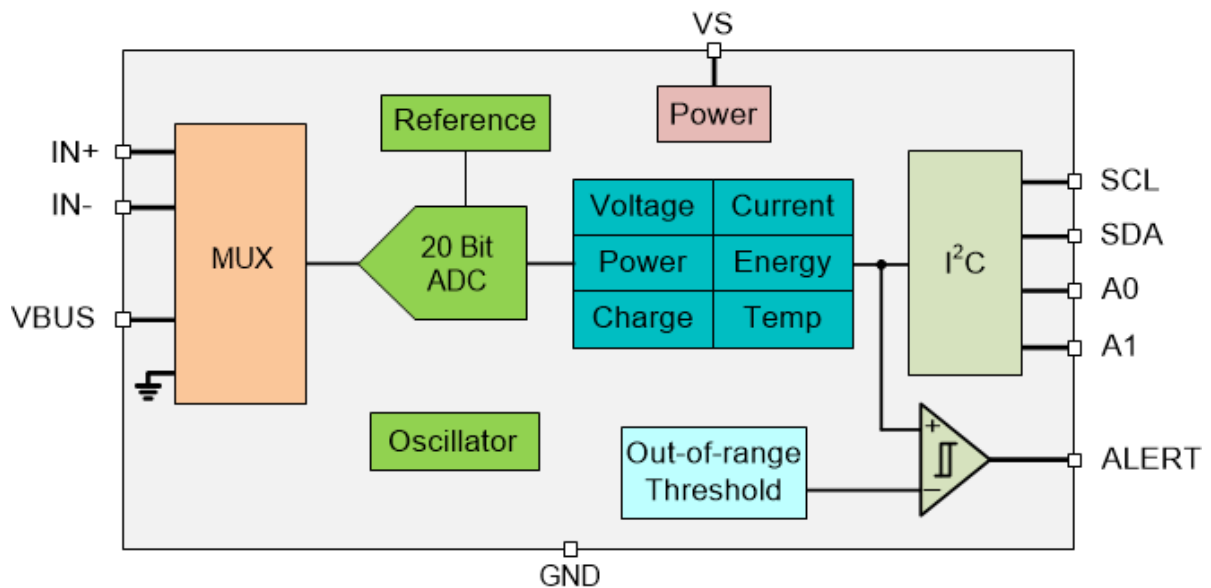


Рисунок 2.6. Функціональна схема цифрового монітора INA228

Основні функції INA228 у складі пристрою:

- ❖ вимірювання напруги джерела або буфера енергії;
- ❖ вимірювання падіння напруги на зовнішньому шунті;
- ❖ розрахунок струму;
- ❖ розрахунок потужності;
- ❖ можливість оцінки переданої енергії;
- ❖ передавання даних до мікроконтролера через I2C.

Розрахунок потужності на основі виміряних значень виконується за формулою:

$$P = U_{bus} \cdot I, \quad (2.8)$$

де U_{bus} - напруга на шині постійного струму;

I - струм, розрахований за падінням напруги на шунті.

Енергію, передану за певний проміжок часу, можна визначити інтегруванням потужності:

$$E = \int P(t) dt \quad (2.9)$$

Для дискретного вимірювання:

$$E \approx \sum P_i \cdot \Delta t, \quad (2.10)$$

де P_i - потужність на i -му кроці вимірювання;

Δt - інтервал між вимірюваннями.

2.5.2 Гальванічна розв'язка живлення та інтерфейсу цифрового монітора

Оскільки вимірювальний вузол безпосередньо пов'язаний із силовою частиною локального енергетичного вузла, доцільно відокремити його від основного мікроконтролера за допомогою гальванічної розв'язки. Це підвищує стійкість контролера до завад, зменшує ризик пошкодження мікроконтролера та дозволяє безпечніше працювати з високовольтною частиною схеми.

Для ізоляції інтерфейсу I2C може використовуватися цифровий ізолятор ISO1540. Він призначений для гальванічної розв'язки ліній SDA та SCL і дозволяє передавати дані між мікроконтролером і вимірювальним модулем без прямого електричного з'єднання [24]. Схема подібного методу розв'язки зображено на рисунку 2.7.

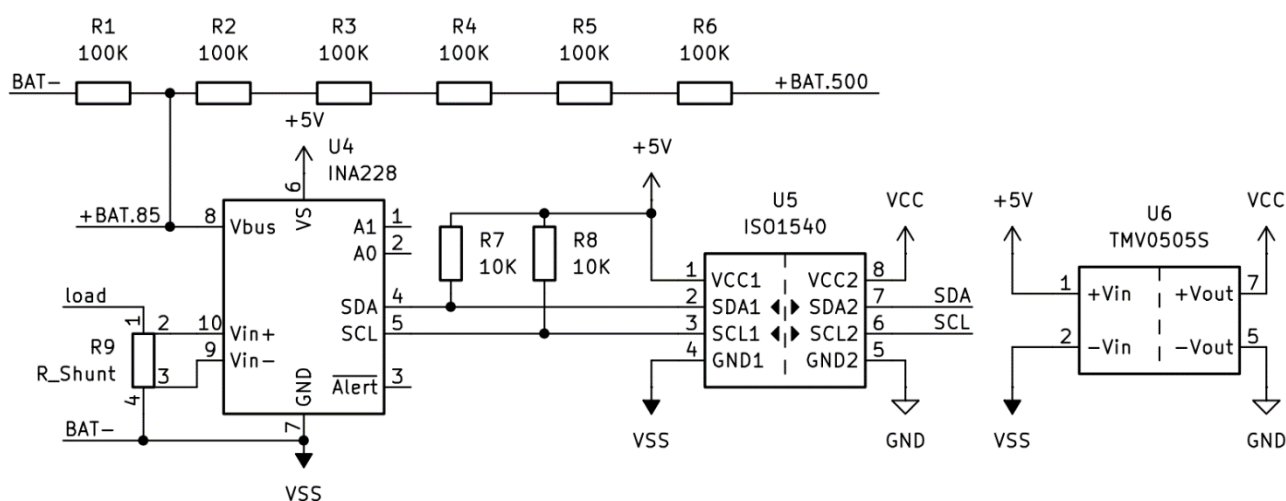


Рисунок 2.7. Схема Гальванічна розв'язка інтерфейсу I2C між ESP8266 та INA228

Для живлення ізольованої частини застосовується DC/DC-перетворювач B0505S. Він формує ізольовану напругу 5 В для живлення вимірювального

модуля. Оскільки INA228 може працювати від напруги живлення 2,7–5,5 В, живлення 5 В є допустимим для цієї мікросхеми [21].

Загальна структура розв'язки має такий вигляд:

- ❖ основний модуль ESP8266 живиться від своєї системи живлення;
- ❖ ізолюваний DC/DC-перетворювач формує окреме живлення для INA228;
- ❖ ISO1540 ізолює цифрові лінії I2C;
- ❖ вимірювальна частина має власну ізолювану землю.

При такій побудові основний контролер отримує цифрові дані від INA228, але не має прямого гальванічного зв'язку із силовою вимірювальною частиною. Це особливо важливо при роботі з напругою до 85 В напругу та з розширеним діапазоном до 400 В через зовнішній подільник.

2.5.3 Метод вимірювання напруги та розрахунок вимірювального каналу

INA228 дозволяє безпосередньо вимірювати напругу шини до 85 В. Це дає можливість контролювати більшість низьковольтних DC-систем без додаткового подільника. Для цього напруга джерела підключається до входу VBUS відносно загального проводу вимірювального модуля.

Для розширеного діапазону вимірювання до 500 В необхідно застосувати зовнішній резистивний подільник напруги. Його задача — зменшити напругу 500 В до рівня, безпечного для входу VBUS INA228. Доцільно прийняти максимальну напругу на вході INA228 після подільника не більше 85 В.

Коефіцієнт подільника визначається як:

$$k = \frac{U_{in}}{U_{out}}, \quad (2.11)$$

де U_{in} - максимальна вимірювана напруга;

U_{out} - напруга на виході подільника.

Для $U_{in} = 500$ В та $U_{out} \approx 83,3$ В:

$$k = \frac{500}{83,3} \approx 6$$

Отже, подільник повинен зменшувати напругу приблизно у 6 разів.

Вихідна напруга подільника визначається за формулою:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.12)$$

Звідси співвідношення резисторів:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{in}}{U_{out}} - 1 \quad (2.13)$$

Для заданого коефіцієнта:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{500}{83,3} - 1 \approx 5$$

Тобто опір верхнього плеча має бути приблизно у 5 разів більшим за опір нижнього.

Для зменшення струму через подільник і втрат потужності можна прийняти:

$$R_1 = 500 \text{ кОм}$$

$$R_2 = 100 \text{ кОм}$$

Тоді вихідна напруга при $U_{in} = 500 \text{ В}$:

$$U_{out} = 500 \cdot \frac{100}{500 + 100} = 83,3 \text{ В}$$

Струм через подільник:

$$I_{div} = \frac{U_{in}}{R_1 + R_2} \quad (2.14)$$

$$I_{div} = \frac{500}{500000 + 100000} = 0,000833 \text{ А} = 0,833 \text{ мА}$$

Потужність, що розсіюється на верхньому резисторі:

$$P_{R1} = I_{div}^2 \cdot R_1 \quad (2.15)$$

$$P_{R1} = 0,000833^2 \cdot 500000 \approx 0,347 \text{ Вт}$$

Потужність на нижньому резисторі:

$$P_{R2} = I_{div}^2 \cdot R_2 \quad (2.16)$$

$$P_{R2} = 0,000833^2 \cdot 100000 \approx 0,069 \text{ Вт}$$

Загальна потужність подільника:

$$P_{div} = U_{in} \cdot I_{div} \quad (2.17)$$

$$P_{div} = 500 \cdot 0,000833 \approx 0,417 \text{ Вт}$$

Отже, для верхнього плеча подільника необхідно використовувати резистори із запасом за потужністю та напругою. Наприклад, верхній резистор R_1 доцільно набрати з кількох послідовно з'єднаних резисторів, щоб розподілити напругу та зменшити навантаження на кожен елемент. Схему вимірювання напруги зображено на рисунку 2.8.

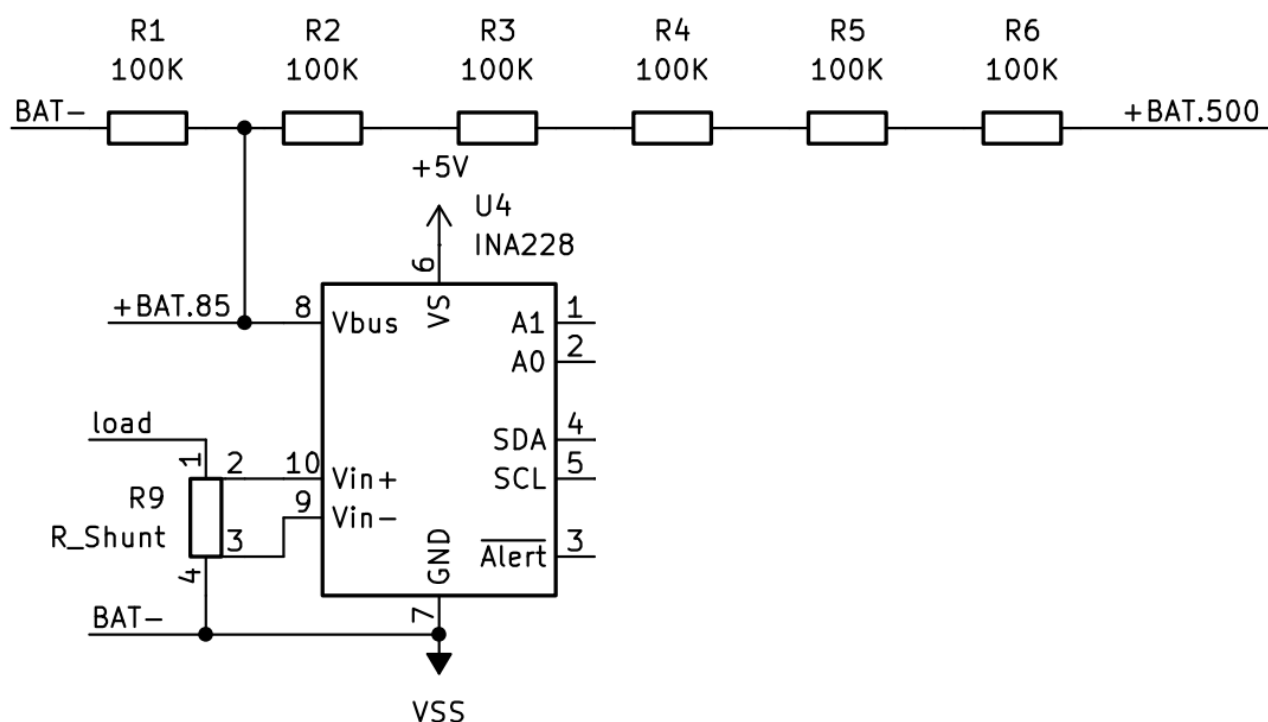


Рисунок 2.8. Схема вимірювання напруги

Для оцінки масштабування вимірюваної напруги використовується формула:

$$U_{in} = U_{out} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (2.18)$$

Для прийнятих значень:

$$U_{in} = U_{out} \cdot \frac{500 + 100}{100} = 6 \cdot U_{out}$$

Отже, у програмному забезпеченні виміряне INA228 значення напруги після подільника необхідно помножити на коефіцієнт 6. Приклад розрахунків наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. Залежність вихідної напруги подільника від вхідної напруги

Вхідна напруга U_{in} , В	Вихідна напруга U_{out} , В
0	0
48	8,0
85	14,2
100	16,7
200	33,3
300	50,0
400	66,7
500	83,3

Похибка вимірювання напруги залежить від точності резисторів подільника. Якщо використовуються резистори з допуском $\pm 1\%$, похибка коефіцієнта подільника може досягати кількох відсотків. Для зменшення похибки доцільно застосовувати резистори з допуском $0,1\%$ або передбачити програмне калібрування.

2.5.4 Метод вимірювання струму та розрахунок параметрів шунта

Вимірювання струму виконується за падінням напруги на зовнішньому шунті. Шунт вмикається послідовно в силове коло, а INA228 вимірює диференціальну напругу між виводами IN+ та IN-. Струм визначається за законом Ома:

$$I = \frac{U_{sh}}{R_{sh}}, \quad (2.19)$$

де I - струм через шунт;

U_{sh} - падіння напруги на шунті;

R_{sh} - опір шунта.

У пристрої передбачається можливість роботи зі стандартними шунтами, наприклад 50 А / 75 мВ, 100 А / 75 мВ, 200 А / 75 мВ та 500 А / 75 мВ, розрахунок їх параметрів наведено в таблиці 2.5.

Опір шунта визначається за формулою:

$$R_{sh} = \frac{U_{shnom}}{I_{shnom}} \quad (2.20)$$

Для шунта 500 А / 75 мВ:

$$R_{sh} = \frac{0,075}{500} = 0,00015 \text{ Ом} = 0,15 \text{ мОм}$$

Потужність, що розсіюється на шунті при номінальному струмі:

$$P_{sh} = I^2 \cdot R_{sh} \quad (2.21)$$

$$P_{sh} = 500^2 \cdot 0,00015 = 37,5 \text{ Вт}$$

Отже, при великих струмах шунт повинен мати достатній запас за потужністю та встановлюватися з урахуванням тепловідведення.

Таблиця 2.5. Розрахунок параметрів стандартних шунтів 75 мВ

Номінал шунта	Опір шунта, мОм	Потужність при номінальному струмі, Вт
50 А / 75 мВ	1,50	3,75
100 А / 75 мВ	0,75	7,50
200 А / 75 мВ	0,375	15,0
500 А / 75 мВ	0,150	37,5

INA228 підтримує вимірювання шунтової напруги в діапазоні, достатньому для стандартного шунта 75 мВ. Оскільки падіння напруги на такому шунті при номінальному струмі становить 75 мВ, воно не перевищує допустимий діапазон вимірювання шунтового входу мікросхеми.

Для прикладу розрахуємо струм при використанні шунта 500 А / 75 мВ. Кілька розрахунків наведено в таблиці 2.6.

Якщо INA228 виміряла падіння напруги на шунті $U_{sh} = 30$ мВ, то струм становить:

$$I = \frac{0,030}{0,00015} = 200 \text{ А}$$

Потужність вузла при напрузі 48 В, за формулою 2.7:

$$P = 48 \cdot 200 = 9600 \text{ Вт}$$

Якщо напруга вузла становить 72 В, то при тому самому струмі:

$$P = 72 \cdot 200 = 14400 \text{ Вт}$$

Таблиця 2.6. Приклад розрахунку струму для шунта 500 А / 75 мВ

Падіння напруги на шунті, мВ	Струм, А
7,5	50
15	100
30	200
45	300
60	400
75	500

Для налаштування контролера користувач повинен мати можливість задати два параметри шунта: номінальний струм I_{shnom} та номінальне падіння напруги U_{shnom} . Після цього опір шунта розраховується програмно, за формулою 2.20.

Це дозволяє використовувати один контролер із різними зовнішніми шунтами без зміни апаратної частини.

Для захисту за струмом можна використовувати поріг, пов'язаний із максимальною потужністю інвертора. Якщо максимальна потужність інвертора дорівнює P_{inv} , а напруга джерела U , то робочий струм визначається як:

$$I_{work} = \frac{P_{inv}}{U} \quad (2.22)$$

Струм аварійного спрацювання може бути заданий із запасом, наприклад:

$$I_{lim} = 2 \cdot \frac{P_{inv}}{U}, \quad (2.23)$$

де I_{lim} поріг струмового захисту.

Наприклад, для інвертора потужністю 5 кВт і напруги джерела 48 В:

$$I_{lim} = 2 \cdot \frac{5000}{48} = 208,3 \text{ А}$$

для напруги 72 В:

$$I_{lim} = 2 \cdot \frac{5000}{72} = 138,9 \text{ А}$$

Отже, цифровий монітор INA228 у поєднанні із зовнішнім шунтом дозволяє реалізувати універсальний вимірювальний вузол для різних діапазонів струму. Параметри шунта можуть задаватися користувачем, після чого контролер розраховує опір шунта, струм, потужність та пороги захисту.

2.6 Вибір зовнішнього силового модуля захисту

Зовнішній силовий модуль захисту призначений для відключення силового кола джерела або буфера енергії у разі аварійного режиму. До таких режимів належать перевищення струму, перегрів, зниження напруги нижче допустимого рівня або втрата зв'язку з хмарною платформою. Оскільки струм і напруга локальних енергетичних вузлів можуть суттєво відрізнятися, силовий модуль доцільно виконати окремим змінним вузлом, а основний контролер повинен формувати для нього лише керуючий сигнал.

У межах даного проекту розглянуто два варіанти зовнішнього силового модуля:

- ❖ низьковольтний модуль для акумуляторних систем 12-72 В на MOSFET-транзисторах IRFP4468PbF;
- ❖ високовольтний модуль для систем до 400 В на IGBT-транзисторах IRG4PC50UD.

Керування силовим модулем передбачається сигналом 12 В від контролера або проміжного драйверного каскаду. При цьому безпосереднє керування

затворами силових транзисторів має виконуватися через відповідний драйвер, оскільки потужні MOSFET та IGBT потребують достатнього струму заряду і розряду затвора.

2.6.1 Низьковольтний силовий модуль на MOSFET IRFP4468PbF

Для акумуляторних систем напругою 12–72 В доцільно застосувати MOSFET-транзистори, оскільки у відкритому стані вони поведуться як малий опір і мають відносно низькі втрати при великих струмах. Для варіанта на струм до 500 А обрано транзистори IRFP4468PbF, які мають допустиму напругу стік-витік 100 В, малий опір відкритого каналу та корпус TO-247 [25].

Оскільки один транзистор не повинен пропускати весь струм 500 А, силовий модуль виконується з паралельним підключенням 10 MOSFET-транзисторів. При ідеальному рівномірному розподілі струму струм через один транзистор становить:

$$I_{MOS} = \frac{I_{total}}{N}, \quad (2.24)$$

де I_{MOS} - струм через один MOSFET;

I_{total} - загальний струм силового модуля;

N - кількість паралельно з'єднаних транзисторів.

Для $I_{total} = 500$ А та $N = 10$:

$$I_{MOS} = \frac{500}{10} = 50 \text{ А}$$

Еквівалентний опір групи паралельно з'єднаних MOSFET визначається як:

$$R_{DS(eq)} = \frac{R_{DS(on)}}{N} \quad (2.25)$$

Для IRFP4468PbF приймемо максимальне значення опору відкритого каналу:

$$R_{DS(on)} = 2,6 \text{ мОм} = 0,0026 \text{ Ом}$$

Тоді:

$$R_{DS(eq)} = \frac{0,0026}{10} = 0,00026 \text{ Ом} = 0,26 \text{ мОм}$$

Втрати потужності в одному MOSFET у відкритому стані:

$$P_{MOS} = I_{MOS}^2 \cdot R_{DS(on)} \quad (2.26)$$

$$P_{MOS} = 50^2 \cdot 0,0026 = 6,5 \text{ Вт}$$

Загальні втрати у MOSFET-групі:

$$P_{total} = N \cdot P_{MOS} \quad (2.27)$$

$$P_{total} = 10 \cdot 6,5 = 65 \text{ Вт}$$

Отже, при струмі 500 А і рівномірному розподілі струму загальні провідникові втрати в групі з 10 транзисторів становлять приблизно 65 Вт. Це значення є суттєвим, тому модуль потребує радіатора, якісного теплового контакту та рівномірного розміщення транзисторів. Приклад розрахунків наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7. Розрахунок струму та втрат для MOSFET-модуля на IRFP4468PbF

Загальний струм, А	Кількість MOSFET	Струм на один MOSFET, А	Втрати на один MOSFET, Вт	Загальні втрати, Вт
100	3	33,3	2,89	8,67
200	5	40,0	4,16	20,8
300	6	50,0	6,50	39,0
400	10	40,0	4,16	41,6
500	10	50,0	6,50	65,0

Оскільки у реальній схемі струм між паралельними транзисторами не розподіляється абсолютно рівномірно, необхідно врахувати можливий коефіцієнт нерівномірності. Якщо прийняти коефіцієнт нерівномірності $k_i = 1,2$, то найбільш навантажений транзистор може проводити струм:

$$I_{MOSmax} = k_i \cdot \frac{I_{total}}{N} \quad (2.28)$$

$$I_{MOSmax} = 1,2 \cdot \frac{500}{10} = 60 \text{ А}$$

Тоді втрати в найбільш навантаженому транзисторі становитимуть:

$$P_{MOSmax} = I_{MOSmax}^2 \cdot R_{DS(on)} \quad (2.29)$$

$$P_{MOSmax} = 60^2 \cdot 0,0026 = 9,36 \text{ Вт}$$

Це значення все ще є допустимим за умови правильного тепловідведення, однак воно показує необхідність симетричного розведення силових шин, однакової довжини з'єднань і використання окремих резисторів у колі затвора кожного MOSFET. Паралельне підключення MOSFET є поширеним способом збільшення допустимого струму, однак вимагає врахування статичного і динамічного розподілу струму між транзисторами [27]. Схема паралельного підключення MOSFET-транзисторів зображена на рисунку 2.9.

Потрібно також врахувати запас за напругою. Максимальна напруга стік-витік IRFP4468PbF становить 100 В [25]. Для акумуляторної системи до 72 В, яка в зарядженому стані може мати напругу до 85 В, коефіцієнт запасу за напругою:

$$K_U = \frac{U_{DSmax}}{U_{batmax}} \quad (2.30)$$

$$K_U = \frac{100}{85} = 1,18$$

Отриманий запас є невеликим, тому в реальній схемі необхідно передбачити захист від імпульсних перенапруг: TVS-діоди, RC-снабери, правильне розведення силового контуру та мінімізацію паразитної індуктивності провідників. Для систем з напругою вище 85 В такий MOSFET-модуль застосовувати недоцільно.

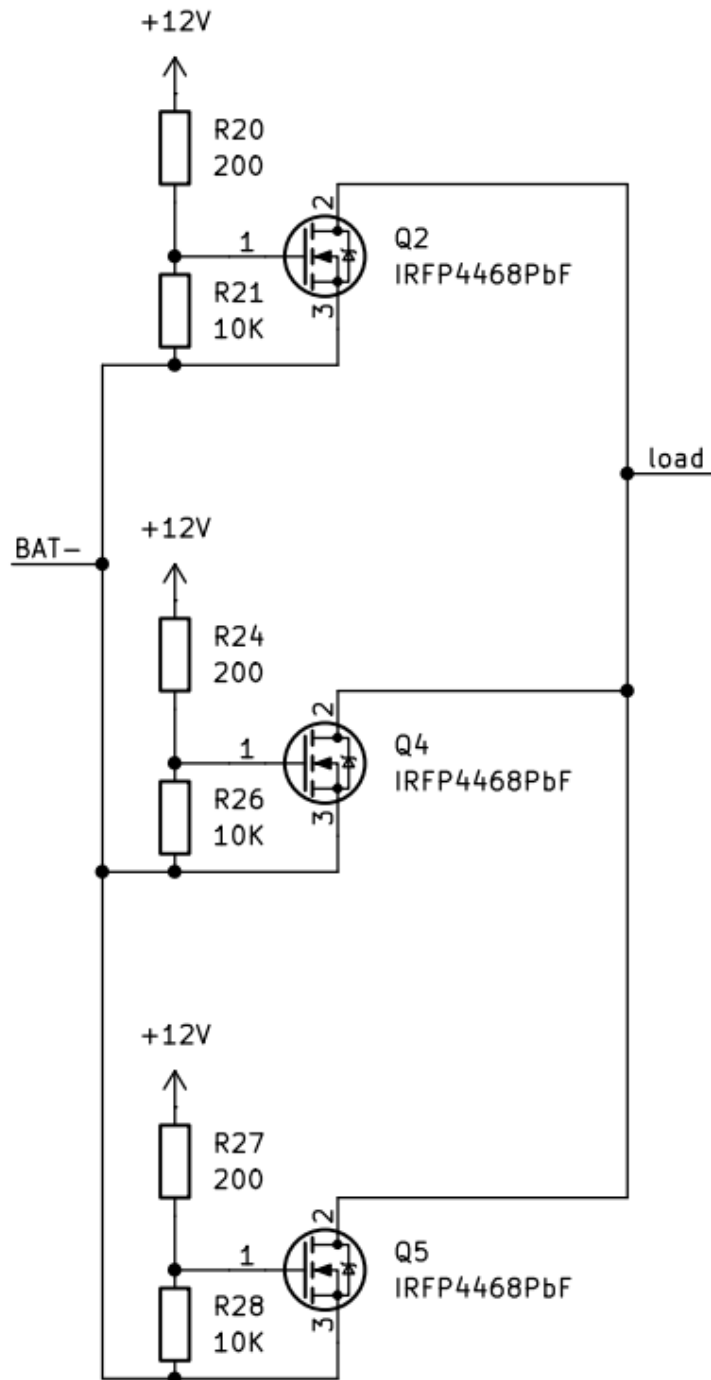


Рисунок 2.9. Схема паралельного підключення MOSFET-транзисторів

2.6.2 Високовольтний силовий модуль на IGBT IRG4PC50UD

Для високовольтного варіанта силового модуля, призначеного для акумуляторних систем до 400 В, доцільно використовувати IGBT-транзистори. Порівняно з MOSFET, IGBT краще підходять для вищих напруг, хоча у

відкритому стані мають не малий опір, а приблизно сталу напругу насичення колектор-емітер.

Для варіанта на струм до 32 А обрано IGBT IRG4PC50UD. Цей транзистор має допустиму напругу колектор-емітер 600 В, типовий спад напруги $V_{CE(on)} \approx 1,65$ В при $V_{GE} = 15$ В та $I_C = 27$ А, а також вбудований швидкий зворотний діод [26].

Для зменшення навантаження на один транзистор передбачається паралельне підключення 3 IGBT. При загальному струмі 32 А струм через один транзистор за ідеального розподілу становить:

$$I_{IGBT} = \frac{I_{total}}{N} \quad (2.31)$$
$$I_{IGBT} = \frac{32}{3} = 10,67 \text{ А}$$

Втрати провідності для IGBT можна наближено оцінити за формулою:

$$P_{IGBT} \approx V_{CE(on)} \cdot I_{IGBT}, \quad (2.32)$$

де P_{IGBT} - втрати на одному IGBT;

$V_{CE(on)}$ - спад напруги на відкритому IGBT;

I_{IGBT} - струм через один транзистор.

Для $V_{CE(on)} = 1,65$ В:

$$P_{IGBT} \approx 1,65 \cdot 10,67 = 17,6 \text{ Вт}$$

Загальні втрати трьох паралельних IGBT:

$$P_{total} = N \cdot P_{IGBT} \quad (2.33)$$
$$P_{total} = 3 \cdot 17,6 = 52,8 \text{ Вт}$$

Приклад розрахунку втрат при різних варіантах підключення вказано в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8. Розрахунок струму та втрат для IGBT-модуля на IRG4PC50UD

Загальний струм, А	Кількість IGBT	Струм на один IGBT, А	Втрати на один IGBT, Вт	Загальні втрати, Вт
8	3	2,67	4,40	13,2
16	3	5,33	8,80	26,4
24	3	8,00	13,2	39,6
32	3	10,67	17,6	52,8

Як і у випадку MOSFET, у реальному модулі потрібно враховувати нерівномірний розподіл струму. Якщо прийняти коефіцієнт нерівномірності $k_i = 1,2$, то максимальний струм одного IGBT:

$$I_{IGBTmax} = k_i \cdot \frac{I_{total}}{N} \quad (2.34)$$

$$I_{IGBTmax} = 1,2 \cdot \frac{32}{3} = 12,8 \text{ А}$$

Втрати в найбільш навантаженому транзисторі:

$$P_{IGBTmax} \approx V_{CE(on)} \cdot I_{IGBTmax} \quad (2.35)$$

$$P_{IGBTmax} \approx 1,65 \cdot 12,8 = 21,1 \text{ Вт}$$

При паралельному підключенні IGBT потрібно приділяти особливу увагу симетрії силового кола, однаковим параметрам драйверів, однаковим довжинам з'єднань та тепловій симетрії. Нерівномірність струмів у паралельних IGBT може виникати через розкид $V_{CE(on)}$, різницю температури, паразитні індуктивності та відмінності у керуванні затворами [28].

Для високовольтного модуля також необхідно оцінити запас за напругою. При допустимій напрузі IRG4PC50UD:

$$U_{CEmax} = 600 \text{ В}$$

Для акумуляторної системи 400 В коефіцієнт запасу:

$$K_U = \frac{U_{CEmax}}{U_{bat}} \quad (2.36)$$

$$K_U = \frac{600}{400} = 1,5$$

Отриманий запас є прийнятнішим, ніж у низьковольтному MOSFET-варіанті. Однак при комутації постійного струму все одно необхідно враховувати перенапруги, спричинені індуктивністю проводів, шинами та навантаженням. Для обмеження таких перенапруг доцільно застосовувати снабери, варистори або TVS-елементи, а також мінімізувати площу силового контуру.

2.6.3 Розрахунок розсіювання тепла

Для забезпечення жорсткості конструкції, екранування електромагнітних завад та ефективного відведення тепла обрано екструдований ребристий алюмінієвий корпус, рисунок 2.6.



Рисунок 2.6. Екструдований ребристий алюмінієвий корпус

Параметри ребристого корпусу:

- Довжина (L): 182 мм = 0,182 м
- Ширина (W): 150 мм = 0,150 м
- Висота (H): 62 мм = 0,062 м
- Маса корпусу (m): 1,231 кг

Геометричний розрахунок ефективної площі розсіювання Оскільки корпус має розвинену ребристу структуру на верхній та бічних гранях, загальна площа теплообміну суттєво перевищує площу простої геометричної оболонки.

Обчислимо площу проєкцій основних граней корпуса (footprint):

❖ Площа верхньої ребристої панелі:

$$A_{top} = L \cdot W \quad (2.37)$$

$$A_{top} = 0,182 \cdot 0,150 = 0,0273 \text{ м}^2$$

❖ Площа двох бічних ребристих граней:

$$A_{sides} = 2 \cdot (L \cdot H) \quad (2.38)$$

$$A_{sides} = 2 \cdot (0,182 \cdot 0,062) = 0,02257 \text{ м}^2$$

❖ Площа торцевих поверхонь (кришок):

$$A_{ends} = 2 \cdot (W \cdot H) \quad (2.39)$$

$$A_{ends} = 2 \cdot (0,150 \cdot 0,062) = 0,0186 \text{ м}^2$$

Для врахування глибокого оребрення верхньої та бічних панелей вводиться коефіцієнт розвитку поверхні (коефіцієнт оребрення) $K_{or} = 3,5$. Торцеві кришки є гладкими ($K_{or} = 1$).

Загальна ефективна площа теплообміну (A_{eff}) становить:

$$A_{eff} = (A_{top} + A_{sides}) \cdot K_{or} + A_{ends} \quad (2.40)$$

$$A_{eff} = (0,0273 + 0,02257) \cdot 3,5 + 0,0186 \approx 0,19315 \text{ м}^2$$

Розрахунок теплового опору радіатора Сумарний коефіцієнт тепловіддачі (h_{total}) для вертикально та горизонтально орієнтованих поверхонь з чорним анодуванням в умовах природної конвекції та випромінювання становить в середньому $h_{total} = 11 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Тепловий опір радіатор-навколишнє середовище (R_{thsa}) визначається за формулою:

$$R_{thsa} = \frac{1}{h_{total} \cdot A_{eff}} \quad (2.41)$$

$$R_{thsa} = \frac{1}{11 \cdot 0,19315} \approx 0,471 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт}$$

Розрахунок температурного режиму корпусу Надлишкова температура корпусу радіатора (ΔT_s) над температурою навколишнього повітря при розсіюванні заданої потужності становить:

$$\Delta T_s = P_{vtr} \cdot R_{thsa} \quad (2.42)$$

$$\Delta T_s = 65 \text{ Вт} \cdot 0,471 \text{ }^\circ\text{C} / \text{Вт} \approx 30,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Усталена температура корпусу радіатора (T_s) в точці теплової рівноваги:

$$T_s = T_{amb} + \Delta T_s \quad (2.43)$$

$$T_s = 25 \text{ }^\circ\text{C} + 30,6 \text{ }^\circ\text{C} = 55,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Таким чином, обраний масивний анодований алюмінієвий корпус масою 1,231 кг повністю задовольняє вимогам щодо теплового режиму пристрою в умовах природної конвекції без застосування примусового обдування.

2.7 Розробка системи живлення контролера

Система живлення контролера повинна забезпечувати стабільну роботу мікроконтролера, OLED-дисплея, вимірювального модуля, ізольованої частини, датчика температури, релейного виходу та виходу керування зовнішнім силовим модулем. Оскільки пристрій призначений для роботи у складі локального енергетичного вузла, до системи живлення висуваються такі вимоги:

1. формування стабільної напруги 5 В для основної частини контролера;
2. забезпечення живлення 3,3 В для логічної частини мікроконтролера та датчика температури;
3. формування ізольованого живлення для цифрового монітора напруги та струму;
4. формування ізольованої напруги 12 В для керування зовнішнім силовим модулем;
5. можливість резервного живлення від акумулятора 21700;
6. можливість живлення від зовнішнього адаптера 220 В $\rightarrow$ 5 В.

У розроблюваному пристрої центральним елементом системи живлення є модуль powerbank на базі IP5306. До його входу підключається зовнішній мережевий адаптер $220\text{ В} \rightarrow 5\text{ В}$, який забезпечує живлення пристрою та заряджання резервного акумулятора 21700. У разі зникнення зовнішнього живлення модуль IP5306 автоматично переходить на живлення від акумулятора та продовжує формувати стабілізовану напругу 5 В для всіх вузлів контролера. Таким чином, вся система живиться від виходу IP5306 незалежно від джерела енергії. Для формування ізолюваної напруги 12 В використовується DC/DC-перетворювач B0512S [29].

2.7.1 Розрахунок споживання основних вузлів

Для оцінки навантаження на систему живлення необхідно визначити потужність, яку споживають основні вузли контролера. Загальна потужність споживання визначається як сума потужностей окремих вузлів:

$$P_{total} = \sum P_i, \quad (2.44)$$

де P_{total} - сумарна потужність споживання;

P_i - потужність окремого вузла.

Потужність окремого вузла визначається за формулою:

$$P_i = U_i \cdot I_i, \quad (2.45)$$

де U_i - напруга живлення вузла;

I_i - струм споживання вузла.

Розрахункове споживання основних елементів контролера наведено в таблиці 2.9.

Максимальна вихідна потужність перетворювача B0512S-1W становить 1 Вт . Оскільки він живиться від шини 5 В , для попереднього розрахунку приймаємо споживання:

$$P_{B0512S} = 1\text{ Вт}$$

Тоді сумарна потужність навантаження на шині 5 В :

$$P_{5total} = 1,50 + 0,30 + 0,0005 + 0,40 + 1,00 = 3,20\text{ Вт} \quad (2.46)$$

Таблиця 2.9. Орієнтовне споживання основних вузлів контролера

Вузол	Напруга живлення, В	Орієнтовний струм, А	Потужність, Вт
Модуль ESP8266 ESP-12F з OLED	5	0,30	1,50
Ізольований вимірювальний модуль INA228, ISO1540, B0505S	5	0,06	0,30
Датчик температури NTC 10 кОм	3,3	0,000165	0,0005
Релейний вихід керування інвертором	5	0,08	0,40
Ізольований вихід 12 В на базі B0512S	5	0,20	1,00

Сумарний струм шини 5 В:

$$I_{5total} = \frac{P_{5total}}{U_5} \quad (2.47)$$

$$I_{5total} = \frac{3,20}{5} = 0,64 \text{ А}$$

Для надійної роботи блока живлення необхідно передбачити запас за струмом. Якщо прийняти запас 30%, то розрахунковий струм джерела 5 В:

$$I_{5req} = I_{5total} \cdot 1,3 \quad (2.48)$$

$$I_{5req} = 0,64 \cdot 1,3 = 0,832 \text{ А}$$

Оскільки всі вузли живляться від виходу модуля IP5306, саме він повинен забезпечувати зазначений струм навантаження. Для живлення входу IP5306 доцільно використовувати мережевий адаптер 5 В 2 А, який забезпечить одночасно роботу контролера та заряджання резервного акумулятора.

2.7.2 Формування резервного живлення

Для резервного живлення використовується акумулятор формату 21700 та модуль powerbank на базі IP5306. Такий модуль поєднує зарядний пристрій для літієвого акумулятора, систему автоматичного перемикавання джерел живлення та підвищувальний перетворювач, який формує стабілізовану напругу 5 В для навантаження [30].

У штатному режимі зовнішній адаптер 220 В $\rightarrow$ 5 В підключений до входу IP5306. При цьому контролер живиться від виходу модуля, а акумулятор заряджається. У разі зникнення мережевого живлення IP5306 автоматично переходить на живлення від акумулятора без необхідності використання додаткових схем перемикавання.

Для оцінки часу автономної роботи приймемо акумулятор 21700 з номінальною напругою 3,7 В і ємністю 5 А·год. Енергія акумулятора:

$$E_{bat} = U_{batnom} \cdot C_{bat}, \quad (2.49)$$

де E_{bat} - енергія акумулятора, Вт·год;

U_{batnom} - номінальна напруга акумулятора;

C_{bat} - ємність акумулятора, А·год.

$$E_{bat} = 3,7 \cdot 5 = 18,5 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

З урахуванням ККД підвищувального перетворювача модуля powerbank:

$$E_5 = E_{bat} \cdot \eta_{boost} \quad (2.50)$$

Для попереднього розрахунку приймаємо:

$$\eta_{boost} = 0,90$$

Тоді:

$$E_5 = 18,5 \cdot 0,90 = 16,65 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

Час автономної роботи визначається за формулою:

$$t = \frac{E_5}{P_{load}}, \quad (2.51)$$

де t - час автономної роботи;

E_5 - корисна енергія на шині 5 В;

P_{load} - потужність навантаження.

Для розрахованого навантаження $P_{load} = 3,20$ Вт:

$$t = \frac{16,65}{3,20} = 5,20 \text{ год}$$

Отже, при використанні одного акумулятора 21700 ємністю 5 А·год контролер може працювати приблизно 5,2 год у режимі активного навантаження. Приклад розрахунку залежності часу автономної роботи від потужності навантаження наведено в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10. Залежність часу автономної роботи від потужності навантаження

Потужність навантаження, Вт	Час автономної роботи, год
2	8,33
3	5,55
3,20	5,20
4	4,16
5	3,33

2.7.3 Формування ізолюваної напруги 12 В

Для керування зовнішнім силовим модулем передбачається формування ізолюваної напруги 12 В. Для цього використовується DC/DC-перетворювач B0512S, який забезпечує гальванічну розв'язку між основною схемою контролера та зовнішнім обладнанням [29].

Максимальна вихідна потужність модуля B0512S-1W становить 1 Вт. При вихідній напрузі 12 В максимальний вихідний струм:

$$I_{outmax} = \frac{P_{outmax}}{U_{out}} \quad (2.52)$$

$$I_{outmax} = \frac{1}{12} = 0,083 \text{ A} = 83 \text{ mA}$$

Отриманого струму достатньо для живлення керуючих входів зовнішніх силових модулів, оптронних розв'язок або інших малопотужних кіл керування.

2.7.4 Живлення ізолюваного вимірювального вузла

Для живлення ізолюваної частини вимірювального модуля використовується DC/DC-перетворювач B0505S. Він формує ізолювану напругу 5 В з основної шини 5 В і забезпечує гальванічне розділення живлення цифрового монітора INA228 від основного контролера [31].

Максимальна вихідна потужність модуля B0505S-1W становить 1 Вт. При вихідній напрузі 5 В максимальний вихідний струм, за формулою 2.53, становить:

$$I_{outmax} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ A} = 200 \text{ mA}$$

Цього достатньо для живлення цифрового монітора INA228 та ізолюваної частини інтерфейсу I2C, оскільки їх споживання значно менше за 200 мА. Для попереднього розрахунку в таблиці 2.12 було прийнято струм 60 мА з боку основної шини 5 В, що дає запас за потужністю.

2.7.5 Підсумкова структура системи живлення

Підсумкова структура живлення контролера має такий вигляд:

1. Зовнішній адаптер 220 В → 5 В підключається до входу модуля IP5306.
2. Модуль IP5306 забезпечує заряджання акумулятора 21700 та формує основну шину живлення 5 В для всіх вузлів контролера.
3. При зникненні зовнішнього живлення IP5306 автоматично переходить на живлення від акумулятора без переривання роботи пристрою.
4. Живлення ізолюваного вимірювального вузла виконується через B0505S.
5. Ізолювана напруга 12 В для керування зовнішнім силовим модулем формується за допомогою B0512S.

6. Логічні рівні 3,3 В для ESP8266, OLED та температурного каналу забезпечуються стабілізатором на модулі мікроконтролера.

Отже, розроблена система живлення забезпечує роботу всіх основних вузлів контролера, має резервне живлення від акумулятора 21700 і дозволяє формувати необхідні рівні напруг 5 В, 3,3 В, ізольовані 5 В та ізольовані 12 В. Особливістю запропонованої структури є те, що всі вузли живляться від виходу модуля IP5306, а зовнішній адаптер 220 В $\rightarrow$ 5 В використовується як джерело живлення та зарядний пристрій для резервного акумулятора. Проведені розрахунки показують, що для живлення системи доцільно використовувати адаптер 5 В 2 А із запасом за потужністю.

2.8 Розробка електричної принципової схеми контролера

На основі структурної схеми, функціональних вимог і вибраної елементної бази була розроблена електрична принципова схема контролера локального енергетичного вузла. Її призначення полягає в об'єднанні основних функціональних вузлів пристрою: мікроконтролерного модуля, вимірювального каналу напруги та струму, температурного датчика, системи живлення, релейного виходу керування інвертором і виходу керування зовнішнім силовим модулем.

Електричну принципову схему наведено в додатку Б.

Центральним елементом схеми є модуль ESP8266 ESP-12F з OLED-дисплеєм, який виконує збір і обробку даних, відображення інформації, обробку команд користувача та передавання даних до хмарної платформи. Вимірювання напруги й струму здійснюється за допомогою цифрового монітора INA228, підключеного через інтерфейс I2C. Для забезпечення електробезпеки вимірювальний вузол гальванічно розв'язаний від мікроконтролера за допомогою ізолятора ISO1540 та ізольованого DC/DC-перетворювача B0505S. Також передбачено вимірювання температури за допомогою NTC-термістора.

Живлення системи реалізоване на базі модуля IP5306 з резервуванням від акумулятора 21700. Для керування зовнішнім обладнанням використовуються

релейний вихід для інвертора та ізольований вихід 12 В для силового модуля. Схема забезпечує вимірювання основних електричних параметрів, локальну індикацію, резервне живлення, дистанційний моніторинг і керування зовнішніми пристроями.

Висновки до розділу 2

У другому розділі розроблено структуру контролера локального енергетичного вузла децентралізованої мережі автоматизованих електропідстанцій. Визначено основні функції пристрою: вимірювання напруги, струму та температури, локальний захист, обмін даними з хмарною платформою, а також керування інвертором і силовим модулем.

Обґрунтовано модульну конструкцію, за якої основний контролер залишається універсальним, а вимірювальні та силові модулі можуть змінюватися залежно від параметрів енергетичного вузла. Це забезпечує адаптацію до різних рівнів напруги, струму та потужності без зміни базової схеми.

Для керуючої частини обрано ESP8266 ESP-12F з OLED-дисплеєм, для контролю температури — NTC-термістор 10 кОм B3950. Для вимірювання напруги та струму використано цифровий монітор INA228, а також виконано розрахунок зовнішніх шунтів для різних діапазонів струму.

Розглянуто низьковольтний MOSFET-модуль на IRFP4468PbF і високовольтний IGBT-модуль на IRG4PC50UD. Проведені розрахунки підтвердили необхідність ефективного тепловідведення та визначили основні параметри їх застосування.

Також розроблено систему живлення контролера з резервним акумулятором, ізольованими вузлами живлення та виходом для керування силовим модулем. Завершальним етапом стала розробка електричної принципової схеми, яка об'єднує всі вибрані апаратні рішення та є основою для подальшої реалізації програмного забезпечення контролера.

3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОНТРОЛЕРА

3.1 Загальна логіка роботи контролера

Після розробки апаратної частини контролера необхідно визначити загальну логіку його роботи. Програмне забезпечення повинно забезпечувати послідовне виконання основних функцій пристрою: ініціалізацію апаратних вузлів, зчитування вимірювальних параметрів, розрахунок похідних величин, перевірку аварійних умов, керування виконавчими виходами, роботу локального меню та обмін даними з хмарною платформою.

Контролер локального енергетичного вузла працює циклічно. Після подачі живлення мікроконтролер виконує початкову ініціалізацію, перевіряє працездатність основних вузлів, завантажує збережені налаштування користувача та переходить до основного циклу роботи. У цьому циклі пристрій періодично зчитує напругу, струм і температуру, обчислює потужність, перевіряє стан зв'язку з хмарною платформою та приймає рішення щодо дозволу або заборони роботи зовнішнього обладнання.

Основна логіка роботи контролера наведена на рисунку 3.1 та додатку Г.

Умовно роботу програмного забезпечення можна поділити на такі етапи:

1. Ініціалізація пристрою.
2. Зчитування налаштувань користувача.
3. Вимірювання параметрів локального вузла.
4. Розрахунок потужності та стану вузла.
5. Перевірка аварійних умов.
6. Обробка команд із хмарної платформи.
7. Керування релейним виходом та зовнішнім силовим модулем.
8. Оновлення інформації на OLED-дисплеї.
9. Обробка кнопок і меню користувача.

10. Передавання даних до хмарної платформи.

Загальний алгоритм роботи контролера

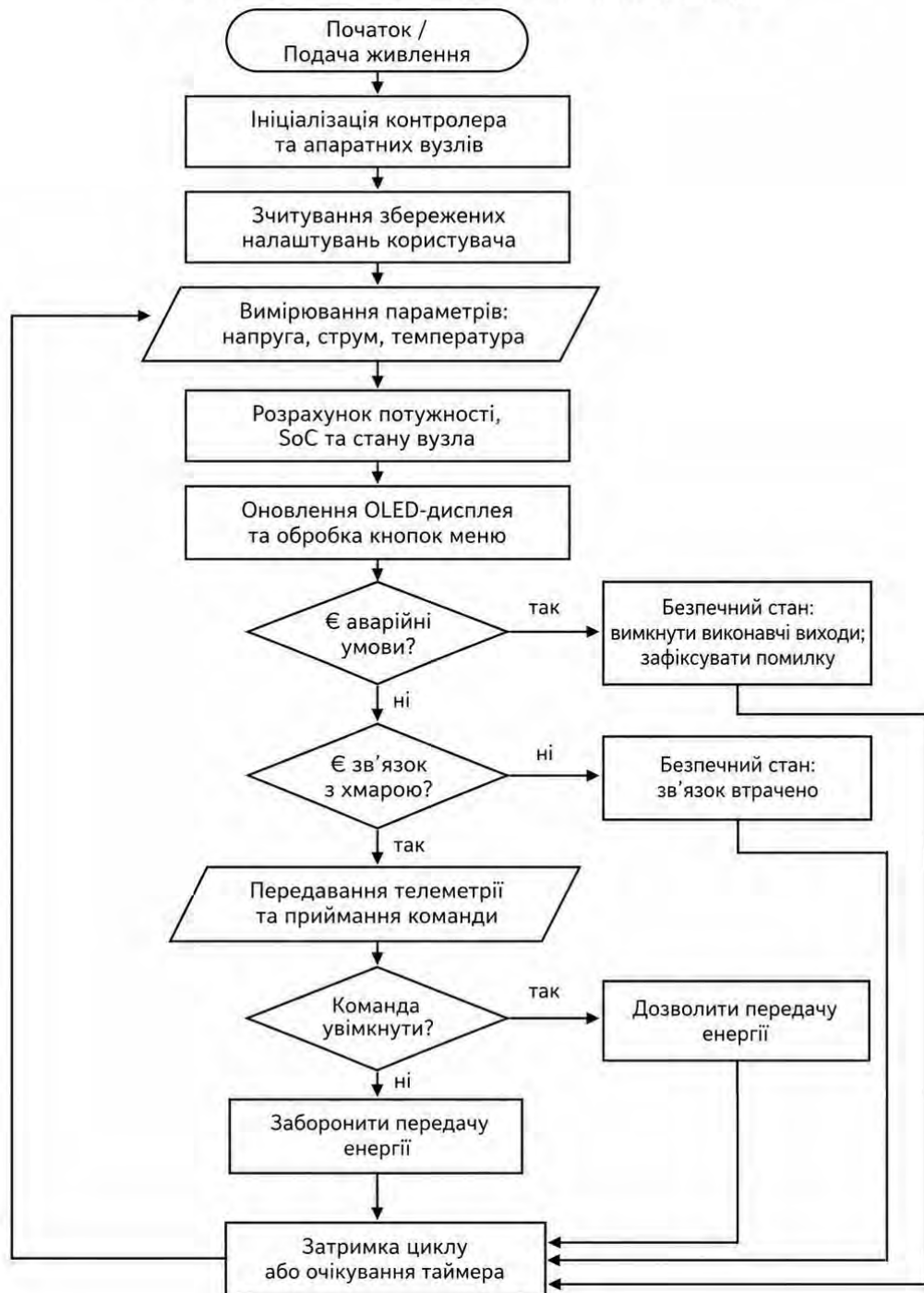


Рисунок 3.1. Загальний алгоритм роботи контролера локального енергетичного вузла

Під час ініціалізації контролер налаштовує порти введення-виведення, інтерфейси зв'язку, OLED-дисплей, вимірювальний модуль INA228, температурний канал, релейний вихід і вихід керування зовнішнім силовим

модулем. Також на цьому етапі виконується підключення до Wi-Fi та перевірка доступності хмарної платформи.

Після запуску контролер завантажує збережені параметри користувача. До таких параметрів належать напруга повного заряду, напруга повного розряду, параметри зовнішнього шунта, максимальна потужність інвертора, адреса встановлення, ідентифікатор пристрою та інші налаштування. Збереження цих параметрів необхідне для того, щоб пристрій міг відновити роботу після перезавантаження без повторного ручного налаштування.

У режимі нормальної роботи контролер періодично виконує вимірювання напруги, струму та температури.

Отримані значення використовуються не тільки для відображення на дисплеї та передавання до хмарної платформи, а й для локальної перевірки допустимих режимів роботи. Контролер повинен самостійно реагувати на аварійні умови, незалежно від стану зв'язку із сервером. Це важливо, оскільки захист енергетичного вузла не повинен залежати від наявності інтернет-з'єднання.

До основних аварійних умов належать:

1. зниження напруги нижче встановленого порогу повного розряду;
2. перевищення допустимого струму;
3. перевищення температури 60 °C;
4. втрата зв'язку з хмарною платформою;
5. помилка вимірювального модуля або некоректні дані.

Якщо аварійних умов немає, контролер може виконувати команду хмарної платформи на ввімкнення передачі енергії. У такому випадку активується релейний вихід керування on-grid інвертором або вихід керування зовнішнім силовим модулем. Якщо ж хоча б одна аварійна умова присутня, контролер повинен перевести вузол у безпечний стан: вимкнути передачу енергії, розімкнути або змінити стан відповідного виконавчого виходу та відобразити повідомлення про помилку на дисплеї.

Окремою частиною загальної логіки є робота локального інтерфейсу користувача. За допомогою кнопок і OLED-дисплея користувач може переглядати

поточні параметри, змінювати налаштування шунта, задавати напругу повного заряду та повного розряду, встановлювати максимальну потужність інвертора й переглядати стан помилок. Меню користувача має працювати паралельно з основним циклом вимірювання та захисту, щоб зміна налаштувань не зупиняла контроль аварійних режимів.

Обмін із хмарною платформою виконується періодично. Контролер передає ID пристрою, адресу встановлення, ємність вузла, максимально можливу потужність, поточний заряд, поточну потужність. У відповідь пристрій може отримувати команду на ввімкнення або вимкнення передачі енергії. При цьому команда сервера не має вищого пріоритету за локальний захист: якщо параметри вузла виходять за допустимі межі, передавання енергії блокується незалежно від отриманої команди.

Таким чином, загальна логіка роботи контролера базується на пріоритеті безпеки. Спочатку виконуються вимірювання та перевірка аварійних умов, після цього обробляються команди диспетчеризації, і лише за відсутності помилок дозволяється робота зовнішнього обладнання. Такий підхід забезпечує автономний локальний захист енергетичного вузла та водночас дозволяє інтегрувати його в децентралізовану мережу з хмарним керуванням.

3.2 Алгоритм ініціалізації пристрою

Ініціалізація пристрою є першим етапом роботи програмного забезпечення після подачі живлення або перезавантаження мікроконтролера. Її основна задача полягає у підготовці всіх апаратних і програмних вузлів до подальшої роботи: налаштуванні портів введення-виведення, запуску інтерфейсів зв'язку, перевірці вимірювального модуля, зчитуванні збережених параметрів користувача та переведенні виконавчих виходів у безпечний початковий стан.

Алгоритм ініціалізації пристрою наведено на рисунку 3.2.

Алгоритм ініціалізації контролера

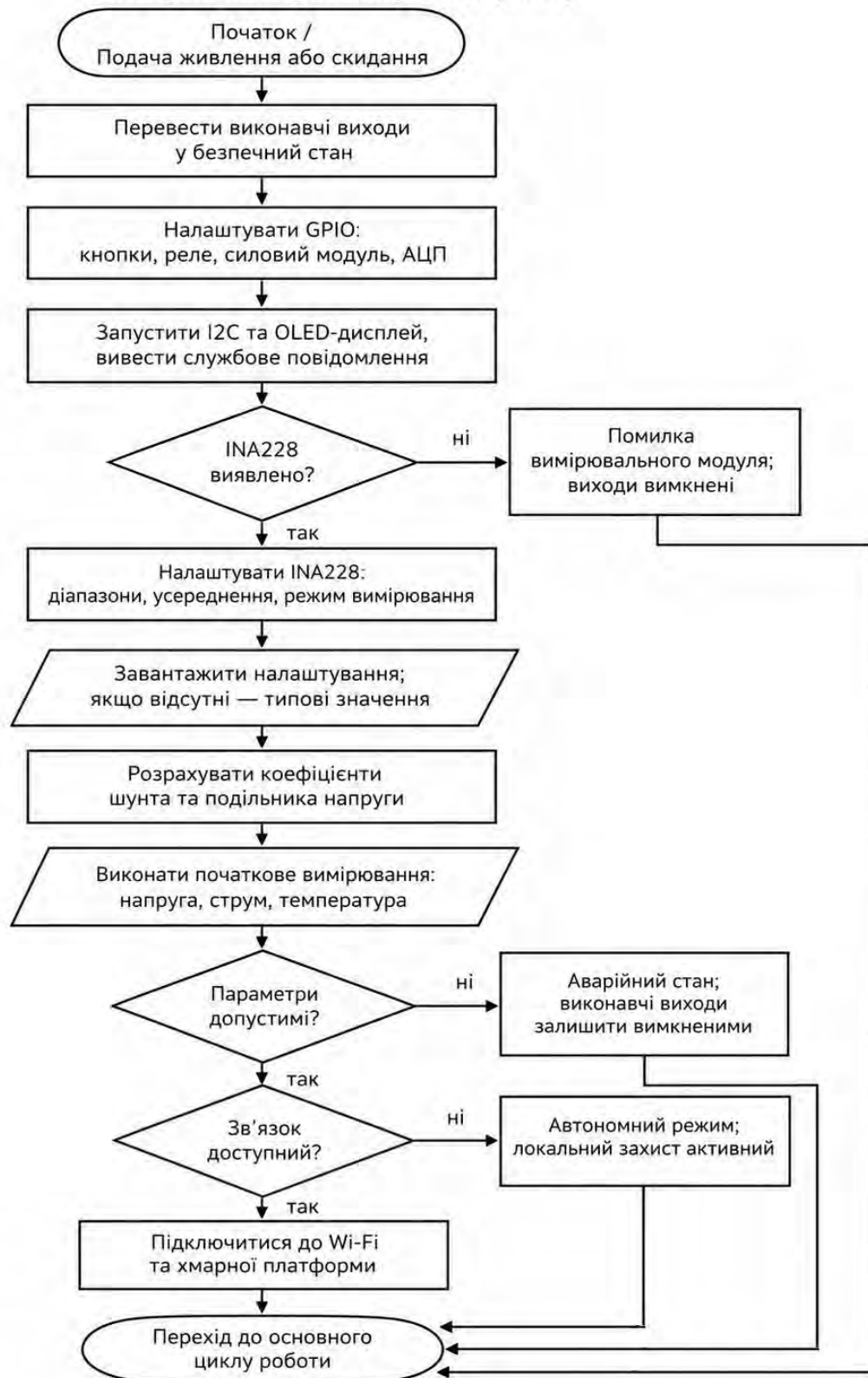


Рисунок 3.2. Алгоритм ініціалізації контролера

Після подачі живлення мікроконтролер ESP8266 запускає програму з початкової функції налаштування. На цьому етапі всі виконавчі виходи повинні

бути переведені у безпечний стан. Це означає, що релейний вихід керування інвертором має забороняти передачу енергії, а вихід керування зовнішнім силовим модулем має бути вимкнений. Такий підхід необхідний для того, щоб під час запуску або перезавантаження пристрою не виникло випадкового ввімкнення інвертора чи силового модуля.

Першим етапом ініціалізації є налаштування портів мікроконтролера. Виводи, до яких підключені кнопки меню, налаштовуються як цифрові входи та використовують зовнішні підтягуючі резистори, передбачені апаратною схемою пристрою. Виводи керування реле та силовим модулем налаштовуються як цифрові виходи. Аналоговий вхід використовується для зчитування температурного каналу, побудованого на NTC-термісторі.

Далі виконується запуск локального інтерфейсу користувача. OLED-дисплей ініціалізується через інтерфейс I2C, після чого на ньому може відображатися службове повідомлення про запуск пристрою. На цьому етапі доцільно вивести назву пристрою, версію програмного забезпечення та короткий статус ініціалізації.

Наступним етапом є запуск цифрового інтерфейсу I2C та перевірка наявності вимірювального модуля INA228. Оскільки INA228 підключений через гальванічну розв'язку ISO1540, мікроконтролер повинен перевірити, чи доступна мікросхема за відповідною I2C-адресою. Якщо вимірювальний модуль не відповідає, пристрій повинен зафіксувати помилку, заборонити роботу інвертора та перейти в режим очікування або режим аварійного повідомлення.

Після виявлення INA228 виконується його програмне налаштування. До таких налаштувань належать вибір режиму вимірювання, конфігурація часу перетворення, усереднення вимірювань, параметри шунта та коефіцієнти перерахунку струму й потужності. Частина цих параметрів залежить від налаштувань користувача, зокрема від номінального струму шунта та падіння напруги на ньому.

Окремим етапом ініціалізації є завантаження збережених параметрів із енергонезалежної пам'яті. До них належать:

1. ідентифікатор пристрою;
2. ємність енергетичного вузла у ват-годинах;
3. максимально можлива потужність інвертора;
4. напруга повного заряду;
5. напруга повного розряду;
6. номінальний струм зовнішнього шунта;
7. номінальне падіння напруги на шунті;
8. режим роботи релейного виходу;
9. параметри підключення до Wi-Fi та хмарної платформи.

Якщо в пам'яті відсутні коректні налаштування, контролер повинен використати типові значення або запропонувати користувачу виконати початкове налаштування через меню. При цьому передача енергії в мережу має залишатися заблокованою до завершення налаштування критичних параметрів, зокрема напруги повного розряду, параметрів шунта та максимальної потужності інвертора.

Після завантаження налаштувань виконується розрахунок допоміжних коефіцієнтів. Наприклад, за заданими параметрами шунта обчислюється його опір.

Також може бути попередньо розрахований коефіцієнт перерахунку напруги для розширеного входу до 500 В, якщо використовується зовнішній резистивний подільник.

Після цього контролер виконує початкове зчитування напруги, струму та температури. Цей етап потрібний для перевірки реального стану вузла перед дозволом подальшої роботи. Якщо виміряні значення є некоректними, виходять за допустимі межі або не можуть бути отримані, пристрій повинен перейти в аварійний стан.

Наступним етапом є підключення до Wi-Fi. Якщо підключення успішне, контролер намагається встановити зв'язок із хмарною платформою та передати початковий пакет даних про стан пристрою. Якщо підключення до мережі або сервера неможливе, контролер фіксує втрату зв'язку. Залежно від заданої логіки

безпеки пристрій може залишатися в режимі локального моніторингу, але передача енергії в мережу має бути заборонена до відновлення зв'язку.

Після завершення всіх етапів ініціалізації контролер переходить до основного циклу роботи. У цьому циклі виконуються періодичні вимірювання, розрахунок параметрів, перевірка аварійних умов, оновлення дисплея, обробка меню та обмін даними з хмарною платформою.

Узагальнений порядок ініціалізації можна подати так:

1. Подача живлення на контролер.
2. Переведення виконавчих виходів у безпечний стан.
3. Налаштування GPIO мікроконтролера.
4. Запуск OLED-дисплея.
5. Запуск інтерфейсу I2C.
6. Перевірка наявності INA228.
7. Налаштування вимірювального модуля.
8. Завантаження параметрів користувача з пам'яті.
9. Розрахунок коефіцієнтів для шунта та подільника напруги.
10. Початкове вимірювання напруги, струму та температури.
11. Перевірка аварійних умов.
12. Підключення до Wi-Fi та хмарної платформи.
13. Перехід до основного циклу роботи.

Таким чином, алгоритм ініціалізації забезпечує безпечний запуск контролера та підготовку всіх вузлів до роботи. Особливістю алгоритму є те, що до завершення перевірки вимірювального модуля, завантаження налаштувань і контролю аварійних умов виконавчі виходи залишаються вимкненими. Це дозволяє запобігти випадковому ввімкненню інвертора або силового модуля під час запуску пристрою.

3.3 Алгоритм вимірювання та розрахунку параметрів локального вузла

Після завершення ініціалізації контролер переходить до періодичного вимірювання основних параметрів локального енергетичного вузла. До таких параметрів належать напруга джерела або буфера енергії, струм заряду чи розряду, температура контролюваної зони, поточна потужність, орієнтовний рівень заряду та стан виконавчих виходів. Ці дані використовуються для локального захисту, відображення на OLED-дисплеї та передавання до хмарної платформи.

Вимірювання напруги та струму виконується цифровим монітором INA228. Мікроконтролер отримує від нього значення напруги шини, падіння напруги на шунті, розрахований струм і додаткові службові параметри. Оскільки вимірювальний модуль підключений через гальванічну розв'язку, обмін даними відбувається через інтерфейс I2C та ізолятор ISO1540.

На початку циклу вимірювання контролер перевіряє готовність INA228 до передавання даних. Якщо мікросхема не відповідає або повертає некоректні значення, формується ознака помилки вимірювального вузла. У такому випадку поточні дані не використовуються для керування інвертором, а контролер повинен перейти до логіки аварійного захисту.

Для визначення струму через зовнішній шунт використовується падіння напруги на шунті та попередньо розрахований опір шунта. Також опір шунта визначається за параметрами, заданими користувачем у меню. Такий підхід дозволяє використовувати один контролер із різними зовнішніми шунтами, наприклад 100 А / 75 мВ, 200 А / 75 мВ або 500 А / 75 мВ. Після зміни параметрів шунта в меню контролер перераховує коефіцієнти вимірювання без зміни апаратної частини.

Алгоритм вимірювання струму наведено на рисунку 3.3.

Алгоритм вимірювання струму

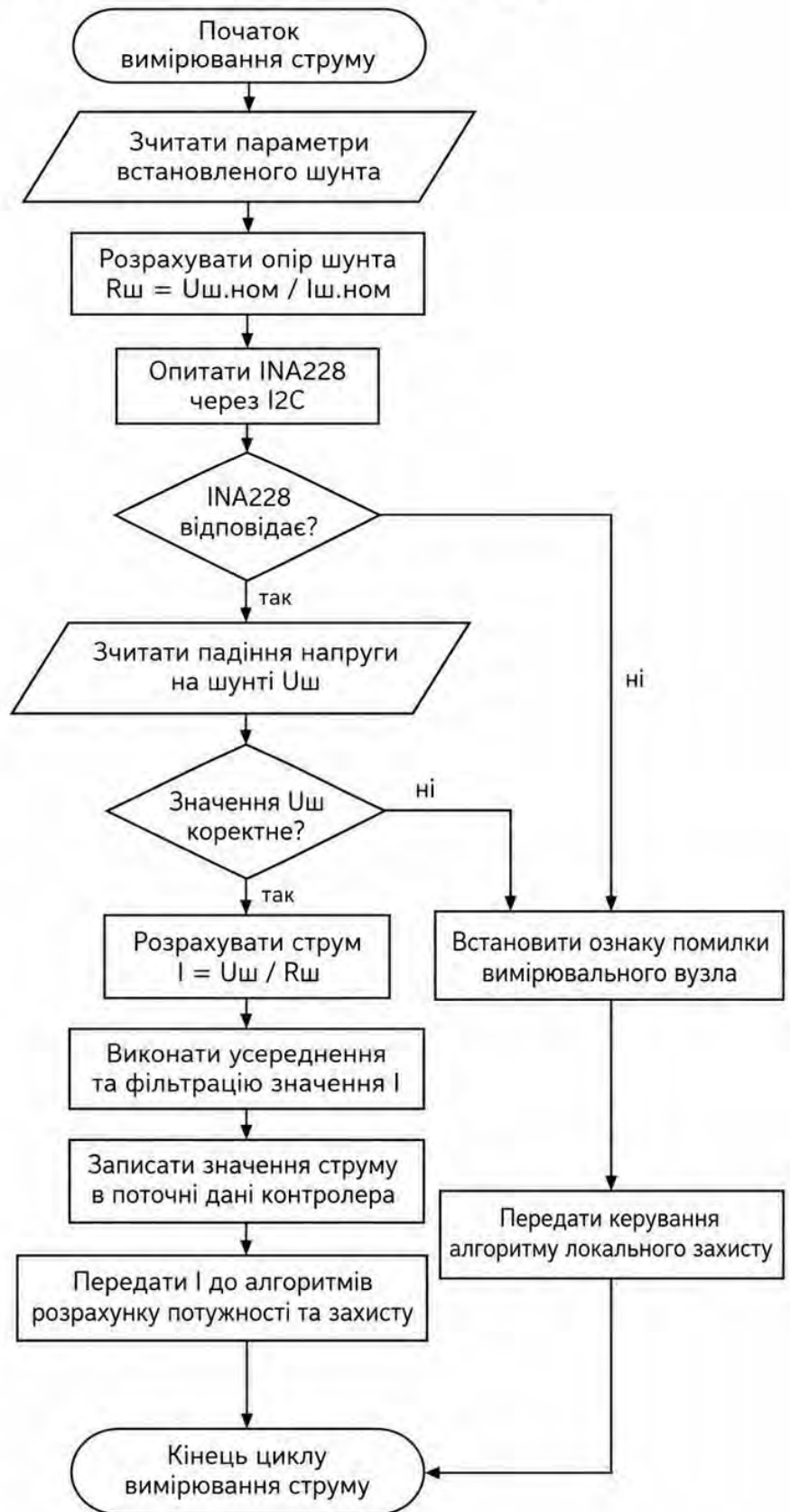


Рисунок 3.3. Алгоритм вимірювання струму

Вимірювання напруги може виконуватися у двох діапазонах. У першому випадку напруга до 85 В подається безпосередньо на вхід вимірювального модуля. У другому випадку, для розширеного діапазону до 500 В, використовується зовнішній резистивний подільник. Якщо активний розширений вхід, реальна напруга джерела визначається з урахуванням коефіцієнта масштабування:

$$U = U_{meas} \cdot K_U \quad (3.1)$$

де U - реальна напруга джерела;

U_{meas} - напруга, виміряна INA228 після подільника;

K_U - коефіцієнт масштабування подільника.

Коефіцієнт масштабування визначається як:

Для подільника, розрахованого в другому розділі, коефіцієнт масштабування становить приблизно 6. Це означає, що вимірне значення напруги після подільника необхідно помножити на 6.

Алгоритм вимірювання струму наведено на рисунку 3.4.

Температура вимірюється за допомогою NTC-термістора 10 кОм В3950, підключеного у складі резистивного подільника. Спочатку мікроконтролер зчитує напругу на аналоговому вході, після чого розраховує опір термістора, за формулою 2.4. Після визначення опору температура розраховується за формулою 2.3.

Для зменшення впливу випадкових завад вимірювання доцільно виконувати з усередненням. Наприклад, контролер може виконувати кілька послідовних зчитувань напруги, струму та температури, після чого обчислювати середнє значення:

$$X_{avg} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}, \quad (3.2)$$

де X_{avg} - усереднене значення параметра;

X_1, X_2, X_n - окремі результати вимірювань;

n - кількість вимірювань.

Алгоритм вимірювання напруги

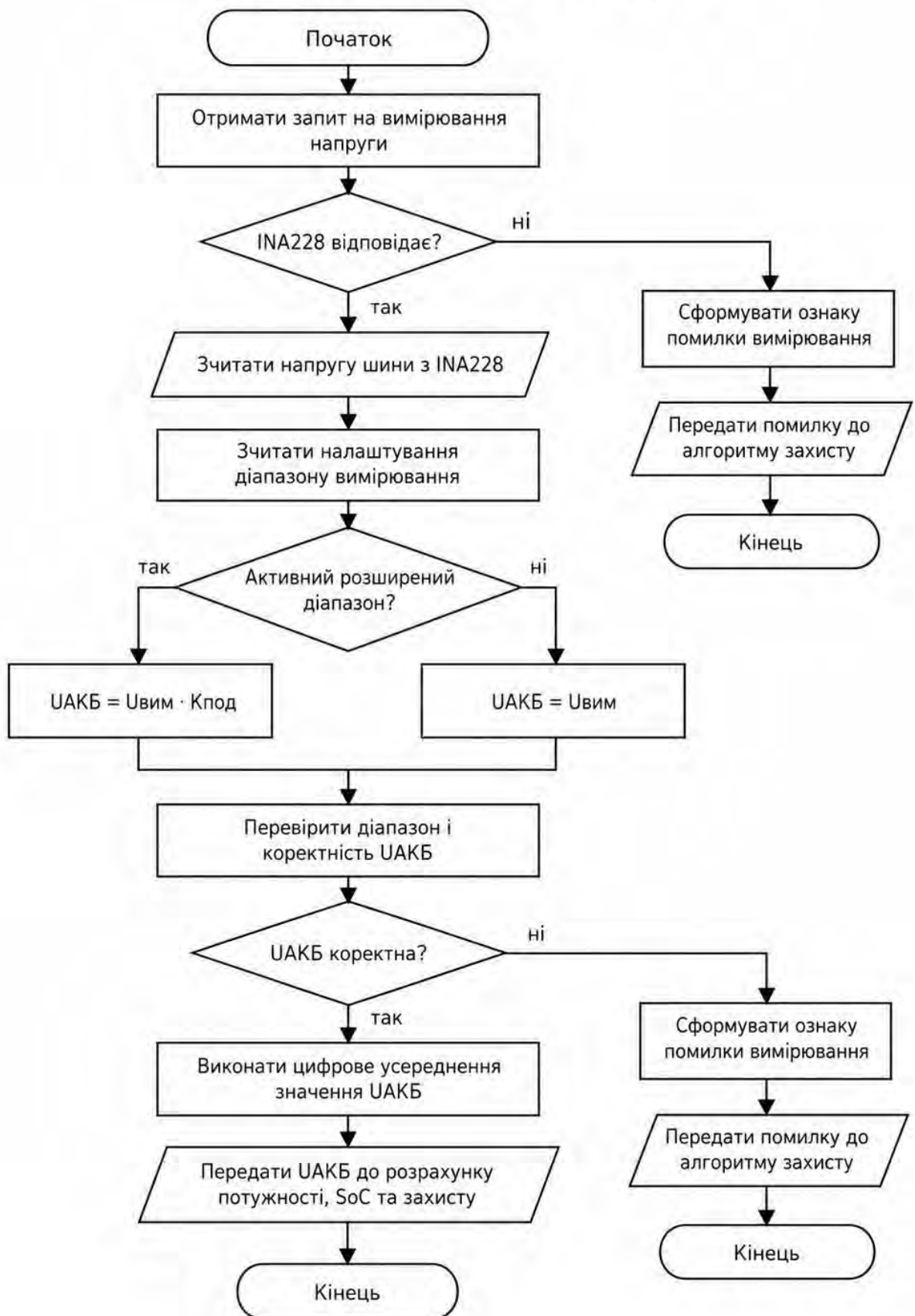


Рисунок 3.4. Алгоритм вимірювання напруги

На основі вимірної напруги та струму контролер розраховує поточну потужність локального вузла, за формулою 2.7.

Знак струму може використовуватися для визначення напрямку енергетичного процесу. Якщо струм має додатне значення, це може відповідати розряду або передачі енергії в мережу. Якщо струм має від'ємне значення, це може відповідати заряду акумуляторного буфера. Конкретна інтерпретація знаку залежить від напрямку підключення шунта та налаштувань програмного забезпечення.

Орієнтовний рівень заряду енергетичного вузла може визначатися за напругою джерела відносно встановлених користувачем меж повного заряду та повного розряду. Для спрощеної оцінки використовується лінійна залежність:

$$SOC = \frac{U - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

де SOC - орієнтовний рівень заряду;

U - поточна напруга джерела;

U_{min} - напруга повного розряду;

U_{max} - напруга повного заряду.

Якщо розраховане значення SOC менше 0 %, воно обмежується нулем. Якщо значення перевищує 100 %, воно обмежується 100 %. Такий метод не є високоточним способом визначення ємності акумулятора, але він дозволяє отримати орієнтовний показник стану вузла для диспетчеризації та локального відображення.

Для оцінювання фактично відданої енергії контролер виконує інтегрування потужності за часом. Для дискретного алгоритму розрахунок енергії виконується за формулою:

$$E = E_{prev} + P \cdot \frac{\Delta t}{3600} \quad (3.4)$$

де E - накопичене значення енергії, Вт·год;

E_{prev} - попереднє значення накопиченої енергії;

P - поточна потужність, Вт;

Δt - інтервал між вимірюваннями, с.

Однак накопичене значення енергії не використовується безпосередньо як паспортна ємність енергетичного вузла. Для визначення фактичної доступної ємності контролер додатково відстежує завершені цикли розряду. Початком циклу вважається досягнення рівня заряду в діапазоні 95-100 %, а завершенням - зниження рівня заряду до 0-10 %.

Під час такого циклу контролер накопичує сумарну віддану енергію:

$$E_{cycle} = \frac{\sum(P_i \cdot \Delta t_i)}{3600} \quad (3.5)$$

де E_{cycle} - енергія, віддана протягом циклу розряду;

P_i - миттєве значення потужності на i -му інтервалі;

Δt_i - тривалість i -го інтервалу вимірювання.

Після завершення циклу розряду отримане значення E_{cycle} може вважатися оцінкою фактичної корисної ємності енергетичного вузла у ват-годинах. Для збереження результату після вимкнення живлення контролер записує це значення до енергонезалежної пам'яті. Запис виконується лише після завершення повного або майже повного циклу розряду, що дозволяє уникнути надмірної кількості операцій запису та збільшити ресурс пам'яті.

Алгоритм вимірювання фактичної ємності наведено на рисунку 3.5.

Збережене значення фактичної ємності може використовуватися для:

- ❖ відображення доступної енергії користувачу;
- ❖ оцінювання залишкового часу автономної роботи;
- ❖ порівняння поточного стану акумулятора з попередніми циклами;
- ❖ виявлення деградації накопичувача енергії;
- ❖ передавання інформації до хмарної платформи моніторингу.

Алгоритм вимірювання фактичної ємності

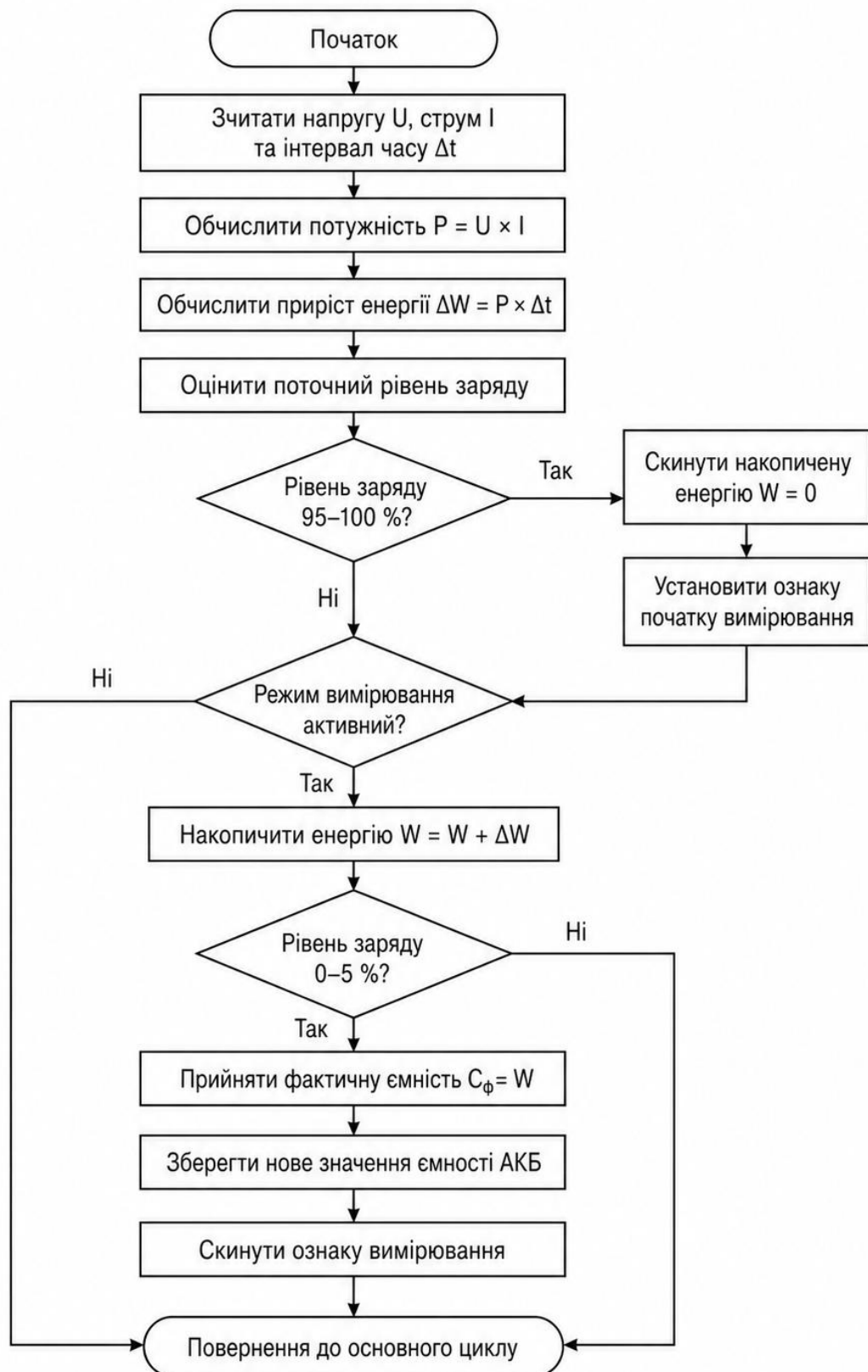


Рисунок 3.5. Алгоритм вимірювання фактичної ємності

Після завершення розрахунків контролер формує набір актуальних параметрів локального вузла. До нього входять:

- ❖ напруга джерела;
- ❖ струм заряду або розряду;
- ❖ поточна потужність;
- ❖ температура;
- ❖ орієнтовний рівень заряду;
- ❖ накопичена енергія поточного циклу;
- ❖ оцінена фактична ємність вузла у ват-годинах;
- ❖ стан зв'язку;
- ❖ стан релейного виходу;
- ❖ стан зовнішнього силового модуля;
- ❖ наявність аварійних ознак.

Ці параметри передаються до наступних частин програмного забезпечення: алгоритму локального захисту, меню користувача, OLED-індикації та алгоритму обміну з хмарною платформою. Таким чином, блок вимірювання та розрахунку параметрів є центральним елементом програмної логіки, оскільки саме на його основі приймаються рішення про стан локального енергетичного вузла.

Узагальнена послідовність роботи алгоритму вимірювання така:

1. Перевірити доступність вимірювального модуля INA228.
2. Зчитати напругу шини та падіння напруги на шунті.
3. Розрахувати струм за параметрами зовнішнього шунта.
4. Визначити напругу з урахуванням активного діапазону вимірювання.
5. Зчитати напругу з температурного подільника.
6. Розрахувати опір NTC-термістора.
7. Розрахувати температуру.
8. Усереднити результати вимірювань.
9. Розрахувати поточну потужність.
10. Оцінити рівень заряду.

11. Накопичувати енергію під час циклу розряду.
12. Визначити завершення циклу розряду.
13. Зафіксувати фактичну ємність у ват-годинах та записати її до енергонезалежної пам'яті.
14. Передати отримані параметри до алгоритмів захисту, індикації та обміну з хмарною платформою.

Отже, алгоритм вимірювання та розрахунку параметрів забезпечує отримання повної інформації про стан локального енергетичного вузла. Він враховує налаштування зовнішнього шунта, вибраний діапазон вимірювання напруги, температурний контроль, оцінювання рівня заряду та визначення фактичної ємності накопичувача за результатами завершених циклів розряду, що необхідно для подальшої роботи контролера та системи моніторингу.

3.4 Алгоритм локального захисту та аварійного відключення

Алгоритм локального захисту є однією з основних частин програмного забезпечення контролера, оскільки саме він забезпечує безпечну роботу локального енергетичного вузла незалежно від стану хмарної платформи або наявності інтернет-з'єднання. На відміну від команд диспетчеризації, які можуть лише дозволяти або забороняти передачу енергії, локальний захист має найвищий пріоритет і повинен спрацьовувати автономно при виході параметрів за допустимі межі.

Алгоритм локального захисту та аварійного відключення наведено на рисунку 3.6.

Основними аварійними умовами для розроблюваного контролера є:

- ❖ зниження напруги джерела нижче порогу повного розряду;
- ❖ перевищення допустимого струму;
- ❖ перевищення температури 60 °C;
- ❖ втрата зв'язку з хмарною платформою;
- ❖ помилка вимірювального модуля INA228;

- ❖ некоректні або відсутні вимірювальні дані.

Алгоритм локального захисту та аварійного відключення

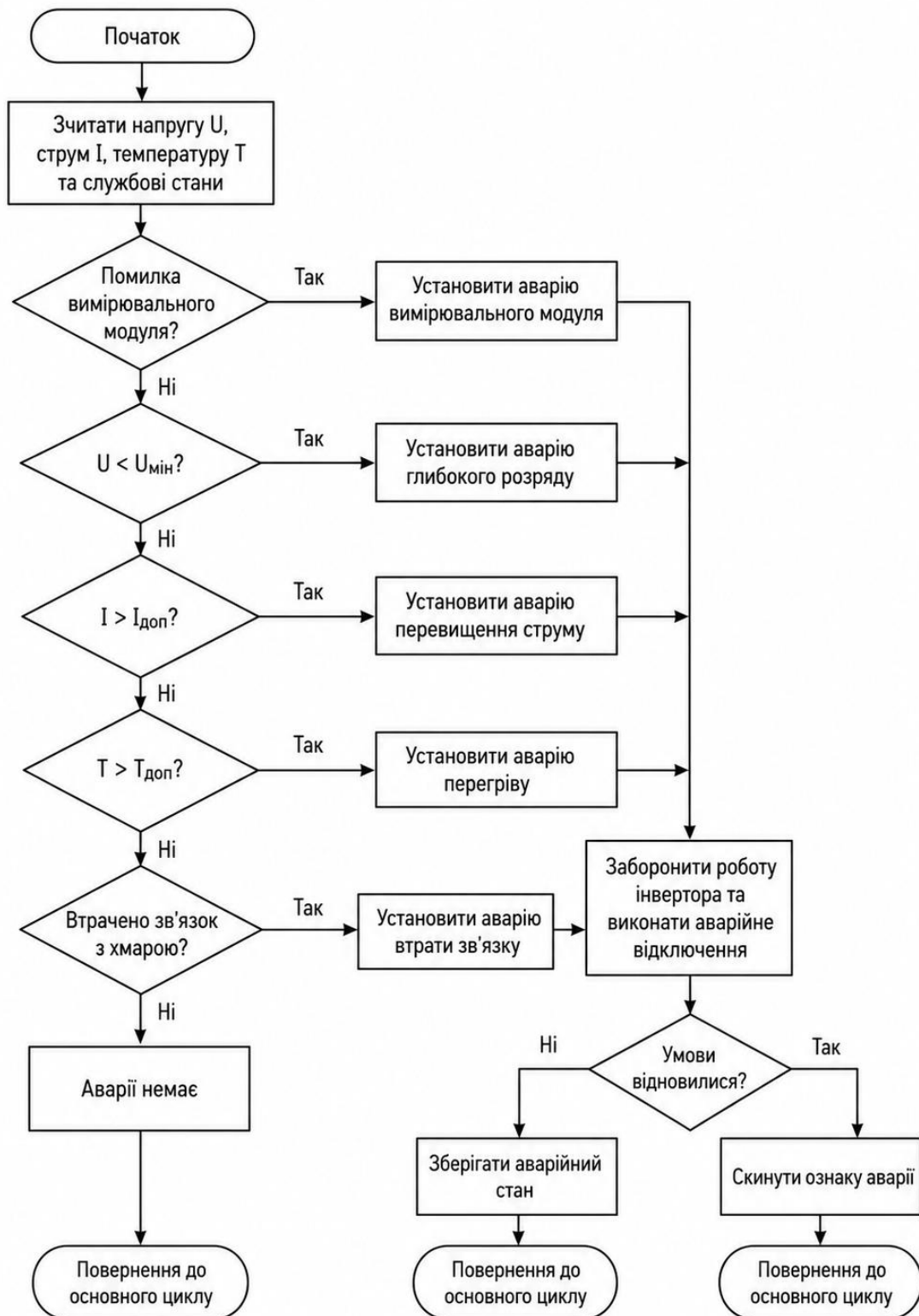


Рисунок 3.6. Алгоритм локального захисту та аварійного відключення

Після кожного циклу вимірювання контролер отримує актуальні значення напруги, струму, температури, потужності та стану зв'язку. На основі цих параметрів формується набір логічних ознак аварійного стану. Якщо хоча б одна з ознак активна, контролер блокує передачу енергії та переводить виконавчі виходи у безпечний стан.

3.4.1 Захист від глибокого розряду

Захист від глибокого розряду потрібний для запобігання надмірному розрядженню акумуляторного буфера або іншого джерела постійного струму. Користувач задає два основні параметри: напругу повного заряду U_{max} напругу повного розряду U_{min} якщо поточна напруга джерела стає меншою або рівною U_{min} онтролер повинен заборонити подальшу передачу енергії.

Для уникнення частого перемикавання біля порогового значення доцільно використовувати гістерезис. У такому випадку після спрацювання захисту повторний дозвіл роботи можливий лише тоді, коли напруга підніметься вище порогу відновлення:

$$U \geq U_{min} + \Delta U_{hyst}, \quad (3.6)$$

де ΔU_{hyst} - напруга гістерезису.

Наприклад, якщо поріг повного розряду встановлено на рівні 60 В, а гістерезис становить 2 В, то відключення відбудеться при $U \leq 60$ В, а повторний дозвіл роботи буде можливий лише після підвищення напруги до 62 В.

3.4.2 Захист за струмом

Захист за струмом використовується для обмеження навантаження на силовий модуль, шунт, проводи та зовнішній інвертор. Поріг струмового захисту визначається на основі максимальної потужності інвертора та поточної напруги

джерела. У роботі прийнято, що струм аварійного спрацювання задається із запасом у два рази відносно розрахункового робочого струму інвертора.

Якщо виміряний струм перевищує розрахований поріг, контролер повинен вимкнути передачу енергії.

Для зменшення ймовірності хибного спрацювання від короткочасних імпульсів доцільно використовувати часову затримку. Наприклад, аварія за струмом фіксується лише тоді, коли перевищення триває довше певного часу.

У такому випадку короткі імпульсні завади або перехідні процеси не будуть одразу вимикати систему, але тривале перевантаження призведе до аварійного відключення.

3.4.3 Захист від перегріву

Температурний захист призначений для виявлення перегріву силових елементів, корпусу, шунта або зони розміщення силового модуля. У даному проєкті аварійний поріг температури прийнято рівним 60 °C. Якщо виміряна температура перевищує цей поріг, контролер блокує роботу зовнішнього обладнання.

Як і у випадку напруги, для температурного захисту доцільно використовувати гістерезис. Наприклад, якщо відключення відбувається при 60 °C, то повторний дозвіл роботи можна дозволити лише після охолодження до 55 °C.

Такий підхід запобігає частому вмиканню та вимиканню системи при температурі, близькій до аварійного порогу.

3.4.4 Захист при втраті зв'язку

Оскільки контролер є частиною децентралізованої мережі та отримує команди від хмарної платформи, втрата зв'язку також повинна враховуватися як аварійна або обмежувальна умова. Якщо пристрій не може передати дані на сервер

або не отримує підтвердження зв'язку протягом заданого часу, він повинен перейти у безпечний стан.

Наприклад, якщо протягом 10хв контролер не може обмінятися даними з хмарною платформою, він вимикає передачу енергії та відображає повідомлення про втрату зв'язку. При цьому локальне вимірювання та відображення параметрів можуть продовжувати працювати.

3.4.5 Захист при помилці вимірювального модуля

Окремо контролюється працездатність вимірювального модуля INA228. Якщо мікросхема не відповідає через I2C, повертає некоректні значення або виміряні параметри виходять за фізично допустимі межі, контролер не повинен використовувати ці дані для керування.

Ознаками помилки вимірювального модуля можуть бути:

1. відсутність відповіді INA228 на I2C-запит;
2. неможливе або нульове значення напруги при активному вузлі;
3. різкий стрибок виміряного струму, який не відповідає реальному режиму;
4. значення поза допустимим діапазоном АЦП;
5. помилка контрольного статусу або прапор переповнення в регістрах мікросхеми.

При виникненні такої помилки контролер повинен вимкнути передачу енергії, оскільки без достовірного вимірювання неможливо гарантувати безпечну роботу вузла.

3.4.6 Відновлення після аварії

Відновлення роботи після аварійного відключення повинно виконуватися обережно, щоб не допустити повторного миттєвого ввімкнення при нестабільних параметрах. Для цього використовуються умови скидання аварії. Наприклад:

- ❖ напруга повинна бути вищою за поріг відновлення;

- ❖ струм повинен бути нижчим за допустимий рівень;
- ❖ температура повинна знизитися нижче порогу відновлення;
- ❖ зв'язок із хмарною платформою повинен бути відновлений;
- ❖ вимірювальний модуль повинен відповідати коректно.

Після зникнення аварійних умов контролер може перейти з аварійного стану в режим очікування. Однак передача енергії в мережу повинна вмикатися лише після нової команди від хмарної платформи або після ручного підтвердження користувача, залежно від заданої логіки роботи. Такий підхід зменшує ризик неконтрольованого повторного запуску системи.

Узагальнена послідовність роботи алгоритму локального захисту така:

1. Отримати актуальні значення напруги, струму, температури та стану зв'язку.
2. Перевірити напругу відносно порогу повного розряду.
3. Розрахувати допустимий струм за максимальною потужністю інвертора.
4. Перевірити струм відносно розрахованого порогу.
5. Перевірити температуру відносно порогу 60 °C.
6. Перевірити наявність зв'язку з хмарною платформою.
7. Перевірити працездатність вимірювального модуля INA228.
8. Сформувати загальну ознаку аварійного стану.
9. Якщо аварія відсутня — дозволити обробку команди диспетчеризації.
10. Якщо аварія наявна — вимкнути релейний вихід і зовнішній силовий модуль.
11. Відобразити причину аварії на OLED-дисплеї.
12. Передати інформацію про аварію до хмарної платформи після появи зв'язку.
13. Після нормалізації параметрів перейти в режим очікування або вимагати повторного дозволу роботи.

Таким чином, алгоритм локального захисту забезпечує автономне аварійне відключення локального енергетичного вузла при небезпечних режимах роботи. Пріоритет локального захисту над командами хмарної платформи дозволяє

зменшити ризик пошкодження акумуляторного буфера, силового модуля, інвертора та інших елементів системи.

3.5 Розробка меню користувача та системи налаштувань

Для забезпечення автономної роботи контролера необхідно передбачити локальний інтерфейс користувача. Він дозволяє переглядати основні параметри локального енергетичного вузла, змінювати налаштування вимірювальних каналів, задавати пороги захисту та контролювати стан пристрою без підключення до комп'ютера. У розроблюваному контролері локальний інтерфейс реалізується за допомогою OLED-дисплея та кнопок керування.

Для підвищення зручності використання інтерфейс контролера поділено на два рівні: зовнішнє меню та внутрішнє меню налаштувань. Зовнішнє меню використовується для відображення поточних вимірювальних і розрахункових параметрів системи та є доступним одразу після ввімкнення пристрою. Внутрішнє меню призначене для зміни конфігурації контролера та захищене від випадкового входу додатковим підтвердженням користувача.

Структура меню користувача наведена на рисунку 3.7.

Для керування меню передбачено чотири кнопки:

- ❖ «Вгору» — перехід до попереднього пункту або збільшення значення;
- ❖ «Вниз» — перехід до наступного пункту або зменшення значення;
- ❖ «Меню» — виклик меню та підтвердження вибору;
- ❖ «Вихід» — повернення на попередній рівень або скасування зміни.



Рисунок 3.7. Структура меню користувача контролера

3.5.1 Зовнішнє меню

У нормальному режимі роботи OLED-дисплей відображає зовнішнє меню, яке є головним екраном пристрою. На ньому відображаються поточні вимірювальні дані та стан системи. Користувач може переглядати інформацію без ризику випадково змінити налаштування контролера.

На головному екрані доцільно відображати:

- ❖ напругу джерела живлення, В;
- ❖ струм заряду або розряду, А;
- ❖ потужність, Вт;
- ❖ температуру, °С;
- ❖ рівень заряду акумуляторного вузла, %;
- ❖ накопичену енергію, Вт·год;
- ❖ стан зв'язку з хмарною платформою;
- ❖ стан інвертора або виконавчого виходу.

Такий екран дозволяє швидко оцінити поточний режим роботи системи.

Якщо виникає аварійна ситуація, зовнішнє меню автоматично переходить до відображення повідомлення про помилку. На дисплеї виводиться причина аварії, наприклад:

- ❖ низька напруга;
- ❖ перевищення струму;
- ❖ перегрів;
- ❖ втрата зв'язку;
- ❖ помилка вимірювального модуля.

Це дозволяє користувачу швидко визначити причину блокування роботи інвертора або іншого обладнання.

3.5.2 Внутрішнє меню налаштувань

Для входу до внутрішнього меню користувач повинен натиснути кнопку «Меню». Після цього на дисплеї з'являється запит підтвердження переходу до режиму налаштувань. Такий підхід дозволяє уникнути випадкового відкриття меню під час перегляду параметрів.

Після підтвердження відкривається внутрішнє меню, яке містить основні налаштування контролера.

Структура внутрішнього меню включає такі розділи:

1. Налаштування акумуляторного вузла.
2. Налаштування шунта.
3. Потужність інвертора.
4. Налаштування зв'язку.
5. Збереження налаштувань.

3.5.3 Налаштування акумуляторного вузла

У цьому розділі задаються параметри, необхідні для оцінки рівня заряду та роботи захистів:

- ❖ напруга повного заряду U_{max} ;
- ❖ напруга повного розряду U_{min} ;
- ❖ номінальна або фактична ємність вузла, Вт·год;
- ❖ дозвіл автоматичного оновлення фактичної ємності після завершення циклу розряду.

Ці параметри використовуються для розрахунку рівня заряду та захисту акумуляторного вузла від глибокого розряду.

3.5.4 Налаштування шунта

Оскільки контролер може працювати з різними типами зовнішніх шунтів, користувач повинен мати можливість змінювати їх параметри.

Основні налаштування:

- ❖ номінальний струм шунта I_{shnom} ;
- ❖ номінальне падіння напруги на шунті U_{shnom} ;
- ❖ напрям вимірювання струму;
- ❖ калібрувальний коефіцієнт.

3.5.5 Потужність інвертора

В цьому розділі задається максимальна потужність інвертора P_{inv} . Даний параметр використовується для визначення допустимого струму навантаження та роботи алгоритмів захисту.

Максимальна потужність інвертора використовується для визначення порогу струмового захисту, який рівний подвоєній максимальній силі струму. Коефіцієнт запасу враховує можливість короточасних перевантажень та пускових струмів навантаження.

3.5.6 Налаштування зв'язку

У цьому розділі користувач може перейти до режиму налаштування мережевого підключення та параметрів хмарної платформи. Оскільки введення назви Wi-Fi мережі, пароля та адреси сервера за допомогою кнопок і OLED-дисплея є незручним, для цих параметрів використовується режим конфігураційної точки доступу.

Після вибору пункту «Налаштування зв'язку» та підтвердження дії контролер тимчасово запускає власну Wi-Fi мережу. Користувач підключається до цієї мережі зі смартфона, ноутбука або планшета та відкриває вебсторінку налаштування пристрою. На цій сторінці можна ввести параметри підключення та ідентифікації вузла.

Через вебсторінку налаштування задаються такі параметри:

1. назва Wi-Fi мережі;
2. пароль Wi-Fi;
3. адреса встановлення пристрою;
4. Налаштування шунта;
5. Потужність інвертора.
6. Налаштування акумуляторного вузла.

Після введення параметрів користувач натискає кнопку збереження на вебсторінці. Контролер записує отримані дані до енергонезалежної пам'яті та перезавантажується. Після перезапуску пристрій переходить у звичайний режим роботи та намагається підключитися до заданої Wi-Fi мережі.

Якщо підключення до заданої мережі не вдалося, контролер відображає повідомлення про помилку зв'язку на OLED-дисплеї. У такому випадку користувач може повторно перейти до пункту «Налаштування зв'язку» та знову запустити конфігураційну точку доступу для зміни параметрів.

Такий підхід спрощує первинне налаштування контролера, оскільки користувач вводить складні текстові параметри через зручний вебінтерфейс, а

кнопки та OLED-дисплей використовуються для запуску режиму налаштування та встановлення певних параметрів.

3.5.7 Збереження налаштувань

Після зміни параметрів користувач повинен підтвердити їх збереження. Лише після підтвердження нові значення записуються до енергонезалежної пам'яті контролера.

До пам'яті записуються:

- ❖ параметри акумуляторного вузла;
- ❖ параметри шунта;
- ❖ налаштування інвертора;
- ❖ параметри зв'язку;

Для зменшення зношування пам'яті запис виконується лише після підтвердження користувача або після завершення важливої події.

Таким чином, використання двох рівнів меню забезпечує зручне розділення режимів перегляду та налаштування. Зовнішнє меню використовується для постійного відображення вимірювальних даних і стану системи, тоді як внутрішнє меню дозволяє змінювати основні параметри контролера лише після підтвердженого входу користувача. Це підвищує зручність експлуатації та зменшує ймовірність випадкової зміни налаштувань.

3.6 Алгоритм обміну даними з хмарною платформою

Обмін даними з хмарною платформою забезпечує інтеграцію локального енергетичного вузла до децентралізованої мережі автоматизованих електropідстанцій. Контролер передає на сервер інформацію про свій стан та отримує команду на дозвіл або заборону передачі енергії в мережу. При цьому остаточне рішення про виконання команди приймається локальним контролером з урахуванням умов безпеки.

Алгоритм обміну даними з хмарною платформою наведено на рисунку 3.8.

Алгоритм обміну даними з хмарною платформою

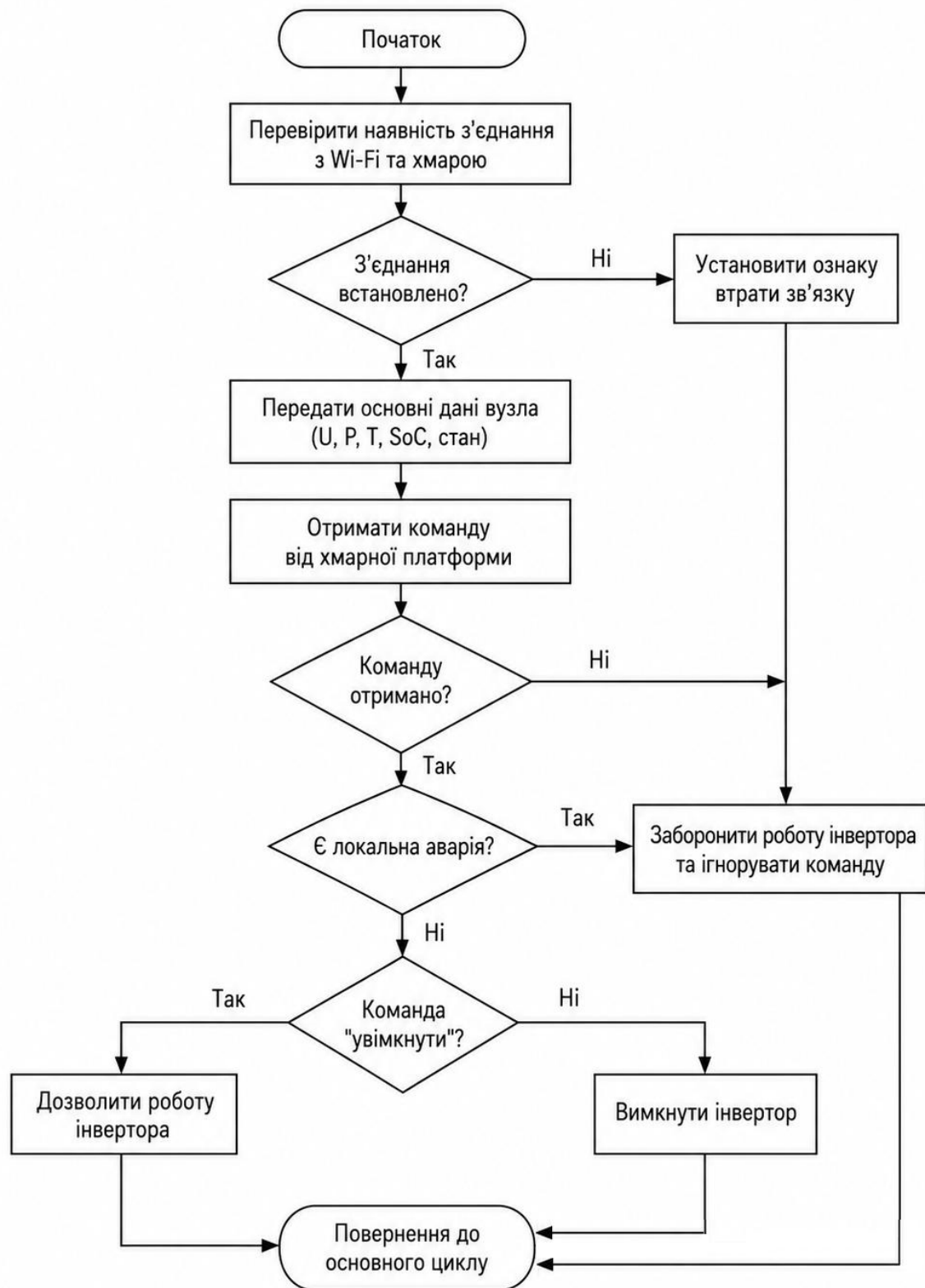


Рисунок 3.8 - Алгоритм обміну даними контролера з хмарною платформою

Перед початком роботи контролер підключається до Wi-Fi мережі, параметри якої задаються через режим конфігурації. Після встановлення з'єднання контролер періодично формує та передає на сервер пакет даних про стан вузла.

До пакета передаються основні параметри:

- ❖ ідентифікатор пристрою;
- ❖ адреса встановлення;
- ❖ ємність вузла;
- ❖ максимальна потужність інвертора;
- ❖ рівень заряду;
- ❖ поточна потужність;
- ❖ температура;
- ❖ аварійні ознаки.

Передавання виконується через заданий інтервал часу, наприклад кожні 5-30 с. Після отримання даних сервер повертає одну з команд:

- ❖ ENABLE - дозволити передачу енергії;
- ❖ DISABLE - заборонити передачу енергії;
- ❖ NO_CHANGE - залишити поточний стан без змін.

Перед виконанням команди контролер перевіряє локальні умови безпеки: відсутність аварій, допустимі значення напруги, струму та температури. Якщо команда ENABLE отримана за нормальних умов, активується релейний вихід керування інвертором. У разі аварії передача енергії блокується незалежно від команди сервера.

Для контролю зв'язку використовується таймер останнього успішного обміну. У разі втрати зв'язку контролер переходить у безпечний стан: передача енергії вимикається, а користувач отримує відповідне повідомлення. Після відновлення зв'язку контролер передає актуальний стан вузла та очікує нову команду від сервера.

Узагальнений алгоритм роботи має такий вигляд:

1. Підключення до Wi-Fi мережі.

2. Передавання даних про стан вузла на сервер.
3. Отримання команди від хмарної платформи.
4. Перевірка локальних умов безпеки.
5. Виконання або блокування команди.
6. Контроль наявності зв'язку та перехід у безпечний стан при його втраті.

Таким чином, хмарна платформа забезпечує дистанційний моніторинг і координацію роботи вузлів, тоді як локальний контролер гарантує безпечне виконання команд незалежно від стану мережевого з'єднання.

3.7 Опис програмної реалізації контролера

Програмне забезпечення контролера реалізує основні функції пристрою: ініціалізацію апаратних вузлів, зчитування вимірювальних параметрів, розрахунок потужності та рівня заряду, локальний захист, роботу меню користувача, керування виконавчими виходами та обмін даними з хмарною платформою. Програма призначена для роботи на мікроконтролерному модулі ESP8266 ESP-12F з OLED-дисплеєм.

Програмна реалізація побудована за модульним принципом. Основні програмні модулі наведено в таблиці 3.1.

У програмі можна виділити дві основні частини: функцію початкового налаштування `setup()` та основний цикл `loop()`.

У функції `setup()` виконується підготовка пристрою до роботи:

- ❖ переведення виходів у безпечний стан;
- ❖ налаштування периферії та дисплея;
- ❖ запуск інтерфейсу I2C;
- ❖ перевірка INA228;
- ❖ завантаження налаштувань;
- ❖ підключення до Wi-Fi.

Приклад структури функції `setup()` зображено на рисунку 3.9.

Таблиця 3.1 — Основні програмні модулі контролера

Програмний модуль	Призначення
Модуль ініціалізації	Налаштування GPIO, дисплея, I2C, INA228, Wi-Fi та початкових станів
Модуль вимірювання	Зчитування напруги, струму та температури
Модуль розрахунків	Розрахунок потужності, рівня заряду, енергії та фактичної ємності
Модуль захисту	Перевірка аварійних умов і формування сигналу блокування
Модуль меню	Відображення даних, обробка кнопок і зміна налаштувань
Модуль пам'яті	Збереження та завантаження параметрів користувача
Модуль зв'язку	Підключення до Wi-Fi, передавання даних і приймання команд
Модуль керування виходами	Керування реле інвертора та зовнішнім силовим модулем

```
void setup() {
    setOutputsSafe();

    initGPIO();
    initDisplay();
    initI2C();

    if (!initINA228()) {
        setFault(FAULT_MEAS);
    }

    loadSettings();
    calculateCoefficients();

    initWiFi();
    sendStartupStatus();
}
```

Рисунок 3.9. Приклад структури функції setup()

Функція `loop()` виконується безперервно та забезпечує вимірювання параметрів, перевірку захистів, оновлення інтерфейсу й обмін даними з хмарною платформою. Приклад функції `loop()` зображено на рисунку 3.10.

```
void loop() {  
    readMeasurements();  
    calculateParameters();  
  
    checkProtection();  
    processCloudCommand();  
  
    updateOutputs();  
    updateDisplay();  
    processButtons();  
  
    exchangeWithCloud();  
}
```

Рисунок 3.10. Приклад функції `loop()`

Для одночасного виконання кількох задач використовується неблокуючий принцип роботи на основі функції `millis()`. Це дозволяє незалежно виконувати вимірювання, оновлення дисплея та передавання даних без використання довгих затримок.

Приклад часових інтервалів зображено на рисунку 3.11.

```
const unsigned long MEAS_PERIOD = 500;  
const unsigned long DISPLAY_PERIOD = 1000;  
const unsigned long CLOUD_PERIOD = 10000;
```

Рисунок 3.11. Приклад часових інтервалів

Приклад перевірки періодичності зображено на рисунку 3.12:

```
if (millis() - lastMeasureTime >= MEAS_PERIOD) {  
    lastMeasureTime = millis();  
    readMeasurements();  
    calculateParameters();  
    checkProtection();  
}
```

Рисунок 3.12. Приклад перевірки періодичності

Поточні виміряні та розраховані параметри зберігаються у структурі даних, приклад зображено на рисунку 3.13.

```
struct NodeState {  
    float voltage;  
    float current;  
    float power;  
    float temperature;  
    float soc;  
    bool relayState;  
    bool powerModuleState;  
    bool fault;  
};
```

Рисунок 3.13. Приклад зберігання параметрів у структурі даних.

Налаштування користувача також зберігаються у структурі та записуються до енергонезалежної пам'яті, приклад зображено на рисунку 3.14.

```
struct Settings {  
    float uMax;  
    float uMin;  
    float shuntCurrentNom;  
    float shuntVoltageNom;  
    float inverterPowerMax;  
    float capacityWh;  
    char wifiSsid[32];  
    char wifiPassword[64];  
};
```

Рисунок 3.14. Приклад зберігання налаштувань користувача.

Після завантаження налаштувань розраховуються допоміжні коефіцієнти, приклад зображено на рисунку 3.15.

```
shuntResistance = settings.shuntVoltageNom / settings.shuntCurrentNom;  
voltageScale = 6.0;
```

Рисунок 3.15. Приклад розрахунку допоміжних коефіцієнтів

Модуль локального захисту контролює перевищення струму, перегрів, зниження напруги та помилки вимірювання. За наявності хоча б однієї аварії керування інвертором блокується незалежно від зовнішніх команд.

Керування виконавчими виходами виконується окремою функцією, приклад зображено на рисунку 3.16.

Меню користувача реалізоване як автомат станів, що забезпечує перегляд параметрів і зміну налаштувань без зупинки основного циклу роботи. Для обміну з хмарною платформою формується JSON-повідомлення зі станом пристрою, а отримані команди виконуються лише після перевірки локальних умов безпеки.

```
void updateOutputs() {  
    if (fault) {  
        disableInverter();  
        disablePowerModule();  
    } else {  
        if (cloudCommand == ENABLE) {  
            enableInverter();  
            enablePowerModule();  
        } else if (cloudCommand == DISABLE) {  
            disableInverter();  
            disablePowerModule();  
        }  
    }  
}
```

Рисунок 3.16. Приклад керування виконавчими входами

Основні переваги такої реалізації:

- ❖ модульна структура програми;
- ❖ відсутність блокуючих затримок;
- ❖ пріоритет локального захисту над зовнішніми командами;
- ❖ збереження налаштувань після вимкнення живлення;
- ❖ можливість подальшого розширення функціоналу.

Таким чином, програмна реалізація контролера побудована за циклічним принципом із розподілом функцій між окремими програмними модулями. Це забезпечує стабільну роботу пристрою, локальну безпеку енергетичного вузла.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено алгоритми роботи та програмну логіку контролера локального енергетичного вузла. Визначено послідовність роботи

пристрою, що включає ініціалізацію, вимірювання параметрів, перевірку аварійних умов, керування виходами та обмін даними з хмарною платформою.

Розроблено алгоритм безпечної ініціалізації контролера, який передбачає переведення виконавчих виходів у безпечний стан до завершення перевірки обладнання та завантаження налаштувань.

Описано алгоритми вимірювання та розрахунку параметрів вузла, зокрема напруги, струму, температури, потужності, рівня заряду та накопиченої енергії. Також реалізовано алгоритм локального захисту від зниження напруги, перевищення струму, перегріву та інших аварійних ситуацій, який має пріоритет над командами хмарної платформи.

Розроблено структуру меню користувача та систему налаштувань, включаючи режим конфігураційної точки доступу для налаштування через вебінтерфейс.

Описано алгоритм обміну даними з хмарною платформою, який забезпечує передачу параметрів вузла та отримання команд керування передачею енергії.

Програмне забезпечення контролера реалізовано за модульним принципом із окремими блоками вимірювання, захисту, інтерфейсу користувача, пам'яті та зв'язку. Це забезпечує автономну роботу пристрою, локальний захист і можливість інтеграції до децентралізованої енергетичної мережі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті розроблено апаратно-програмний контролер локального енергетичного вузла децентралізованої мережі автоматизованих електропідстанцій. Контролер призначений для вимірювання параметрів вузла, локального захисту, керування зовнішнім обладнанням та обміну даними з хмарною платформою.

У першому розділі проаналізовано принципи побудови децентралізованих систем електропостачання та роботу мережевих on-grid інверторів. Визначено склад локального енергетичного вузла та обґрунтовано необхідність використання окремого контролера для моніторингу й керування. Також розглянуто методи вимірювання напруги, струму та температури.

У другому розділі розроблено структуру апаратної частини контролера та сформовано його функціональні вимоги. Передбачено вимірювання напруги до 85 В і до 500 В через зовнішній подільник, вимірювання струму за допомогою шунта, температурний контроль, локальний захист і керування інвертором. Обґрунтовано модульну конструкцію пристрою та вибрано основні компоненти: ESP8266 ESP-12F, INA228 і NTC-термістор B3950.

Виконано розрахунки вимірювальних каналів, системи живлення та зовнішніх силових модулів захисту для низьковольтних і високовольтних систем. Розроблено електричну принципову схему контролера, яка включає вимірювальний вузол, гальванічну розв'язку, ізольовані джерела живлення, виходи керування та резервне живлення.

У третьому розділі розроблено алгоритми роботи та програмну логіку контролера. Реалізовано алгоритми ініціалізації, вимірювання параметрів, розрахунку потужності та рівня заряду, локального захисту, керування виконавчими виходами й обміну даними з хмарною платформою. Передбачено систему меню та налаштувань, а також механізм конфігурації через вебінтерфейс.

Програмне забезпечення побудовано за модульним принципом і забезпечує одночасне виконання вимірювань, контролю аварійних станів, оновлення інтерфейсу користувача та мережевого обміну даними.

Таким чином, поставлену задачу виконано: розроблено структуру, апаратну частину, електричну принципову схему, алгоритми роботи та програмну логіку контролера локального енергетичного вузла. Запропоноване рішення може використовуватися для моніторингу, локального захисту та диспетчерського керування вузлами децентралізованих енергетичних систем. Подальший розвиток роботи пов'язаний із виготовленням дослідного зразка, його випробуванням та розробкою хмарної платформи з елементами штучного інтелекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] IEA. Empowering Ukraine Through a Decentralised Electricity System. International Energy Agency, 2024.
- [2] NIST. Power Conditioning Systems for Renewables, Storage, and Microgrids. National Institute of Standards and Technology.
- [3] IEEE. IEEE 2030.7-2017 — IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers. IEEE Standards Association, 2018.
- [4] Teodorescu R., Liserre M., Rodriguez P. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. IEEE Press, 2011. 416 p.
- [5] Карташов В. Б. Синхронізація трифазних мережевих інверторів за допомогою алгоритмів PLL. Технічна електродинаміка. 2018. № 4. С. 24–29.
- [6] Blaabjerg F., Guerrero J. M. Smart Grid Grid-Connected Power Electronics Converters. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. Vol. 58, No. 1. P. 1–3.
- [7] Жемчугов Г. В. Режимы работы сетевых инверторов в системах распределенной генерации. Энергетика та автоматика. 2020. № 2. С. 12-18.
- [8] SolaX Power. Remote Shutdown Solution. <https://kb.solaxpower.com/solution/detail/2c9fa4148adb360e018c0fa7006d0d1d?>
- [9] SMA Solar Technology. Modbus. <https://manuals.sma.de/STPxxx70/en-US/13742413067.html?>
- [10] Texas Instruments. *An Engineer's Guide to Current Sensing*. https://www.ti.com/lit/eb/slyy154b/slyy154b.pdf?ts=1779987120747&ref_url
- [11] Allegro MicroSystems. *Comparing Parameters of Shunt-Based and Hall-Effect Current Sensing Solutions*. https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an296301_shunt-vs-hall.pdf?hash=B2E57867CD6D85B4DC976F738B678986&sc_lang

- [12] STMicroelectronics. *Hardware design guideline: power supply and voltage measurement*.
https://www.st.com/resource/en/application_note/an4218-hardware-design-guideline-power-supply-and-voltage-measurement-stmicroelectronics.pdf
- [13] Broadcom. *Precision Optically Isolated Voltage Sensor ACPL-C87B/C87A/C870*.
https://site.eet-china.com/webinar/pdf/Broadcom_0629_datasheet01.pdf
- [14] Analog Devices. Thermistor-Based Temperature Sensing System—Part 1: Design Challenges and Circuit Configuration.
<https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/thermistor-temperature-sensing-system-part-1.html?>
- [15] Texas Instruments. Four types of temperature sensors.
<https://www.ti.com/document-viewer/lit/html/SSZTCA2?>
- [16] Analog Devices. *ADC Requirements for Temperature Measurement Systems*.
<https://www.analog.com/en/resources/app-notes/an-880.html?>
- [17] Adafruit. Ultra Thin 10K Thermistor - B3950 NTC.
https://www.mouser.com/datasheet/2/737/Adafruit_4890_Web-3367124.pdf?srltid=AfmBOop-fD6aSMEXBmiSsl4qYgLiil7QAaAt-rQBZW79nmnubRjEcYLs&
- [18] Analog Devices. Using Thermistors in Temperature Tracking Power Supplies.
<https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/using-thermistors-in-temperature-tracking-power-supplies.html?>
- [19] SunFounder. Thermometer — NTC Thermistor Beta Equation.
https://docs.sunfounder.com/projects/newton-lab-kit/en/latest/pyproject/py_temp.html
- [20] Espressif Systems. ESP8266EX Datasheet.
https://documentation.espressif.com/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf?
- [21] Texas Instruments. INA228 85-V, 20-Bit, Ultra-Precise Power/Energy/Charge Monitor With I2C Interface. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina228.pdf>

- [22] Texas Instruments. INA226 36V, 16-Bit, Ultra-Precise I2C Output Current, Voltage, and Power Monitor.
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf?ts=1780358958034&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [23] Texas Instruments. INA238 85-V, 16-Bit, High-Precision Power Monitor With I2C Interface. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina238.pdf>
- [24] Texas Instruments. INA229 85-V, 20-Bit, Ultra-Precise Power/Energy/Charge Monitor With SPI Interface. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina229.pdf>
- [25] Infineon Technologies. IRFP4468PbF HEXFET Power MOSFET Datasheet.
<https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-irfp4468-datasheet-en.pdf?fileId=5546d462533600a40153562c73472019&>
- [26] International Rectifier. IRG4PC50UD UltraFast CoPack IGBT Datasheet.
<https://datasheets.b-cdn.net/files/IRG4PC50UD-International-Rectifier-datasheet-89028.pdf?>
- [27] Infineon Technologies. Paralleling Power MOSFETs.
<https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/42/infineon-paralleling-hexfet-174-power-mosfets-applicationnotes-en.pdf?fileId=8ac78c8c84f2c0670184f50254511506&>
- [28] onsemi. AND9100 — Paralleling of IGBTs.
<https://www.onsemi.com/pub/collateral/and9100-d.pdf?>
- [29] MORNSUN. B0512S-1W Isolated DC/DC Converter Datasheet.
- [30] Injoinic. IP5306 Power Management IC Datasheet.
- [31] MORNSUN. B0505S-1W Isolated DC/DC Converter Datasheet.

ДОДАТКИ

надаються за запитом до авторів